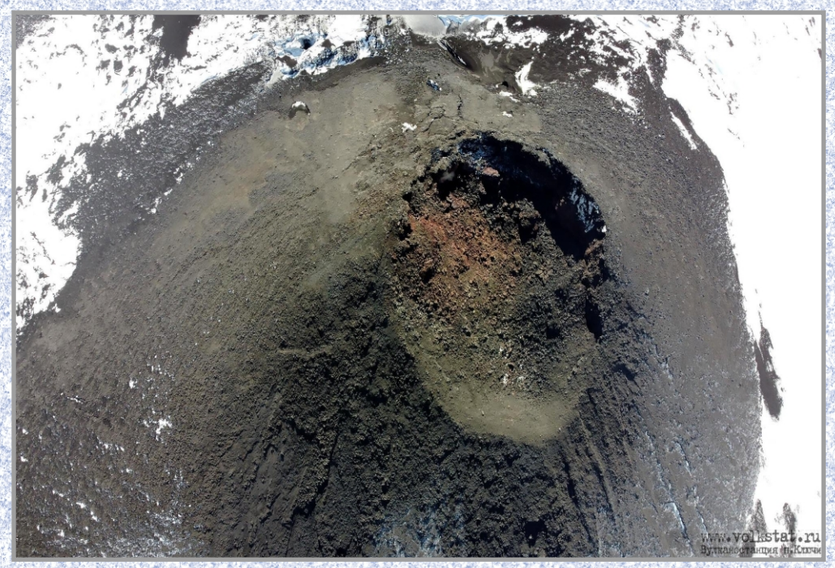
Петропавловск-Камчатский, на рассвете, 18 марта 2020 г.

Извержение вулкана Шивелуч, октябрь 2020 г.



Кратер прорыва Горшкова, вулкан Ключевской, март 2021 г.

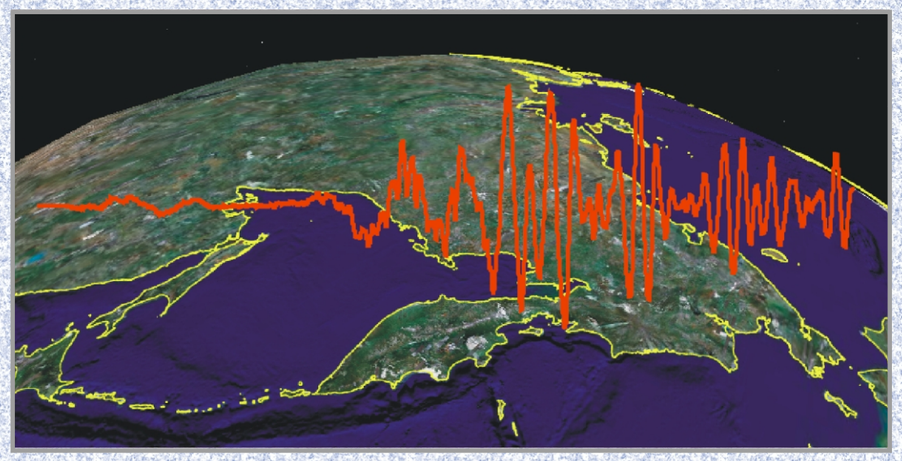
Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов 2021

Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук»
Камчатский филиал

ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ

Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием

26 сентября – 2 октября 2021 г., г. Петропавловск-Камчатский



Петропавловск-Камчатский
2021

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Единая геофизическая служба
Российской академии наук»
Камчатский филиал

Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов

Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием

26 сентября–2 октября 2021 г.,
г. Петропавловск-Камчатский

Научное электронное издание

Петропавловск-Камчатский
2021

УДК 550.3+551.21+551.466.62
ББК 26.21+26.325
П78

Редакционная коллегия:

Ответственный редактор: **Д.В. Чебров**, канд. физ.-мат. наук

Редакционная коллегия:
И.Р. Абубакиров, канд. физ.-мат. наук,
С.В. Болдина, канд. геол.-мин. наук,
С.Я. Дрознина,
В.А. Касимова,
Е.О. Макаров, канд. физ.-мат. наук,
Е.А. Матвеенко, канд. физ.-мат. наук,
И.Н. Нуждина,
В.М. Павлов, канд. физ.-мат. наук,
А.А. Раевская,
В.А. Салтыков, д-р физ.-мат. наук,
С.Л. Сенюков, канд. геол.-мин. наук,
Ю.К. Серафимова,
С.А. Тихонов, канд. физ.-мат. наук,
П.П. Фирстов, д-р физ.-мат. наук,
А.А. Фараонов,
А.С. Чемарев,
А.А. Шакирова.

Сборник издан по решению Ученого совета Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук»

П78 **Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов.** [Электронный ресурс]: Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 26 сентября–2 октября 2021 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – 445 с. – 1 электрон. опт. диск.

ISBN 978-5-903258-45-1

В сборнике опубликованы материалы Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов», которая прошла в г. Петропавловске-Камчатском 26 сентября–2 октября 2021 г.

Представлены статьи, посвященные современному состоянию и проблемам сейсмического и геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов, предвестникам землетрясений и извержений вулканов и различным аспектам исследования цунами. Большое внимание уделено проблемам сейсмической и цунами опасности. Представлены научно-технические и научно-методические разработки для систем комплексного мониторинга катастрофических природных процессов (землетрясений, цунами, извержений вулканов).

Статьи публикуются в авторской редакции. Мнения и позиции авторов не обязательно совпадают с мнением и позицией редакционной коллегии

УДК 550.3+551.21+551.466.62
ББК 26.21+26.325

Научное электронное издание подготовлено при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/,http://www.gsras.ru/unu/)

ISBN 978-5-903258-45-1

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» Камчатский филиал, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 8

Страницы памяти 9

Геофизический мониторинг современных геодинамических процессов в сейсмоактивных регионах

Александров П.Н., Непеина К.С. ПОСТАНОВКА СИСТЕМЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 22

Аптикаева О.И. ПОЛЕ ПОГЛОЩЕНИЯ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЙОНАХ И СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ 27

Батухтин И.В., Беседина А.Н., Горбунова Э.М. ПОРОУПРУГАЯ РЕАКЦИЯ МАССИВА НА ТЕХНОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОРОБКОВСКОГО И ЛЕБЕДИНСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ 32

Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А. ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОДВОДНЫХ ВУЛКАНОВ КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ 36

Болдина С.В., Копылова Г.Н. ВИБРАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ИЗМЕНЕНИЯХ ДАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (ПО ДАННЫМ СКВАЖИННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ) ... 41

Валитов М.Г., Прошкина З.Н. ВЛИЯНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ 46

Гаврилов В.А., Дещеревский А.В., Власов Ю.А., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В., Федористов О.В., Денисенко В.П. СЕТЬ КОМПЛЕКСНЫХ СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕТРОПАВЛОВСК–КАМЧАТСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА: ЗАДАЧИ, СОСТАВ И ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА ИЗМЕРЕНИЙ, ГЛАВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗА 20 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ 51

Жигалин А.Д., Лавров В.С., Архипова Е.В., Брянцева Г.В. ОСОБЕННОСТИ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ И ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА 59

Копылова Г.Н., Касимова В.А., Любушин А.А., Таранова Л.Н. ВАРИАЦИИ ПОЛЯ ФОНОВОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА В РАЙОНЕ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА ПО ДАННЫМ 2011-2021 гг. 64

Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К., Любушин А.А. АНОМАЛИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ: НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА 69

Левочкин К.Р., Стенькин Ю.В., Щеголев О.Б., Кулешов Д.А., Фирстов П.П., Макаров Е.О. ВАРИАЦИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ, КАК СПОСОБ НАБЛЮДЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 74

Лемзиков М.В. ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВО ВРЕМЯ ТРЕЩИННО-ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ В 2012-2013 гг. 78

Любушин А.А. НИЗКОЧАСТОТНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ШУМ ЗЕМЛИ НА ГЛОБАЛЬНОМ И РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЯХ 83

Матвеенко Е.А., Чебров Д.В. АНТРОПОГЕННАЯ КОМПОНЕНТА СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА В ПЕТРОПАВЛОВСКЕ-КАМЧАТСКОМ В 2020 ГОДУ 86

Митюшкина С.В., Ромашева Е.И., Матвеенко Е.А. ПРИМЕНЕНИЕ ГОСТ 34511–2018 (МШИЗ-18) И ГОСТ Р 57546–2017 (ШСИ-17) В АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 92

Папкова А.А., Гилева Н.А. ИСТОРИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ВОПРОСЫ МОНИТОРИНГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИБАЙКАЛЬЯ И ЗАБАЙКАЛЬЯ 95

Петухова С.М., Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Батухтин И.В. УДАЛЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ВАРИАЦИЯХ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ДАННЫМ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО» 99

Салтыков В.А. О ПРИРОДЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА, АНАЛИЗИРУЕМОГО В РАБОТАХ А.А. ЛЮБУШИНА С СОАВТОРАМИ 104

Тубанов Ц.А., Санжиева Д.П.-Д., Радзиминович Н.А., Предеин П.А., Цыдыпова Л.Р. СЕЙСМИЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ СЕЙСМОСТАНЦИЙ 107

Туктаров Р.М., Шибаев С.В., Козьмин Б.М., Куляндина А.С., Гейслер В., Плётц А., Хаберланд К., Крюгер Ф., Баранов Б.В., Цуканов Н.В., Крылов А.А. СОВРЕМЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ АРКТИЧЕСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЯКУТИИ 112

Чебров Д.В. РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ 117

Чирков Е.Б. НОВАЯ ПАРАДИГМА КРАТКОСРОЧНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 125

Чирков Е.Б. О ПРОБЛЕМАХ МОНИТОРИНГА SES НА УСТАНОВКЕ ПРОФЕССОРА ВАРОТСОСА 133

Чирков Е.Б., Идармачев И.Ш. О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ 138

Шарафиев З.З. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПОДВОДНЫХ СКЛОНОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН 143

Сейсмичность, сейсмическая опасность

Алёшина Е.И., Атрохин В.В., Карпенко Л.И., Куркин С.В., Габдарахманова Ю.В. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И СЕЙСМИЧЕСКОЕ МИКРОРАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ОСНОВНЫХ СООРУЖЕНИЙ УСТЬ-СРЕДНЕКАНСКОЙ ГЭС 147

Баранов С.В., Шебалин П.Н., Моторин А.Ю. ЗАКОН ПРОДУКТИВНОСТИ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 152

Богданов В.В., Павлов А.В. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ НАСТУПЛЕНИЯ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО КОМПЛЕКСУ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ И ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ 157

Герман В.И. СВЯЗЬ АНОМАЛИЙ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ С ТЕКТОНИЧЕСКИМ СТРОЕНИЕМ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА И ИХ УЧЕТ ПРИ ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ 162

Джурик В.И., Брыжак Е.В., Батсайхан Ц., Серебренников С.П., Шагун А.Н., Ескин А.Ю. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ БАЙКАЛО-МОНГОЛЬСКОГО РЕГИОНА 167

Еманов А.Ф., Еманов А.А., Чечельницкий В.В., Шевкунова Е.В., Радзиминович Я.Б., Фатеев А.В., Кобелева Е.А., Гладышев Е.А., Арапов В.В., Артемова А.И., Подкорытова В.Г. ХУБСУГУЛЬСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 12 ЯНВАРЯ 2021 г. С ML = 6.9 (СЕВЕРНАЯ МОНГОЛИЯ) 172

Лисунов Е.В. СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ТЕРРИТОРИИ ПРИМОРСКОГО КРАЯ И ЯПОНСКОГО МОРЯ ЗА ПЕРИОД 2019-2020 ГОДЫ 178

Малышев А.И., Малышева Л.К. ПРЕЦЕДЕНТНО-ЭКСТРАПОЛЯЦИОННАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ В РАЙОНЕ КАМЧАТКИ ПО СОСТОЯНИЮ НА 1 АВГУСТА 2021 г. 182

Михеева А.В. ПРИМЕРЫ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ЮЖНО-АЗИАТСКОГО РЕГИОНА 187

Морозов А.Н., Ваганова Н.В. СЕЙСМИЧНОСТЬ УДАЛЁННЫХ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ: АРХИПЕЛАГ СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ И ПОЛУОСТРОВ ТАЙМЫР 192

Носкова Н.Н., Дягилев Р.А., Верхоланцев Ф.Г. ШКАЛА ML ДЛЯ ТИМАНО-СЕВЕРОУРАЛЬСКОГО РЕГИОНА 199

Пупатенко В.В. СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ БУРЕЙСКОЙ ГЭС НА ГЕОФИЗИЧЕСКУЮ СРЕДУ 202

Родкин М.В. НОВОЕ О ПРИРОДЕ ГЛУБОКОФОКУСНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 206

Салтыков В.А. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ СЕЙСМИЧНОСТИ СОУС'09: 10 ЛЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА КАМЧАТКЕ 211

Сенюков С.Л., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я., Шапиро Н.М., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В., Назарова З.А., Должикова А.Н., Толокнова С.Л., Карпенко Е.А. КАТАЛОГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ СЕТИ KISS В 2015-2016 гг. 216

Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В. СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНА АВАЧИНСКИЙ В 1994-2020 гг. 221

Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В. СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ В 2021 г. В СВЯЗИ С ПОБОЧНЫМ ПРОРЫВОМ ИМЕНИ Г.С. ГОРШКОВА 228

Соломатин А.В. О ВОЗМОЖНОСТИ ВВЕДЕНИЯ ОБОБЩЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КЛАССА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 236

Исследование предвестников землетрясений и извержений вулканов

Бурмин В.Ю., Салтыков В.А., Коновалова А.А. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА УДИНСКОМ ВУЛКАНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ 241

Гаврилов В.А., Дещеревский А.В., Соломатин А.В., Пантелеев И.А., Пулинец С.А., Богданов В.В., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В. КОНЦЕПЦИЯ ПОДХОДА К КРАТКОСРОЧНОМУ ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ВРЕМЕНИ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РАЙОНА АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА (КАМЧАТКА) 245

Коновалова А.А., Салтыков В.А., Кравченко Н.М. ПРЕДВЕСТНИКОВЫЕ АНОМАЛИИ СЕЙСМИЧНОСТИ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ 2016-2019 гг. В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ И АЛЕУТСКОЙ ОСТРОВНЫХ ДУГ 252

Коновалова А.А., Салтыков В.А. ПРЕДВЕСТНИКОВЫЕ АНОМАЛИИ СЕЙСМИЧНОСТИ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ 2020 г. В ОКРЕСТНОСТИ КРОНОЦКОГО ЗАЛИВА 258

Копылова Г.Н., Болдина С.В. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ: ОБЗОР МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПОЛУОСТРОВЕ КАМЧАТКА 264

Кучай М.С., Славина Л.Б. ОТРАЖЕНИЕ ПОДГОТОВКИ СЕВЕРО-КУРИЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 25.03.2020 И РАЗВИТИЯ ЕГО АФТЕРШОКОВОГО ПРОЦЕССА В ПАРАМЕТРЕ Vp/Vs 268

Мартинес-Беденко В.А., Пилипенко В.А., Козырева О.В., Шиокава К. ПОИСК ИМПУЛЬСНЫХ УНЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 274

Ребецкий Ю.Л. К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ЗЕМНЫХ ПРИЛИВОВ НА СЕЙСМИЧНОСТЬ 279

Рябинин Г.В., Полетаев В.А. ИЗМЕНЕНИЯ ИОННО-СОЛЕВОГО СОСТАВА ТЕРМОМИНЕРАЛЬНЫХ ВОД В СВЯЗИ С СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ ($ML \geq 7.0$) ЮГО-ВОСТОКА ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА 283

Салтыков В.А. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ НА ОСНОВЕ СОУС'09: МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ С УЧЕТОМ ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ 288

Сапетина А.Ф., Глинский Б.М., Мартынов В.Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ВИБРОПРОСВЕЧИВАНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ПОСТРОЙКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА 293

Славина Л.Б., Кучай М.С. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МАГМАТИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В РАЙОНЕ АВАЧИНСКОЙ – КОРЯКСКОЙ – ДЗЕНЗУР – ЖУПАНОВСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ ЮГО-ВОСТОКА КАМЧАТКИ ПО ПАРАМЕТРУ Vp/Vs 298

Сухов Р.Р. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 307

Фирстов П.П., Макаров Е.О. ОТКЛИК В ПОЛЕ ПОДПОЧВЕННЫХ ГАЗОВ НА ПОДГОТОВКУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 16 МАРТА 2021 г. С M_W=6.6 (РАЙОН КРОНОЦКОГО ПОЛУОСТРОВА) 312

Чебров Д.В., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КАМЧАТСКОГО ФИЛИАЛА РОССИЙСКОГО ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА В 2019–2021 гг. 316

Шакирова А.А., Фирстов П.П, Заводевкин И.А. ОСОБЕННОСТИ МУЛЬТИПЛЕТОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РЕЖИМА «DRUMBEATS», ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ВО ВРЕМЯ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВЛК. КИЗИМЕН В 2010-2013 гг. 323

Pankov F., Norden D., Pankov N., Pigulevskiy P., Feshchenko A., Shcherbyna S. THE LASER TECHNOLOGY FOR EARTHQUAKE'S FORECAST AND FOR DIFFERENT APPROACHES OF SEISMIC HAZARD ASSESSMENT 327

Цунами: опасность и предупреждение

Воронина Т.А., Лоскутов А.В. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА УСЕЧЕННОГО СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЦУНАМИ 333

Губанова А.А., Крупина Е.М., Дрознин Д.В., Чебров Д.В. ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ РИОЦ «ПЕТРОПАВЛОВСК» В РАМКАХ СЛУЖБЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ И СЛУЖБЫ СРОЧНЫХ ДОНЕСЕНИЙ В 2019–2020 338

Гусев О.И., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН ЦУНАМИ С ПОЛУПОГРУЖЕННЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ С НЕРОВНЫМ ДНИЩЕМ 341

Ивельская Т.Н. АНАЛИЗ И УТОЧНЕНИЕ ОПЕРАТИВНОГО КАТАЛОГА ЦЕНТРА ЦУНАМИ ЗА ПЕРИОД 2000-2020 ГОДЫ 346

Кайстренко В.М. ПОВТОРЯЕМОСТЬ ЦУНАМИ И ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ ДЛЯ ПОБЕРЕЖЬЯ ЮЖНЫХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ 349

Пинегина Т.К. ДЕТАЛЬНОЕ КАРТИРОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ ЦУНАМИ 1923 И 1952 гг. НА ПОБЕРЕЖЬЕ ХАЛАКТЫРСКОГО ПЛЯЖА (АВАЧИНСКИЙ ЗАЛИВ, КАМЧАТКА) 354

Моделирование в геофизике

Акбашев Р.Р., Фирстов П.П. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКАХ ЭКСПЛОЗИЙ ВУЛКАНА ЭБЕКО (О. ПАРАМУШИР) 359

Гоев А.Г., Резниченко Р.А., Тарасов С.А., Федоров А.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБИННОГО СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ ЛОВОЗЕРСКОГО И ХИБИНСКОГО МАССИВОВ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧАСТЬ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА) 363

Морозова К.Г., Остапчук А.А. ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТОЭМИССИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МОДЕЛЬНОГО РАЗЛОМА 368

Чебров Д.В., Дрознин Д.В., Матвеенко Е.А., Митюшкина С.В., Раевская А.А. ПРОТОТИП СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ФАКТИЧЕСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО ПО ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ 372

Технические и программные средства геофизического мониторинга

Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Ковалевский В.В. НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА АКТИВНОГО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА 378

Делемень И.Ф. КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР АЛГОРИТМОВ, МЕТОДОВ И СПОСОБОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ УПОРЯДОЧЕННОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ ТОЧЕЧНЫХ МНОЖЕСТВ ЛОКАЛЬНОЙ И РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ 382

Долгая А.А., Рашидов В.А. НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАБОТЫ С ДАННЫМИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СТАНЦИЙ ДРАГИРОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫХ В РЕЙСАХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СУДНА «ВУЛКАНОЛОГ» В ПРЕДЕЛАХ КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ 387

Заводевкин И.А., Шакирова А.А., *Фирстов П.П.* ПРОГРАММНОЕ РЕШЕНИЕ «DRUMCORR» НА ОСНОВЕ КРОСС-КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С БЛИЗКИМИ ВОЛНОВЫМИ ФОРМАМИ 392

Кобзев В.А., Болдина С.В., Коркина Г.М., Долгих В.П. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ СКВАЖИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ КФ ФИЦ ЕГС РАН В 2019-2021 гг. 396

Кобзев В.А., Коркина Г.М. ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНИКОМПЬЮТЕРА ТИПА STK-1 ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНАХ 401

Копылова Г.Н., Будилова Е.А., Соловьёва М.С., Коркина Г.М. МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РАДИОВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА В КФ ФИЦ ЕГС РАН 405

Наумов С.Б., Титов Е.М. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ УДАЛЁННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ 410

Фараонов А.А., Матвеенко Е.А., Митюшкина С.В., Ромашева Е.И., Чемарёв А.С. СЕРВИС ПО СОЗДАНИЮ, СБОРУ И ХРАНЕНИЮ ОПРОСОВ 414

Хритова М.А. ПРОГРАММА ДЛЯ ОБРАБОТКИ АФТЕРШОКОВ ХУБСУГУЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 11 ЯНВАРЯ 2021 ГОДА 418

Чемарёв А.С., Матвеенко Е.А. ЕДИНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ КФ ФИЦ ЕГС РАН В 2021 г. 424

Юсупов Ш.С., Шин Л.Ю., Расулов А.В. ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ СУСАМЫРСКОГО ЗНМЛЕТРЯСЕНИЯ 1992 ГОДА 428

Решение Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ» 436

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ 443

ПРЕДИСЛОВИЕ

Нет никаких сомнений в том, что природные катастрофы в сейсмоактивных регионах будут возникать и впредь. Поэтому очень важна роль фундаментальных и прикладных исследований в области прогнозирования опасных геодинамических процессов, разработки и обоснования мероприятий по смягчению их последствий. Необходимо изучать и систематизировать предвестники опасных природных явлений, разрабатывать научно обоснованные методики их прогноза, в том числе на основе более глубокого понимания физической природы. Эффективной формой организации таких работ является проведение специальных межведомственных исследовательских мероприятий и программ, направленных на уменьшение возможных жертв и экономического ущерба.

В 1961 году на Камчатке создана система комплексного мониторинга геодинамических процессов, которая представляет собой специализированный аппаратурно-информационный комплекс для регистрации, передачи, сбора, хранения и обработки сейсмических и геофизических данных, обеспечения ими фундаментальных и прикладных исследований в области наук о Земле. По мнению российских ученых, сегодня Камчатка является один из ведущих центров сейсмологических и геофизических исследований в стране.

26 сентября – 2 октября в г. Петропавловске-Камчатском уже в восьмой раз проводится Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов» - единственная в России регулярная многопрофильная конференция, на которой комплексно рассматриваются научно-методические, технические и прикладные аспекты исследования и контроля опасных геодинамических процессов. Конференция проводится раз в два года, ее организатором является Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук». Несколько лет назад камчатская конференция приняла эстафету специализированных совещаний «Проблемы сейсмичности Дальнего Востока России», став регулярной площадкой обсуждения сейсмологических вопросов. В 2021 г. исполняется 60 лет организации детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке. Наша конференция – хороший способ отдать должное тем людям, чей многолетний самоотверженный труд обеспечил высокие результаты камчатской науки.

В течение нескольких дней сейсмологи, геофизики, вулканологи и специалисты по цунами имеют возможность обменяться мнениями по широкому кругу вопросов: от организации инструментального сейсмического и геофизического мониторинга до проблем снижения рисков и смягчения последствий стихийных бедствий в сейсмоактивных регионах.

Основные темы конференции были традиционно отражены в названиях научных сессий:

– геофизический мониторинг современных геодинамических процессов в сейсмоактивных регионах;
– сейсмичность, сейсмическая опасность;
– технические и программные средства геофизического мониторинга;
– исследование предвестников землетрясений и извержений вулканов;
– моделирование в геофизике;
– цунами: опасность и предупреждение.

В конференции приняли участие более 110 ученых из 13 субъектов Российской федерации и 6 зарубежных стран. Многие ученые приезжают на Камчатку уже не первый раз. Для расширения круга участников и повышения уровня научных докладов конференция впервые проводилась в смешанном формате (очно и дистанционно). Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН приветствует как постоянных участников конференции, так и вновь прибывших.

Данный сборник содержит расширенные материалы докладов, представленных в программе конференции. Оргкомитет надеется, что труды конференции будут актуальными для широкого круга специалистов в области наук о Земле.

Председатель Оргкомитета
канд. физ.-мат. наук Д. В. Чебров

Страницы памяти

ПАМЯТИ

ТАМАРЫ ГЕОРГИЕВНЫ КОНСТАНТИНОВОЙ

(15 декабря 1938 г. – 20 декабря 2020 г.)

ПАМЯТИ

ТАМАРЫ ГЕОРГИЕВНЫ КОНСТАНТИНОВОЙ

(15 декабря 1938 г. – 20 декабря 2020 г.)

20 января 2021 г. не стало Тамары Георгиевны Константиновой, замечательного человека и талантливого ученого, посвятившей свою жизнь инженерной сейсмологии.

Тамара Георгиевна Константинова родилась 15 декабря 1938 г. в Иркутске. В 1962 г. закончила физико-математический факультет по специальности «сейсмология», а в 1968 г. – геологический факультет (вечернее отделение) Иркутского Государственного Университета. В 1962-1968 гг. работала в Институте земной коры СО РАН.

До 1989 г. Т.Г. Константинова трудилась в Восточно-Сибирском тресте инженерно-строительных изысканий в должности геофизика и старшего геофизика. Участвовала в составлении карт сейсмического микрорайонирования Петропавловска-Камчатского, Новокузнецка, Улан-Удэ, Кисловодска, Южно-Сахалинска, Зейской и Бурейской ГЭС, более 5 закрытых объектов, 10 железнодорожных станций Байкало-Амурской магистрали, за что в 1989 г. была награждена медалью «За строительство Байкало-Амурской магистрали».

В 1988 г. Тамара Георгиевна прошла по конкурсу на должность старшего научного сотрудника в Камчатский филиал ДальНИИИС. С 1991 г. была сотрудницей Института вулканологии, а в ноябре 2008 г. перешла на должность старшего научного сотрудника в КФ ГС РАН, где продолжала исследования по теме инженерной сейсмологии до выхода на заслуженный отдых в 2019 г.

Т.Г. Константинова принимала участие в обследовании последствий землетрясения 1971 г. в Петропавловске-Камчатском, в зоне бедствия Спитакского землетрясения (1988 г.) в Армении, Нефтегорского (1995 г.) на Сахалине и Олюторского землетрясения (2006 г.) на северо-востоке Камчатского края.

Тамара Георгиевна написала более 50 научных статей, принимала активное участие в конференциях и совещаниях всероссийского и мирового уровня. Ссылки на ее работы можно встретить во многих дипломных и кандидатских работах по схожей тематике.

Т.Г. Константинова часто выступала в роли консультанта, обладающего уникальными знаниями и опытом, при проектировании важных строительных объектов в Петропавловске-Камчатском.

В последние годы работы основные усилия Тамары Георгиевны были направлены на написание собственной монографии, посвященной разжижению грунтов при сильных землетрясениях.

Научное наследие Тамары Георгиевны Константиновой и светлая память о ней всегда будут с нами.

Страница памяти Т.Г. Константиновой размещена на сайтах КФ ФИЦ ЕГС РАН по адресу:
https://glob.emsd.ru/organization/history/memory-of-our-friends-and-colleagues/

ПАМЯТИ

ЮЛИИ АЛЕКСАНДРОВНЫ КУГАЕНКО

(4 октября 1962 г. – 6 августа 2020 г.)

ПАМЯТИ

ЮЛИИ АЛЕКСАНДРОВНЫ КУГАЕНКО

(4 октября 1962 г. – 6 августа 2020 г.)

6 августа 2020 г. после тяжелой, продолжительной болезни ушла из жизни Юлия Александровна Кугаенко – ведущий научный сотрудник Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, талантливый ученый, верный друг, надежный товарищ и замечательный человек.

Юлия Александровна Кугаенко родилась в г. Запорожье, в 1979 году поступила на Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова (кафедра физики Земли), который окончила в 1985 г. После окончания Университета была принята на работу в КОМСП на должность инженера группы сводной обработки, в 1987 г. перешла в группу автономных сейсмических станций.

В 2001 г. защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Сейсмоэмиссионная томография в вулканических районах Камчатки»

С 2003 г. Юлия Александровна занимала должность Ученого секретаря КФ ГС РАН. Благодаря ее деятельности на этом посту, научная жизнь организации заметно оживилась. Юлия Александровна была инициатором проведения на Камчатке научных конференций, первые из которых прошли в 2006 и 2007 гг., и в настоящий момент конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» имеет статус Всероссийской, пользуясь большой популярностью среди ведущих ученых.

Интенсивная научно-организаторская деятельность успешно совмещалась с продуктивной научной работой. Область научных интересов Юлии Александровны включала в себя множество направлений сейсмологии, геофизики и вулканологии: микросейсмическая шумовая томография, изучение сейсмического режима, сейсмический прогноз, прогноз извержений вулканов, создание моделей вулканических питающих систем, исследование локальной сейсмичности по данным временных сетей наблюдений. В последние годы своей работы Юлия Александровна активно занималась новым направлением, развиваемым в КФ ФИЦ ЕГС РАН: комплексными исследованиями сильных землетрясений. Она была одним из инициаторов постановки работ в этом направлении, и ее участие в разработке методических основ этих исследований сложно переоценить.

Юлия Александровна была руководителем и основным исполнителем огромного количества российских и международных грантов и проектов, организовывала и успешно проводила полевые работы в самых сложных и труднодоступных районах Камчатки.

Заслуги Юлии Александровны отмечены многочисленными грамотами, среди которых Почетные грамоты Российской академии наук и ГС РАН.

Юлию Александровну отличал вдумчивый, аккуратный, системный и добросовестный подход при решении любых научных и научно-организационных задач. Требовательная, любящая и знающая свое дело, Юлия Александровна пользовалась заслуженным авторитетом в коллективе. Ее коллеги и друзья всегда могли рассчитывать на ее деятельную помощь и дружеское участие, она всегда умела находить оптимальные решения в любых ситуациях. Юлия Александровна была одной из тех, кто определяет лицо не только Камчатской, но и российской сейсмологии.

Страница памяти Ю.А. Кугаенко размещена на сайтах КФ ФИЦ ЕГС РАН по адресу:
https://glob.emsd.ru/organization/history/memory-of-our-friends-and-colleagues/

ПАМЯТИ

ДМИТРИЯ АНАТОЛЬЕВИЧА ОТОТЮКА

(25 июля 1963 г. – 02 декабря 2019 г.)

ПАМЯТИ

ДМИТРИЯ АНАТОЛЬЕВИЧА ОТОТЮКА

(25 июля 1963 г. – 02 декабря 2019 г.)

2 ноября 2019 г. ушел из жизни Дмитрий Анатольевич Ототюк – заведующий сектором «Петропавловск-Цунами» Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, замечательный человек, прекрасный руководитель и надежный товарищ, один из опытнейших специалистов по оперативной обработке землетрясений.

Дмитрий Анатольевич родился и вырос на Камчатке. В 1985 г. окончил Иркутский политехнический институт по специальности горный инженер-геофизик. Свой трудовой стаж он начал в Забайкальской геофизической экспедиции. В 2002 году поступил на работу на сейсмическую станцию «Петропавловск» Камчатского филиала Геофизической службы РАН на должность инженера. В 2007 году Дмитрий Анатольевич стал начальником станции, а в 2008, после реорганизации – заведующим сектором «Петропавловск-Цунами». На это подразделение возложены одни из самых ответственных задач – Служба срочных сейсмических донесений и Служба предупреждения о цунами.

Под руководством Дмитрия Анатольевича коллектив сектора прошел период модернизации Системы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России, которая проводилась в 2006–2010 гг. Он лично принимал участие в разработке новых технических и программных средств, организовывал внедрение новых методов обработки землетрясений в повседневную практику. Повышались требования к качеству оценок параметров землетрясений, ужесточались нормативы, повышалась ответственность. Огромная заслуга Дмитрия Анатольевича в том, что этот период был пройден без сбоев и серьезных недочетов.

Много сил и времени Дмитрий Анатольевич уделял подготовке молодых сотрудников сектора. Стабильная работа Службы срочных донесений в период смены поколений – во многом его заслуга.

Дмитрия Анатольевича отличала высокая работоспособность и вовлеченность в дело, за которое он отвечал. Его уход, такой ранний и внезапный – тяжелая утрата не только для Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, но и для всей структуры Службы срочных донесений в России.

Светлая память о Дмитрии Анатольевиче навсегда останется в сердцах его коллег и друзей.

Страница памяти Д.А. Ототюка размещена на сайтах КФ ФИЦ ЕГС РАН по адресу:
https://glob.emsd.ru/organization/history/memory-of-our-friends-and-colleagues/

ПАМЯТИ

ПАВЛА ПАВЛОВИЧА ФИРСТОВА

(6 апреля 1941 г. – 20 июля 2021 г.)

ПАМЯТИ

ПАВЛА ПАВЛОВИЧА ФИРСТОВА

(6 апреля 1941 г. – 20 июля 2021 г.)

20 июля 2021 года после непродолжительной болезни ушел из жизни наш друг и коллега, Павел Павлович Фирстов.

Павел Павлович Фирстов родился 6 апреля 1941 г. в г. Омске. После окончания Алтайского политехнического института им. И. И. Ползунова в 1963 г. по распределению был направлен на работу в г. Омск на предприятие п/я 90 в радиофизическую лабораторию. На п/я 90 молодые специалисты увлекались туризмом, а отпуск, как правило, проводили в альпинистских лагерях. Увлекся альпинизмом и Павел Павлович. Работа в радиофизической лаборатории не заинтересовала молодого специалиста, а большое желание путешествовать и увидеть извергающиеся вулканы привели его в конце 1964 г. на Камчатку. Узнав из объявлений о вакансиях в Институте вулканологии СО АН СССР, П. П. Фирстов устроился на работу, и с 14 января 1965 г. был зачислен в лабораторию сети геофизических стационаров, позднее переименованную в лабораторию прогноза и механизма извержений (ПиМИ), на должность лаборанта. Этим он навсегда связал свою судьбу с полуостровом Камчатка и с вулканологией. Все последующие годы трудовой деятельности были связаны с изучением активного вулканического процесса и геодинамики Курило-Камчатской зоны субдукции. В лаборатории ПиМИ, возглавляемой известным советским ученым, вулканологом и сейсмологом Павлом Ивановичем Токаревым (1923–1993 гг.), П. П. Фирстов освоил основы геофизики и приобрел навыки проведения полевых работ. В первый же полевой сезон Павел Павлович проводит регистрацию вулканических землетрясений на действующем вулкане Карымском. Эта работа была продолжена в 1966 г.

В последующие годы полевые сейсмологические работы проводились им в районе Ключевской группы вулканов. После начала нового эруптивного цикла вулкана Карымского в 1970 г. П.П. Фирстов отдает все свои силы изучению этого вулкана и его интерес был главным образом сосредоточен на изучении физики эксплозивного процесса и отражении динамики извержений Карымского вулкана в различных геофизических полях. У подножия вулкана в 1971–1972 гг. под его руководством и непосредственном участии была построена обсерватория, где проводились комплексные геофизические работы. Здание Карымского стационара до сих пор используется в качестве базы для проведения полевых работ в районе этого вулкана.

С 1980 по 1982 гг. Павел Павлович возглавлял сейсмологическую группу на Ключевской вулканостанции им. Левинсона-Лессинга в поселке Ключи. Он был инициатором организации телеметрических сейсмических наблюдений в районе Ключевской группы вулканов. Две первые телеметрические сейсмические станции при его непосредственном участии были установлены у подножия вулканов Шивелуч и Ключевской. С конца 1982 г. и до 1991 г. П. П. Фирстов работал научным сотрудником в группе физической вулканологии в Институте вулканологии ДВО РАН, а затем до 2004 г. в одноименной лаборатории созданного Института вулканической геологии и геохимии ДВО РАН. В эти годы Павел Павлович был сосредоточен на работах в двух научных направлениях: проявление динамики вулканических извержений в волновых возмущениях в атмосфере и создание сети пунктов мониторинга подпочвенного радона с целью поиска предвестников умеренных и сильных землетрясений Камчатки.

В рамках первого направления Павлом Павловичем были организованы полевые наблюдения у подножия извергающихся вулканов, где осуществлялась регистрация волновых возмущений, сопровождающих извержения: 1983 г. — побочного кратера вулкана Ключевского (прорыв «Предсказанный»); 1985 и 1986 гг. — вулкана Безымянного; 1984, 1986–1989 гг. — терминальные вулкана Ключевского. Полученные результаты натурных наблюдений были обобщены и представлены в кандидатской диссертации (2003 г.) и одноименной монографии «Вулканические

акустические сигналы диапазона 0.5–10 Гц в атмосфере и их связь с эксплозивным процессом». Дальнейшее развитие научного направления «акустика вулканических извержений» позволило в 2010 г. успешно защитить диссертацию на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук.

С 1997 г. П.П. Фирстов начал создание сети мониторинга концентрации объемной активности подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. Зарегистрированный краткосрочный предвестник перед Кроноцким землетрясением с M_W = 7.8, вселил надежду на перспективность этого метода. Полноценно сеть стала функционировать с 2000 г. За эти годы разработана методика производства наблюдений за подпочвенными газами в целях прогнозирования землетрясений, получены и обобщены данные о предвестниках, разработана методика прогноза землетрясений, не имеющая аналогов в мире. Сеть наблюдений продолжает функционировать и развиваться и состоит в настоящее время из пяти постоянных пунктов.

С 2004 г. по 2008 г. П.П. Фирстов возглавлял в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН лабораторию комплексного исследования предвестников землетрясений и извержений вулканов. С 2008 г. лаборатория в полном составе была передана в Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», где получила название «лаборатория акустического и радонового мониторинга». Павел Павлович постоянно искал новые возможности мониторинга и изучения землетрясений и вулканических извержений. В последние годы под его руководством получен ряд уникальных результатов в исследованиях электрического поля атмосферы и электризации эруптивных облаков, также Павел Павлович уделял большое внимание наклономерным наблюдениям на вулканах и вулканической сейсмологии. За время работы П.П. Фирстовым опубликовано около 150 статей.

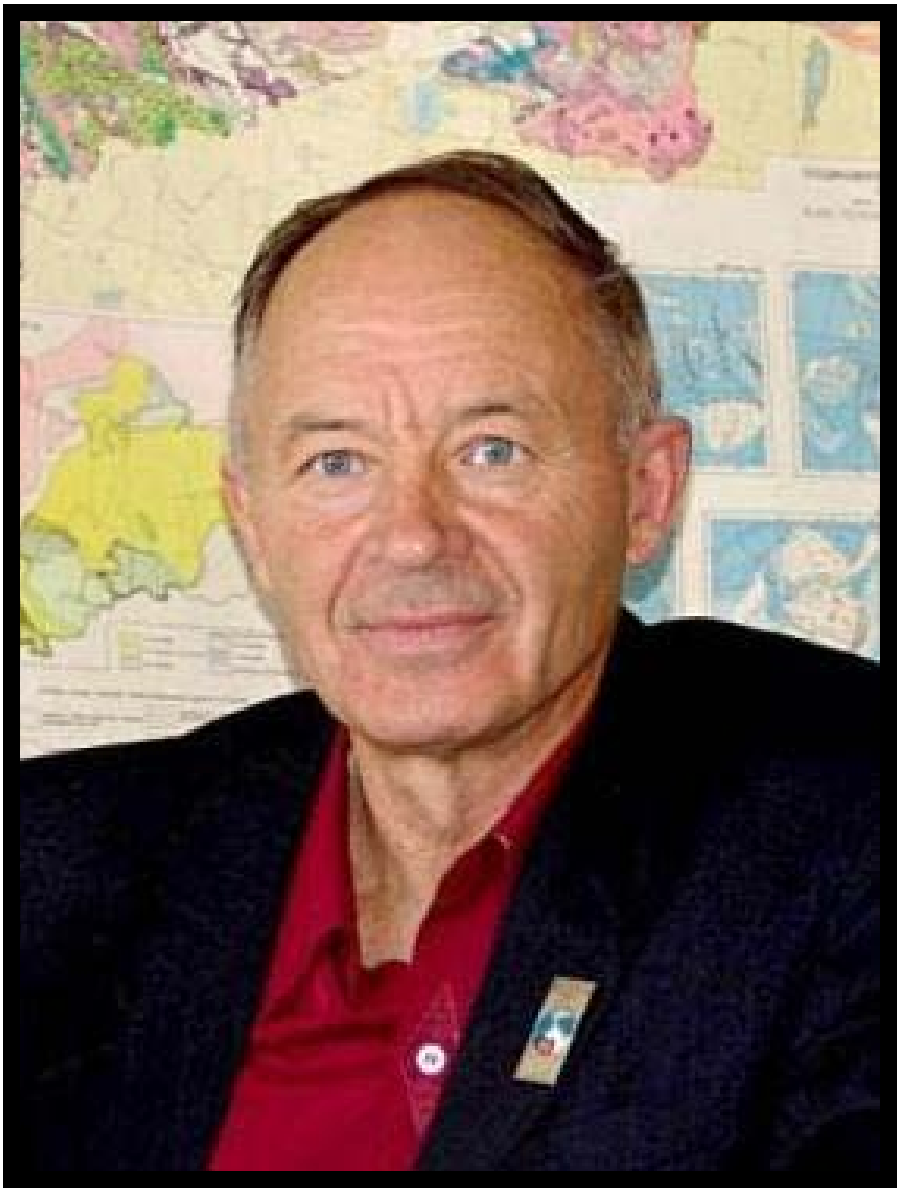
Павел Павлович много времени уделял образовательному процессу и воспитанию молодых исследователей. Он умел объединять и заражать своим оптимизмом самых разных ученых. Под его руководством подготавливались и защищались дипломные, квалификационные работы и кандидатские диссертации, в лаборатории проходили производственную практику студенты из Камчатского государственного университета им. Витуса Беринга и Камчатского технического университета. П.П. Фирстов активно участвовал в научной и общественной жизни, входил в составы Ученых советов Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Единой геофизической службы РАН, а также был членом редакционной коллегии журнала «Геосистемы переходных зон». Был членом диссертационного совета Д 999.004.03.

Страница памяти П.П. Фирстова размещена на сайтах КФ ФИЦ ЕГС РАН и ИВиС ДВО РАН по адресам: https://glob.emsd.ru/organization/history/memory-of-our-friends-and-colleagues/, http://www.kscnet.ru/ivs/memory/FirstovPP/index.html

ПАМЯТИ

ВЛАДИМИРА АЛЕКСЕЕВИЧА ШИРОКОВА

(3 июня 1940 г. – 2 января 2021 г.)



ПАМЯТИ

ВЛАДИМИРА АЛЕКСЕЕВИЧА ШИРОКОВА

(3 июня 1940 г. – 2 января 2021 г.)

2 января 2021 на 81-м году жизни скончался Владимир Алексеевич Широков.

В.А. Широков после школы поступил на радиофизический факультет Томского Государственного университета, который окончил в 1962 г. Извержение вулкана Шивелуч (1964 г.) стало триггером радикальных перемен в жизни Владимира Алексеевича: прочитав в «Комсомольской правде» о начавшемся извержении, он уехал на Камчатку и с 14.01.1965 г. начал работать в лаборатории «Сеть геофизических стационаров» Института вулканологии СО РАН, возглавляемую известным специалистом в области вулканической сейсмологии П.И. Токаревым.

В 1965-1967 гг. В.А. Широков руководил сейсмической группой Камчатской вулканостанции имени Ф.Ю. Левинсона-Лессинга. В последующие годы он участвовал в изучении сильных извержений вулканов Камчатки и Курильских островов: Безымянного (1965 г.), Ключевского (1966 г., побочный прорыв имени Б.И. Пийпа), Карымского (1970-1971 гг.), Алаид (1972 г., побочный прорыв Олимпийский). В частности, В.А. Широковым с коллегами была детально изучена сейсмичность Карымского вулкана, оконтурен периферический магматический очаг и установлена связь вулканической активности с сейсмичностью Кроноцкого залива.

После семи-восьмибалльного Петропавловского землетрясения 25.11.1971 г. В.А. Широков занялся изучением сейсмичности Камчатки и Земли в целом, в том числе проблемой связи тектонических землетрясений и извержений вулканов. По этой тематике в 1980 г. им была защищена кандидатская диссертация, одна из глав которой была посвящена изучению роли космических факторов в возникновении землетрясений и вулканических извержений.

Все его последующие работы по геодинамике, прогнозу землетрясений и вулканических извержений основаны, главным образом, на оригинальной схеме влияния космических факторов на сейсмические и вулканические процессы. В результате этих исследований В.А. Широковым были разработаны методики долгосрочного и краткосрочного прогноза камчатских землетрясений, долгосрочного прогноза извержений вулканов Камчатки и мира, оперативного прогноза сильных мировых землетрясений. С 1991 по 2004 гг. В.А. Широков работал в Институте вулканической геологии и геохимии в должности зав. лабораторией, затем был ведущим научным сотрудником Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, а с октября 2008 г. - Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН». В 2020 г. по совместительству он работал в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

В.А. Широков являлся постоянным членом Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений и оценке сейсмической опасности со времени его основания. Он был соавтором научно-популярных книг «Землетрясение будет завтра» (1989 г.) И «К землетрясению без риска» (1997 г.).

Основным увлечением В.А. Широкова был футбол, его тренерская работа по футболу и хоккею хорошо известна на Камчатке. В 1985 г. В.А. Широкову был вручен нагрудный знак «Активисту детского спорта».

Светлая память о специалисте - вулканологе и сейсмологе высокого класса, отзывчивом и хорошем человеке навсегда останется с нами.

Страница памяти В.А. Широкова размещена на сайтах КФ ФИЦ ЕГС РАН по адресу:
https://glob.emsd.ru/organization/history/memory-of-our-friends-and-colleagues/

Геофизический мониторинг современных геодинамических процессов в сейсмоактивных регионах

УДК 550.371.2+550.83:005.51(470)+550.84:543.27

ПОСТАНОВКА СИСТЕМЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Александров П.Н.[1], Непеина К.С.[2]

[1] *ЦГЭМИ ИФЗ РАН, г. Троицк, alexandr@igemi.troitsk.ru*
[2] *НС РАН, Бишкек-49, Кыргызстан, neks@gdirc.ru*

Введение

Геофизические наблюдения, осуществляемые в пассивном режиме (без использования активных источников) в заданной точке позволяют наблюдать изменения петрофизических характеристик, наиболее чувствительным из которых является неоднородность, формирующаяся за счет анизотропии свойств. Для частного случая бианизотропных сред в работе [29] была установлена явная корреляция между двумя группами анизотропных эффективных свойств - проводимостью и упругостью. В результате изменения напряженно-деформирования состояния литосферы происходит структурно-текстурная перестройка горной породы, которая на макромасштабном уровне выражается в изменении макроанизотропных электромагнитных параметров геосреды. При изучении электромагнитных полей обычно получают отклик в макропараметрах, таких как распределение удельного электрического сопротивления. Для учёта внутреннего строения горной породы в макропараметрах необходимо осуществить переход от микронеоднородной среды к однородной анизотропной (эффективным средам).

Основная часть

Геофизический мониторинг становится необходимым средством изучения геодинамического состояния исследуемой территории. Исследованиями электрических параметров и сопутствующих явлений в геодинамически активных зонах занимаются в настоящее время на Алтае [16], Тянь-Шане [8, 19, 24], Камчатке [13, 14, 20, 25], на Кольском полуострове [18, 22, 27] и др. По результатам этих исследований для условий различных геодинамических обстановок экспериментально подтверждена связь между изменением электрического сопротивления геосреды и произошедшими землетрясениями в исследуемых регионах. По результатам исследований замечено, что наблюдается связь между изменением электрического сопротивления после произошедших на региональных расстояниях землетрясений. В ряде случаев оказывается, что при определенных азимутальных поворотах кажущееся электрическое сопротивление особо чувствительно к произошедшим сейсмическим событиям, что хорошо проявляется на детальных часовых развертках относительного значения сопротивления $\Delta\rho_{к}$ [12]. Во многих работах, авторы приводят свидетельства наличия геоэлектрической анизотропии, о которой пойдет речь дальше. Для изучения этого явления необходимо исследовать связь микростроения горной породы с их макроскопическими параметрами, что связано с теорией эффективных параметров микронеоднородной среды.

В геодинамическом смысле, прежде всего, необходимо определить систему, которая отвечает за изменения геологической среды во времени. При этом следует различать разные масштабы времени – интервал времени, по которому определяется система, и интервал времени, намного больший, в пределах которого меняется сама система. Динамика наблюдаемой системы связана как с изменением ее отдельных частей, так и с изменениями связей между элементами этой системы. Основная задача синергетики как междисциплинарного подхода и системного анализа состоит в том, чтобы вскрыть общие причины, по которым отдельные элементы системы, хаотически ведущие себя на микроуровне, формируют согласованное кооперативное поведение полной системы на макроуровне при взаимодействии с внешней средой.

В качестве примера изучения параметра анизотропии на натурных данных стоит обратиться к результатам пассивного сейсмоэлектромагнитного мониторинга геодинамически активного региона на Киргизском Тянь-Шане в сейсмочувствительных пунктах сети Научной станции РАН с использованием аппаратуры Phoenix MTU-5. Предложена и апробирована система наблюдений для целей наблюдения за вариациями макропараметров. Результаты изучения выделенных полей эндогенного происхождения представляют собой новое направление в аспекте постановки задачи мониторинга современных геодинамических процессов.

В рамках предложенного подхода решаются следующие научные задачи:

1. Проведение совместных наблюдений и разработка метода комплексного анализа сейсмических и электромагнитных полей в пунктах геофизического мониторинга;

2. Исследование взаимосвязи между поведением сейсмических и электрических параметров горных сред и характеристиками геодинамических процессов по экспериментальным данным, полученными в исследуемом регионе.

В работе [17] предложен подход, основанный на совместном сейсмоэлектромагнитном мониторинге эндогенных составляющих наблюдаемых полей для сейсмически активных регионов. Он был испытан в Тяньшанском регионе в 2017 и 2018 гг., изучаемым Научной станций РАН в Бишкеке (НС РАН) [6, 8, 19]. Область Северного Тянь-Шаня характеризуется активностью разломов с выделением радона. Соответственно, это тоже проявление современных геодинамических процессов (рис. 1).

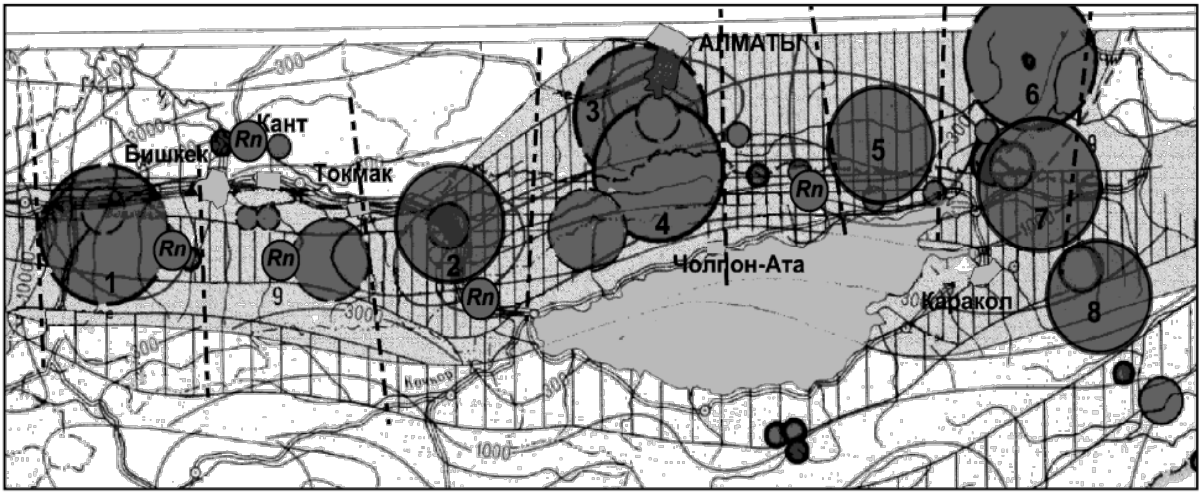


Рис. 1. Обзорная схема крупнейших тектонических землетрясений на Северном Тянь-Шане за последние 120 лет и мест установки радоновых станций (Rn): 1 – Беловодское, *M*=6.9 (1885); 2 – Кемин-Чуйское, *M*=6.9 (1938); 3 – Верненское, *M*=7.3 (1887); 4 – Кеминское, *M*=8.2 (1911); 5 – Байсорунское, *M*=6.4 (1990); 6 – Чиликское, *M*=8.3 (1889); 7 – Заланашское, *M*= 7.1 (1978); 8 – Сарыкамышское, *M*=6.8 (1970); расположение основных трансформных разломов – прерывистая линия (по Рогожин, 2004) [26].

Радон выделяется по трещинам при разгрузке или нагрузке породы. «Таким образом, существует некоторая область квазиупругих деформаций, при которых сжатие вызывает уменьшение выхода радона, а растяжение – увеличение. Получается, что горную породу можно описать моделью некоторой трещиновато-пористой средой, которая состоит из основного скелета и хаотически расположенных открытых, проницаемых трещин и закрытых пор» [26].

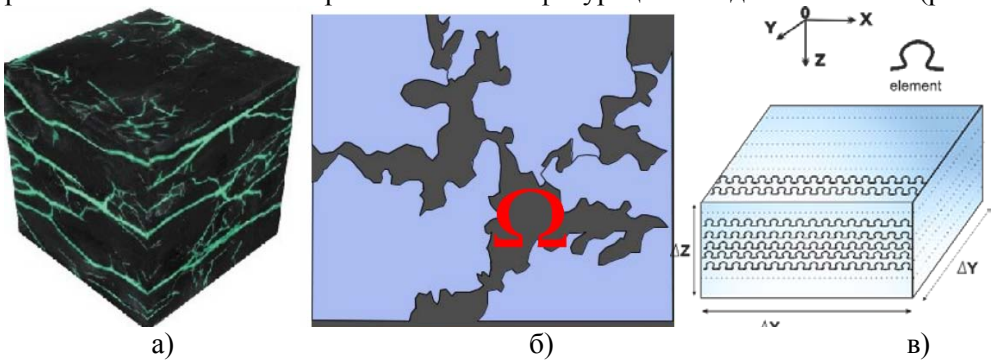
В таком приближении, трещиноватые среды уже не могут быть аппроксимированы однородным слоистым полупространством. Если представить геологическую среду не как однородное полупространство, а как бианизотропную среду (в результате наличия трещин), то изменения её состояния можно описывать с помощью макропараметров на микромасштабном уровне. В англоязычной литературе эта теория в случае её применения к горным породам называется Rock Physics или теория эффективных сред. Горная порода в теории эффективных сред рассматривается как композитная статистически однородная среда. При этом между всеми параметрами для различных физических свойств — упругих и транспортных (тепло- и электропроводности, гидравлической проницаемости) рассматриваемой системы существуют связи, представленные в единообразной форме, что в свою очередь даёт возможность одновременно определять одни свойства породы через изменение других. В таком случае, электромагнитные уравнения Максвелла по-прежнему описывают систему наблюдений и зависимости между электрической индукцией **D**, магнитных моментов с магнитным полем **H** и напряженностью электрического поля **E** записывается как $\mathbf{D}=\varepsilon\mathbf{E}+\alpha\mathbf{H}$, $\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}+\beta\mathbf{E}$ [1]. Электромагнитными параметрами неоднородной среды являются μ - магнитная проницаемость, σ - удельная электропроводность, α, β - бианизотропные параметры, которые связаны с извилистостью порово-трещинного пространства. При этом, «параметры ε, μ, σ, определяющие электрические и магнитные свойства вещества, могут, в случае неоднородной среды, произвольным способом изменяться в пространстве, оставаясь непрерывными функциями координат» [9]. Именно эти параметры отвечают за свойства среды, и если свойства меняются вблизи какой-то поверхности очень резко, например, вблизи разлома, то на электромагнитных измерениях будут наблюдаться изменения [28]. И тогда следует изучать отклик в

электромагнитном поле с применением системного анализа [10, 15, 23]. Все эти параметры (ε, μ, σ, α, β) описывают наиболее общие линейные электромагнитные свойства среды и в общем случае являются тензорами второго ранга. Они могут быть комплексными числами. В свою очередь, анизотропия в матрицах диэлектрической и магнитной проницаемостей приводит к возникновению хиральности среды (Таблица).

Таблица. Типы сред в зависимости от электромагнитных (ε, μ) и эффективных (α, β) параметров, где δ_{ij} – символ Кронекера; e_{ijk} – полностью антисимметричный тензор (i, j, k = 1, 2, 3 – орты трехмерного пространства); **u**, **ν** - векторы, задающие направления оптических осей [11]

тип среды	**ε**	**μ**	**α**	**β**
изотропная	$\varepsilon\,\delta_{ij}$	$\mu\,\delta_{ij}$	0	0
киральная	$\varepsilon\,\delta_{ij}$	$\mu\,\delta_{ij}$	$\alpha\,\delta_{ij}$	$-\alpha\,\delta_{ij}$
биизотропная	$\varepsilon\,\delta_{ij}$	$\mu\,\delta_{ij}$	$\alpha\,\delta_{ij}$	$\beta\,\delta_{ij}$
анизотропная	ε_{ij}	μ_{ij}	0	0
бианизотропная	ε_{ij}	μ_{ij}	α_{ij}	β_{ij}
гиротропная	$\varepsilon_1\,\delta_{ij}+\varepsilon_2\,e_{ijk}\,\mathbf{u}_k$	$\mu_1\,\delta_{ij}+\mu_2\,e_{ijk}\,\mathbf{u}_k$	0	0
бигиротропная	$\varepsilon_1\,\delta_{ij}+\varepsilon_2\,e_{ijk}\,\mathbf{u}_k$	$\mu_1\,\delta_{ij}+\mu_2\,e_{ijk}\,\mathbf{u}_k$	$\alpha_1\,\delta_{ij}+\alpha_2\,e_{ijk}\,\mathbf{u}_k$	$\beta_1\,\delta_{ij}+\beta_2\,e_{ijk}\,\mathbf{u}_k$
одноосная	$\varepsilon_1\,\delta_{ij}+\varepsilon_2\,\mathbf{u}_i\,\mathbf{u}_j$	$\mu_1\,\delta_{ij}+\mu_2\,u_i\,\mathbf{u}_j$	0	0
одноосная бианизотропная	$\varepsilon_1\,\delta_{ij}+\varepsilon_2\,\mathbf{u}_i\,\mathbf{u}_j$	$\mu_1\,\delta_{ij}+\mu_2\,\mathbf{u}_i\,\mathbf{u}_j$	$\alpha_1\,\delta_{ij}+\alpha_2\,\mathbf{u}_i\,\mathbf{u}_j$	$\beta_1\,\delta_{ij}+\beta_2\,\mathbf{u}_i\,\mathbf{u}_j$
двухосная	$\varepsilon_1\,\delta_{ij}+\varepsilon_2\,\mathbf{u}_i\,\mathbf{u}_j+\varepsilon_3\,\boldsymbol{\nu}_i\,\boldsymbol{\nu}_j$	$\mu_1\,\delta_{ij}+\mu_2\,u_i\,u_j+\mu_3\,\boldsymbol{\nu}_i\,\boldsymbol{\nu}_j$	0	0
двухосная бианизотропная	$\varepsilon_1\,\delta_{ij}+\varepsilon_2\,\mathbf{u}_i\,\mathbf{u}_j+\varepsilon_3\,\boldsymbol{\nu}_i\,\boldsymbol{\nu}_j$	$\mu_1\,\delta_{ij}+\mu_2\,\mathbf{u}_i\,\mathbf{u}_j+\mu_3\,\boldsymbol{\nu}_i\,\nu_j$	$\alpha_1\,\delta_{ij}+\alpha_2\,\mathbf{u}_i\,\mathbf{u}_j+\alpha_3\,\boldsymbol{\nu}_i\,\boldsymbol{\nu}_j$	$\beta_1\,\delta_{ij}+\beta_2\,\mathbf{u}_i\,\mathbf{u}_j+\beta_3\,\boldsymbol{\nu}_i\,\boldsymbol{\nu}_j$
непоглощающая	$\varepsilon_{ij}=\varepsilon_{ji}^{*}$	$\mu_{ij}=\mu_{ji}^{*}$	α_{ij}	α_{ji}^{*}
взаимная	$\varepsilon_{ij}=\varepsilon_{ji}$	$\mu_{ij}=\mu_{ji}$	α_{ij}	$-\alpha_{ji}$

В квазистационарной области становится возможным появление квазирезонансных явлений (осцилляций) и нарушается принцип взаимности [21]. Поэтому целесообразно использование в основном параметров геосреды, усредненных на мезоуровне. Для этого используется усреднение уравнений Максвелла по физически бесконечно малому объему и промежутку времени, что сглаживает влияние на него хаотического теплового движения заряжённых частиц среды. Однако теперь уравнения Максвелла необходимо дополнить так называемыми материальными уравнениями, учитывающими поведение вещества в электромагнитном поле и устанавливающими связь между векторами поля [2]. Сам объем породы представлен матрицей с капиллярами бесконечной длины (закрытая пористость). Такую модель породы можно описать с помощью бианизотропных сред, где за основу берется множество капилляров сложной конфигурации в виде Ω-элемента (рис. 2).



а) б) в)

Рис. 2. (а) Произвольный объем трещиноватой породы. (б) Увеличенная часть эффективной среды. (в) Идеализированная модель сети капилляров сложной конфигурации с Ω-элементом.

Следующим этапом является определение эффективных параметров для упругих свойств среды. Эффективные бианизотропные параметры ξ и ζ необходимы для адекватного описания электромагнитного поведения породы со сложной системой проводящих каналов [2, 3]. Физический смысл параметров связан с генерацией электрических токов индуцированной электродвижущей силой (параметр ξ) и появлением магнитных диполей (параметр ζ) при наличии замкнутых проводников в среде. В капиллярной системе с извилистыми каналами могут появляться дополнительные токи, вызываемые индукционными связями между элементами системы и

дополнительные возбудители (вихри) магнитного поля в виде суммы трех составляющих: прямолинейного тока $\mathbf{J}^1$ и двух замкнутых токов, например, основное поле и добавочное, обусловленное анизотропией разреза. Такие замкнутые токи возникают, если есть сложная геометрия капиллярной системы, которая делится на более простые элементы. Определив их, уравнения Максвелла приобретают замкнутую форму и появляется возможность решения прямых задач - нахождения полей **E**, **H** по заданным стороннему току и параметрам среды. Как следствие эффективные электромагнитные параметры есть эффект системы наблюдения. В работах [4, 5] были показаны условия динамического равновесия и попытка увязывания между собой вариаций упругих и электромагнитных параметров.

В дальнейшем мы переходим от рассмотрения квазигармонических полей в методе магнитотеллурического зондирования (МТЗ) к понятию импульсных полей (путем прореживания наблюденного поля). Дело в том, что сигналы от источников акустической эмиссии и электромагнитного излучения представляют собой импульсы с широким спектром частот, испускаемые раскрывающимися трещинами при необратимых деформациях горной породы. Они содержат заряды, которые формируют кажущееся движение, и как следствие ток [7]. Для таких целей электромагнитного мониторинга используется МТЗ с крестообразной расстановкой комплекса Phoenix MTU-5. В работе [17] предложена и апробирована система наблюдений (не в качестве профилирования, а единичного пункта длительного, от 3 суток и более, мониторинга). В работе [6] представлена схема обработки данных. Следующим этапом развития таких наблюдений представляется возможным расширение системы наблюдений до совокупности нескольких мониторинговых пунктов (как минимум из 3 комплектов MTU-5), при этом их следует расположить их на разных крыльях разлома вдоль линии простирания (рис. 3).

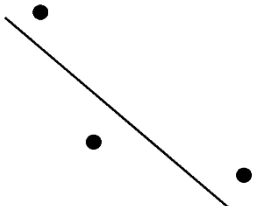


Рис. 3. Схематичное изображение системы наблюдений для мониторинга современных геодинамических процессов по простиранию разлома.

Выводы

Для проведения интерпретации данных МТЗ в качестве результатов электромагнитного мониторинга с изучением геоэлектрических неоднородностей (разрывов, разломов, трещин) среду можно аппроксимировать бианизотропной, для получения новых количественных оценок параметров геоэлектрического разреза. Установление связи между макро- и микропараметрами электропроводности позволяет проводить математическое моделирование различных геодинамических процессов: образование трещин, изменение локальной электропроводности и т.п. Цель установления такой связи позволяет выяснить, как меняется макроскопическое сопротивление под воздействием тех или иных деформаций горной породы. Следующим этапом развития может стать переход к системному анализу современных геодинамических процессов по нескольким синхронным геофизическим данным.

Благодарности

Авторы хотят почтить память д.ф.-м.н. Павла Павловича Фирстова, который поддержал развитие данного исследования. Исследование ведется при поддержке научного РФФИ № 20-05-00475 и для реализации государственного задания НС РАН АААА-А19-119020190063-2, АААА-А19-119020190064-9.

Список литературы

1. *Александров П.Н.* Объемные интегральные уравнения для бианизотропных сред // Геофизика. 2013. С. 54–62.

2. *Александров П.Н.* Развитие теории геоэлектрики в анизотропных и бианизотропных средах. Автореф. докт. дис. М., 1998. 38 с.

3. *Александров П.Н.* Эффективные электромагнитные параметры капиллярной системы электропроводности горной породы // Физика Земли. 2000. № 2. С. 87–94.

4. *Александров П.Н., Непеина К.С., Баталева Е.А.* Макроанизотропные параметры микронеоднородной горной породы // Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность

платформенных территорий и сопредельных регионов: материалы XXII Всероссийской с международным участием научно-практической Щукинской конференции. Воронеж: ВГУ, 2020. С. 36–40.

5. *Александров П.Н., Непеина К.С., Баталева Е.А.* Макроанизотропные электромагнитные параметры микронеоднородной горной породы // Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов: материалы XXII Всероссийской с международным участием научно-практической Щукинской конференции. Воронеж: ВГУ, 2020. С. 28–35.

6. *Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Рыбин А.К.* Изучение необратимых деформаций в литосфере Тянь-Шаня по магнитотеллурическим данным (методологический аспект) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 2 (42). С. 42–56.

7. *Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Рыбин А.К., Александров П.Н., Матюков В.Е., Непеина К.С., Забинякова О.Б., Казначеев П.А.* Теоретические обоснования исследований деформационных процессов в литосфере Земли на основе сейсмических и электромагнитных полей эндогенного происхождения // Математическое моделирование процессов и систем: Колл. моногр. Ч. I / отв. ред. С.А. Мустафина. Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ, 2018. С. 95–122.

8. *Баталева Е.А., Мухамадеева В.А.* Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. № 2. С. 461–487.

9. *Бережной В.А., Курдюмов В.Н.* Лекции по высокочастотной электродинамике. М., 2013. 405 с.

10. *Гаврилов В.А.* Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы. Автореф. канд. дис. Петропавловск-Камчатский, 2017. 50 с.

11. *Иванов О.В.* Распространение электромагнитных волн в анизотропных и бианизотропных слоистых структурах. Ульяновск: УлГТУ, 2010. 262 с.

12. *Матюков В.Е., Баталева Е.А., Непеина К.С.* О новых возможностях в изучении необратимых деформаций литосферы Тянь-Шаня // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2019. Т. 6. № 1. С. 189–196.

13. *Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И.* О глубинном строении Южной Камчатки по геофизическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Том 9. № 4. С. 1147–1161.

14. *Муратов П.В., Руленко О.П., Марапулец Ю.В., Солодчук А.А.* Электрический и акустический отклик приповерхностных осадочных пород на прохождение сейсмических волн от землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2018. № 5(25). С. 62–73.

15. *Нагуслаева И.Б., Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., Дембелов М.Г.* Электромагнитное поле земной волны над узкими тектоническими разломами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1. С. 185–188.

16. *Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е.* Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // Геофизика. 2015. № 1. С. 31–40.

17. *Непеина К.С.* Сейсмоэлектромагнитный мониторинг современных геодинамических процессов литосферы Северного Тянь-Шаня. Автореф. канд. дис. М., 2021. 25 с.

18. *Орехова Д.А.* Исследование структур литосферы в высоких широтах по данным естественных и мощных искусственных источников электромагнитного поля. Дис. канд. н. М., 2015. 129 с.

19. *Рыбин А.К.* Глубинная структура и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурического зондирования. М.: Научная мысль, 2011. 272 с.

20. *Самойлова О.М.* Глубинная электропроводность прибрежных районов восточной Камчатки. Дис. канд. н. - Петропавловск-Камчатский, 2018. 107 с.

21. *Светов Б.С., Губатенко В.П.* О скаляризации уравнений Максвелла в неоднородных средах // Известия АН СССР // Физика Земли. 1982. № 11. С. 63–71.

22. Строение литосферы российской части Баренц-региона / Под ред. *Н. В. Шарова*, *Ф.П. Митрофанова*, *М.Л. Вербы*, *К. Гиллена*. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 318 с.

23. *Токтосопиев А.М.* Электромагнитные предвестники землетрясений. Учеб. пособие. Каракол: 2007. 312 с.

24. *Трапезников Ю.А., Андреева Е.В., Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Волыхин А.М., Голубцова Н.С., Рыбин А.К.* Магнитотеллурическое зондирование в горах Киргизского Тянь-Шаня // Физика Земли. 1997. № 1. С. 3–20.

25. *Уваров В.Н., Ларионов И.А., Малкин Е.И.* Электромагнитные проявления активной земной коры // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 5(25). С. 115–129.

26. *Уткин В.И., Юрков А.К.* Радон – индикатор геодинамических процессов // Уральский геофизический вестник. 2007. № 4(13). С. 74–85.

27. *Череватова М.В.* Электропроводность литосферы восточной части Фенноскандинавского щита по результатам двумерного анализа магнитотеллурических данных. Дис. канд. н. Санкт-Петербург, 2010. 118 с.

28. *Martı A.* The role of electrical anisotropy in magnetotelluric responses: from modelling and dimensionality analysis to inversion and interpretation // Surv Geophys. 2014. 35. P. 179–218.

29. *Sevostianov, I., Kachanov, M.* Explicit cross-property correlations for anisotropic two-phase composite materials // J. Mech. Phys. Solids. 2002. V. 50. P. 253–282.

УДК 550.34

ПОЛЕ ПОГЛОЩЕНИЯ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЙОНАХ И СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

Аптикаева О.И.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, aptikaevaoi@mail.ru

Введение

Сейсмический мониторинг в сейсмоактивных районах предназначен, прежде всего, для оценки текущего сейсмического режима территории и отдельных её зон, а также выявления (или уточнения) связи очагов землетрясений с геодинамическими зонами. В случаях, когда наблюдения продолжаются длительное время, или в период возросшей сейсмической активности (например, в эпицентральных зонах), когда регистрируется большое число событий с продолжительной кодой, для выявления здесь вариаций поля поглощения может привлекаться метод короткопериодной коды.

Методика построения трехмерной структуры поля поглощения поперечных волн по короткопериодной коде в сейсмоактивных районах [1, 2] опробована на данных более чем 40-летнего сейсмического мониторинга на Гармском прогностическом полигоне в Таджикистане и использована на Алтае, Кавказе, в Восточной Анатолии, а также в эпицентральных областях ряда сильнейших землетрясений. В данной работе представлены результаты таких исследований в нефтегазоносном Ферганском бассейне.

Методика

В основе работ по изучению пространственно-временных неоднородностей поля поглощения в сейсмически активных районах лежат экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что определяющее влияние на формирование сейсмического волнового поля оказывает структура поля поглощения и, что кода местных землетрясений, в основном, сформирована отраженными от многочисленных слабых субгоризонтальных границ в земной коре и верхней мантии S-волнами [1]. Согласно этой модели, на достаточно больших временах кода-волны сравнительно круто пересекают низы коры и верхи мантии и несут информацию о строении среды в области между эпицентром и станцией. Существование в этой области зон повышенного или пониженного поглощения S-волн отражается на характеристиках коды, приводя соответственно к заметному усилению или ослаблению ее затухания. Огибающие коды состоят из участков большего или меньшего наклона, которые могут быть описаны выражением, имеющем вид: $A(t) \sim \exp\left(-\frac{\pi t}{Q_S T}\right) \Big/ t$, где $A(t)$ – амплитуда коды в окрестностях времени t; Q_S – эффективная добротность; T – период колебаний.

По имеющемуся набору огибающих коды для многих гипоцентров землетрясений можно построить трехмерную структуру поля поглощения в коре и верхней мантии. Для этого, в предположении, что кода формируется однократно отраженными волнами, нужно найти положение в пространстве кровли и подошвы слоев сильного и слабого поглощения, и оценить эффективную добротность в этих слоях [1]. При картировании полученные по коде характеристики поля поглощения приписываются области эпицентров.

На огибающих коды землетрясений Гармского района на временах менее 100 с в первом приближении были выделены две крупные морфологические детали - пологий участок в ее начальной части, соответствующий области слабого поглощения в верхней части литосферы и крутой участок, соответствующий расположенному ниже слою сильного поглощения.

Значения добротности, соответствующие каждому из слоев, и глубина кровли слоя сильного поглощения ($h_к$) использовались при построении трехмерной структуры поля поглощения.

Пространственные неоднородности поля поглощения Гармского района, представленные в виде карт глубины кровли слоя сильного поглощения $h_к$, приведены на рис. 1*а*, *б*. Области, характеризующиеся минимальной мощностью литосферы ($h_к$~20-30 км) хорошо совпадают с областями, где значения эффективной добротности на частоте 1 Гц минимальны (Q_S~80–90). Они формируют сеть вертикальных линейных каналов (ослабленных зон), разделяющих изометричные в плане зоны слабого поглощения (блоки). Блоками считались объекты, в пределах которых мощность литосферы составляла более 45 км, в пределах же ослабленных зон она была менее 30-35 км (рис. 1*а*).

Блоковую структуру литосферы Гармского района (блоки большой мощности на севере, горизонтальные размеры которых составляют десятки километров, и маломощные блоки с размерами в несколько километров на юге) можно представить, как систему, которая образует дискретный иерархический ряд с определенными модами преимущественных размеров, при этом блоки разного порядка характеризуются закономерно изменяющимися мощностями.

Трехмерная структура поля поглощения, лежащая в основе представлений о расположении блоков и ослабленных зон, была построена по огибающим коды землетрясений, которые произошли в 1973–1989 гг. В течение этого периода блоковая структура района могла меняться. Одной из причин вариаций блоковой структуры, по мнению автора, является изменение скорости вращения Земли от минимальных ее значений в 1973 г. до максимальных - в 1989 г.

Это означает, что приведенная на рис. 1*а* карта отражает не только пространственные, но в какой-то степени и временные вариации структуры поля поглощения. Прежде всего, это относится к показанным на ней ослабленным зонам. Есть основания полагать, что вариации добротности в таких зонах отражают процессы образования и разрушения межблоковых перемычек. На одних временных отрезках они способствуют консолидации блоков в единый конгломерат, на других – в результате их разрушения конгломерат блоков распадается на отдельные блоки. По-видимому, в пределах Гармского района существуют «долгоживущие» ослабленные зоны, которые большую часть своей «жизни» «функционируют» как таковые, и «короткоживущие», которые возникают, время от времени, в результате нарушения целостности блоков или конгломератов блоков.

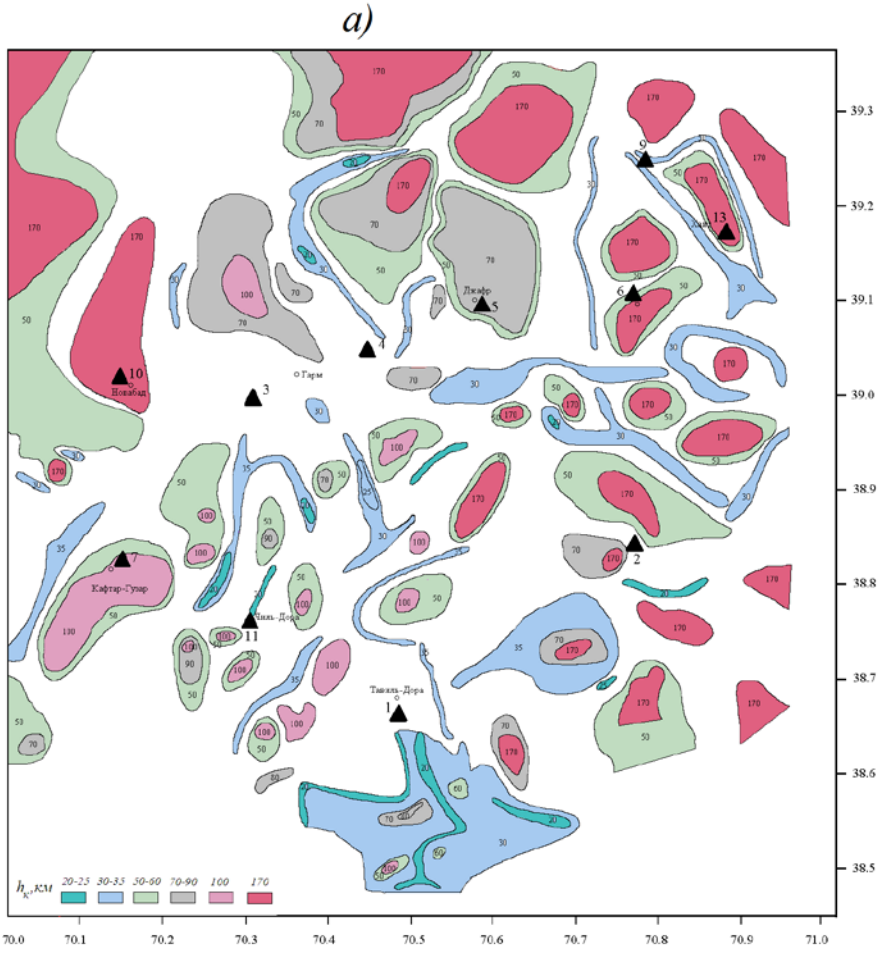


Рис. 1*а*. Блоковая структура Гармского района. Цветом показаны градации глубины $h_к$; треугольниками – сейсмические станции.

Одним из наиболее интересных геодинамических объектов Гармского района является конгломерат блоков Каудальской зоны (рис. 1*б*). С севера Каудальская зона граничит с обширной субширотной (примерно по 39.0° с.ш.) ослабленной зоной. Такая же зона расположена на юго-запад от нее, примерно по линии, соединяющей станции № 1 и №3. При относительно высоких среднегодовых значениях скорости вращения Земли Каудальская зона работает как единый блок, при этом землетрясения с M≤5.0 M<6.0, например, землетрясения №1, №2, №11, №36, №41 возникают на ее границах (на рис. 1*б* эти землетрясения помечены желтым цветом). В эту схему укладывается и самое последнее землетрясение №42 с магнитудой около 6.0, которое произошло в июле 2021 г. Интересно, что интервал между моментами возникновения землетрясений №2 и №36, локализованных в одном и том же месте, составляет 70 лет, что соответствует одному из периодов вариаций скорости вращения Земли.

Начиная с середины 50-х годов прошлого века, когда наметилась тенденция к уменьшению скорости вращения Земли (врезка на рис. 1*б*), активизировалась ослабленная зона на юго-запад от Каудальской (землетрясения с № 20 по № 25). За ней последовала активизация Каудальской зоны. За десять лет здесь произошло шесть землетрясений с M>5.0. Последовательности из трех сильных

землетрясений (№ 26, 27, 28) в период с 1966 по 1969 гг. и землетрясений (№ 30, 31) в 1976-1977 гг. имели место при низких значениях скорости вращения Земли. Землетрясение № 33 в 1983 г. произошло уже на фоне роста скорости вращения Земли, но связано с ее глубокой продолжительной отрицательной сезонной аномалией.

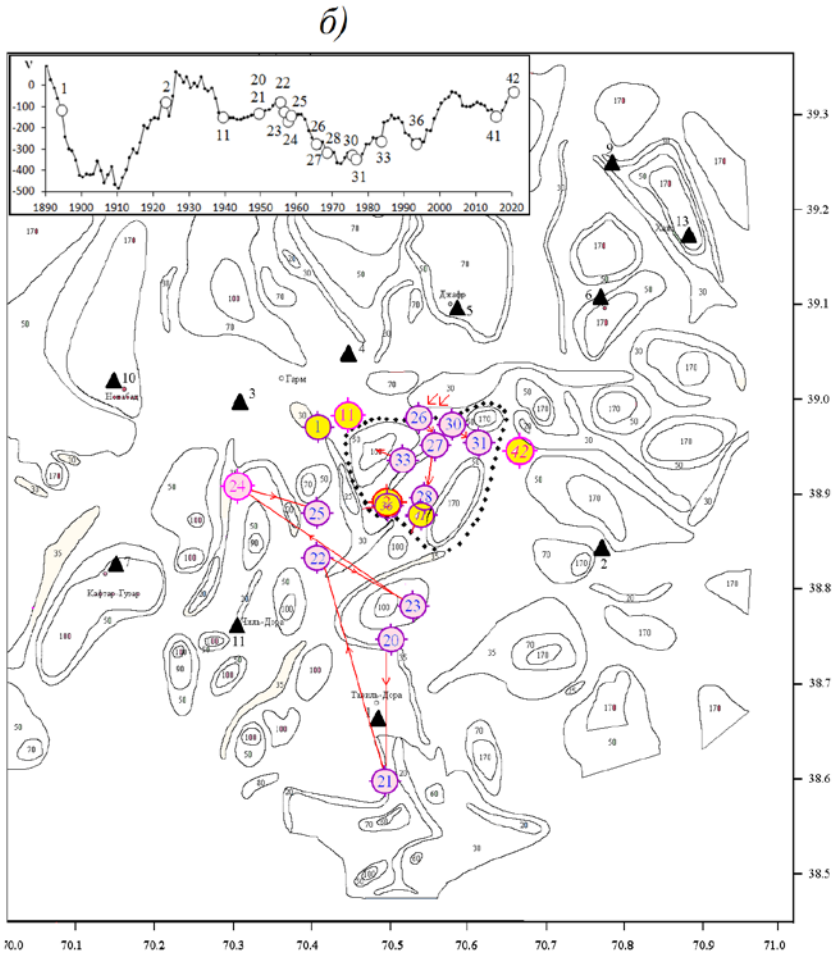


Рис. 1*б*. Землетрясения Каудальской зоны с M>5.0. На врезке - среднегодовые вариации скорости вращения Земли. Цифры - номера землетрясений, которые произошли соответственно: 13.11.1895(1), 16.9.1924(2), 30.5.1939(11), 17.11.1950(20), 21.11.1950(21), 11.4.1956(22), 13.1.1957(23), 7.1.1958(24), 31.7.1959(25), 11.4.1966(26), 14.4.1966(27), 22.3.1969(28), 9.6.1975(29), 3.9.1976(30), 25.12.1977(31), 17.11.1978(32), 26.2.1983(33), 10.06.1994(36), 01.07.2016(41), 10.07.2021(42).

Примечательно, что наиболее сильные землетрясения (M<6.5) Ферганского бассейна, который будет рассмотрен ниже, также происходят на минимуме скорости вращения Земли. Такое соответствие имеет место даже в случае непродолжительных и малоамплитудных отрицательных аномалий скорости вращения Земли, таких как в 1822-1823 гг. и в 1992 г. [3].

Пространственные неоднородности поля поглощения Ферганского бассейна

Во второй половине прошлого века сейсмичность территории бывших Среднеазиатских республик активно изучалась силами КСЭ ИФЗ АН СССР. Ряд стационарных и передвижных пунктов наблюдений, размещенных в восточной части Ферганского бассейна, были оснащены в том числе и станциями ЧИСС [6]. В последние годы на Бишкекском геодинамическом полигоне развернуты наблюдения цифровыми сейсмическими станциями. Эти данные еще не настолько систематичны и представительны, как на Гармском полигоне, но предварительные результаты несомненно представляют интерес.

Для изучения характеристик поля поглощения Ферганского бассейна анализировалась кода более 50 местных землетрясений с магнитудами более 4.0 на частоте ~1 Гц (фильтр аналогичный каналу ЧИСС 1-1.6 Гц) по аналоговым записям станций ЧИСС (Суфи-Курган, Кальта, Ирису, Оотсай, Карасу, Кызыл-Уран) за 1960-1984 гг. и цифровым записям станциями сети KNET (ARK, ARLS, BTK, DRK, OHH, SALK, SFK, TRKS) за 2008-2021 гг. (положение станций см. на рис. 3*а*). Эпицентральные расстояния не превышали 100 км.

В связи с тем, что в работе использовались записи как аналоговых, так и цифровых станций необходимо было убедиться в том, что совместно обрабатываемый материал однороден.

Рис. 2*а* демонстрирует безусловное совпадение огибающих коды землетрясений, локализованных в одном месте, но записанных в разное время станцией ЧИСС Суфи-Курган (29.07.1982 г., t_0=12:37:36, φ=39.4, λ=73.6, K=12.8) и цифровой станцией SFK сети KNET (10.08.2010 г., t_0=09:34:11, φ=39.4, λ=73.6, M=4.2), t_0 – время в очаге.

Опыт предыдущих исследований показывает, что условия под станцией влияют в большей степени на уровень огибающих коды землетрясений. Форма же огибающих коды совокупности землетрясений, записанных одной станцией, во временном окне от 5 до 100 с варьирует в больших

пределах, чем форма огибающих коды одного и того же события, записанного разными станциями. Это наблюдение подтвердилось в процессе анализа рассматриваемого материала (рис. 2*б*).

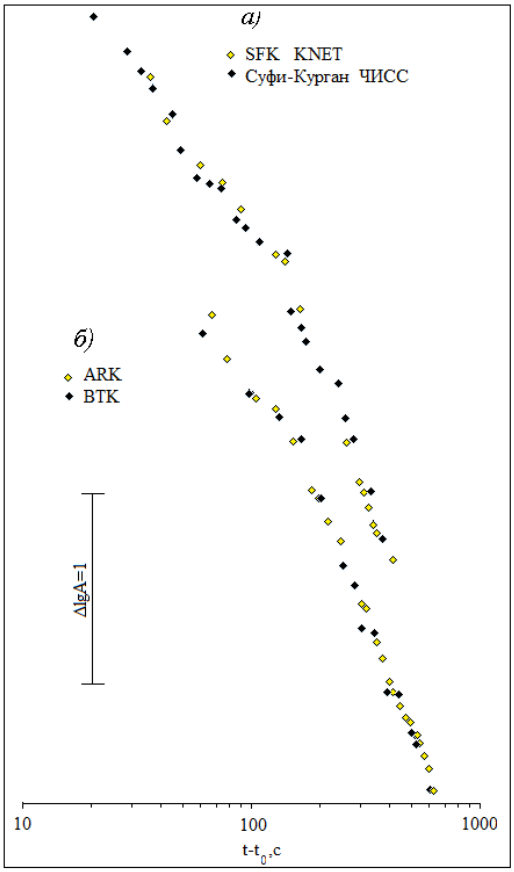


Рис. 2. Примеры огибающих коды землетрясений на частоте 1 Гц по записям станций Суфи-Курган (ЧИСС) и SFK (KNET) (а); огибающие коды землетрясения 29.07.2013, t_0=05:26:24, φ=40.86, λ=70.93, *M*=4.4 по записям станций ARK и BTK (эпицентральные расстояния соответственно 98 и 136 км) (б).

Таким образом, для оценки характеристик поля поглощения правомерно использовать огибающие коды землетрясений, записанных каждой из упомянутых станций.

Как видно из рис. 2, огибающие коды на временах $t-t_0$~100-120 с испытывают излом. На меньших временах они представляют собой чередование крутых и пологих участков разной продолжительности. Это в рамках выбранной нами модели означает чередование слоев сильного и слабого поглощения разной мощности на глубинах менее 200 км. Имеющихся в нашем распоряжении записей землетрясений оказалось недостаточно для детального изучения положения в пространстве каждого из них, поэтому в работе даны оценки эффективной добротности совокупности этих слоев (рис. 3*а*).

На территории Ферганского бассейна эпицентры рассмотренных в работе землетрясений с магнитудами *M*>4.0 расположены неравномерно. Очевиден дефицит таких событий в центре, там поглощение оценить не удалось. Сейсмическая активность на севере и юге Ферганского бассейна значительно выше, что позволило получить здесь детальное строение поля поглощения, которое оказалось неоднородным не только по латерали, но и по глубине. К аналогичным выводам пришли авторы работы [4], которые изучали скоростные неоднородности мантии в этом районе. Многочисленные профили, которые приводятся в работе [5], говорят о том, что в данном районе чередование отрицательных и положительных аномалий скоростного поля по глубине в моделях авторов отмечаются вплоть до глубин ~500 км.

Очаги наиболее сильных событий приурочены к областям максимального контраста поглощения, к границам добротных блоков и ослабленных зон (рис. 3*а*). По-видимому, относительно небольшие магнитуды наблюдаемых здесь главных толчков являются следствием вертикальной неоднородности блоков.

Аналогичные выводы о том, что Ферганская впадина до глубины 25 км имеет ярко выраженное слоисто-блоковое строение сделаны также на основе анализа плотностной модели, описанной в [7]. Проанализировав плотности горных пород в интервале отдельных толщ, цитируемый автор делает вывод, что северная часть Ферганской впадины характеризуется более высокими значениями плотностей по сравнению с южной. Примечательно в этой связи, что на глубинах менее 200 км и поглощение на севере Ферганского бассейна меньше, чем на юге (рис. 3*а*). Отметим, что положение разупрочненных зон [8] согласуется с выявленными в настоящем исследовании ослабленными зонами в поле поглощения (рис. 3*в*). К таким зонам приурочены эпицентры «заглубленных» землетрясений (рис. 3*б*) и разрывные нарушения. Эти зоны интерпретируются нами, как возможные каналы миграции флюидов, которые облегчают взаимные перемещения добротных блоков в процессе реализации землетрясений.

Отмечая корреляцию контрастных объектов поля поглощения Ферганского бассейна с объектами, контрастными по петрофизическим характеристикам в домезозойских толщах [8], сделаем осторожный вывод, что месторождения нефти и газа Ферганского бассейна ассоциируются с зонами сильного поглощения (рис. 3*г*), которые, вероятно, могут являться каналами миграции в том числе и углеводородов.

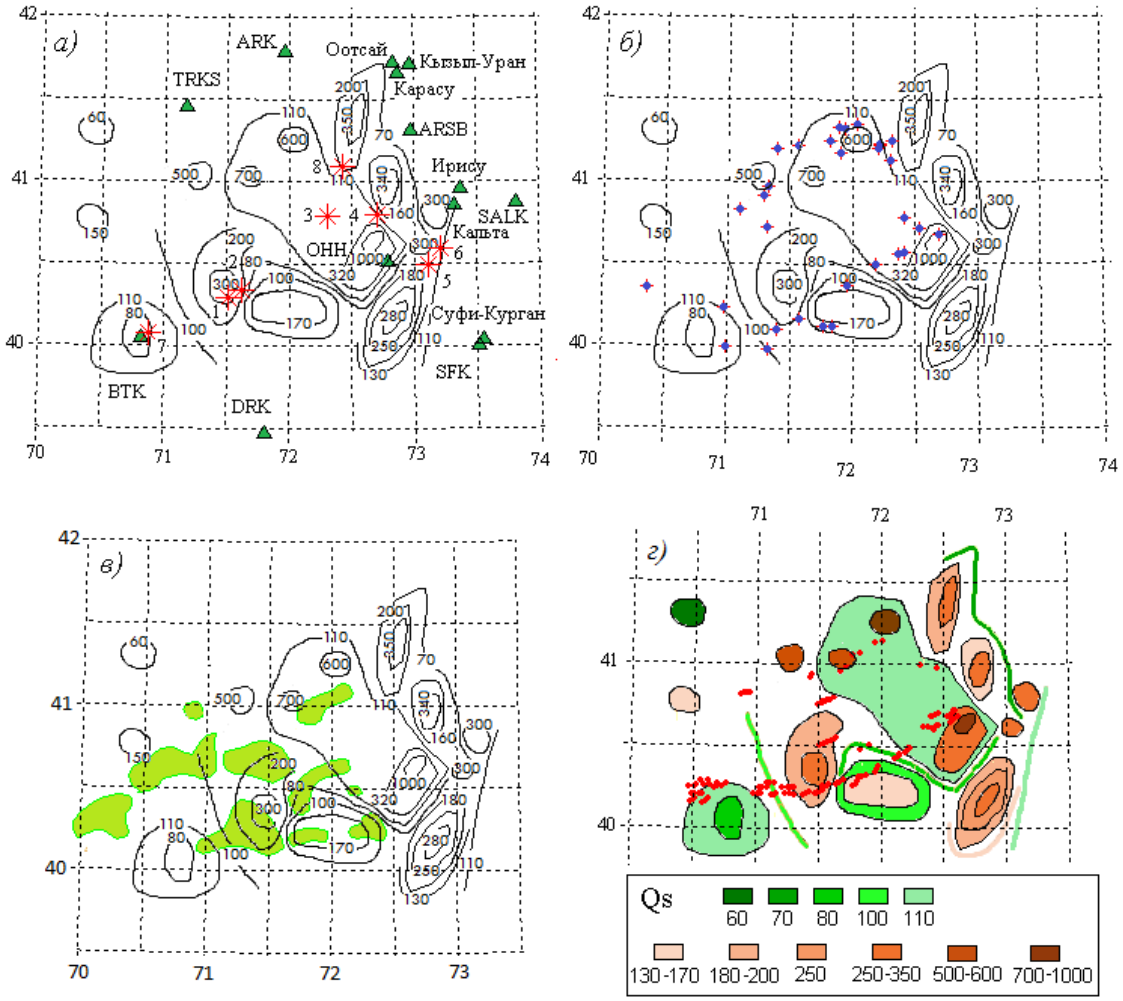


Рис. 3. Эффективная добротность Q_s Ферганского бассейна на частоте 1 Гц и глубинах менее 200 км: *а* – локализация землетрясений с *K*~15 (1-1822 г., 2-01.01.1823 г., 3-16.12.1902 г., 4-28.03.1903 г., 5-06.07.1924 г., 6-12.07.1924 г., 31.01.1977 г., 15.05.1992 г.) и сейсмостанций; *б* – распределение «заглубленной» (с глубиной очага H≥30 км) сейсмичности Ферганского бассейна; *в, г* – положение соответственно разупрочненных зон и месторождений нефти и газа по [8].

Список литературы

1. *Аптикаева О.И., Копничев Ю.Ф.* Тонкая структура литосферы и астеносферы Гармского района и ее связь с сейсмичностью // Докл. АН СССР. 1991. Т. 317. № 3. С. 326–330.

2. *Аптикаева О.И., Копничев Ю.Ф.* Детальное картирование литосферы и астеносферы Гармского района по поглощению поперечных волн // Вулканология и сейсмология. 1992. № 5-6. С. 101–118.

3. *Аптикаева, О.И.* Детальная структура поля поглощения в районе Западного Тянь-Шаня по методу короткопериодной коды // Вопр. Инж. Сейсмол. 2018. № 2. С. 31–42.

4. *Багманова Н.Х., Миркин Е.Л.* Особенности скоростного строения мантии и их роль в формировании очаговых зон сильных коровых землетрясений Тянь-Шаня // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2018. №1. С.12–17.

5. *Забелина И.В., Кулаков И.Ю., Буслов М.М.* Выявление глубинных механизмов горообразования Киргизского Тянь-Шаня по результатам сейсмической томографии // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 7. С. 906–92.

6. *Запольский К.К.* Частотно-избирательные станции ЧИСС // Экспериментальная сейсмология. Москва: Наука, 1971. С. 20–26.

7. *Mordvintsev D.O.* The density features of the Fergana basin // International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences. 2019. Vol. 9 (2). P. 19–21.

8. *Mordvintsev D.O.* Correlation between the oil and gas fields location and elements of a deep geological structure of the Fergana basin // International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences. 2019. Vol. 9 (2). P. 14–18.

УДК 550.34

ПОРОУПРУГАЯ РЕАКЦИЯ МАССИВА НА ТЕХНОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОРОБКОВСКОГО И ЛЕБЕДИНСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Батухтин И.В., Беседина А.Н., Горбунова Э.М.

Институт динамики геосфер имени. академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, ivanmagnet7@gmail.com

Введение

Исследование влияния промышленных взрывов на массив горных пород является крайне важным этапом в понимании процессов, происходящих в водонасыщенных коллекторах, обводненных зонах повышенной трещиноватости пород, и в перспективе - для контроля этапов разработки месторождений твёрдых полезных ископаемых. Для этого может быть полезен расчёт деформации водонасыщенного пласта с использованием известных моделей пороупругой реакции на основе комплексного мониторинга реакции системы «пласт-скважина» при проведении массовых взрывов на разных эпицентральных расстояниях от пунктов наблюдений.

Летом 2019 года настоящая исследовательская группа оборудовала несколько скважин высокоточными датчиками уровня (давления) Keller. Скважины расположены над зоной подземной разработки Коробковского железорудного месторождения и в нескольких километрах западнее Лебединского месторождения, разрабатываемого открытым способом. На приустьевых площадках также осуществляется регистрация сейсмических колебаний и атмосферного давления синхронно с прецизионным гидрогеологическим мониторингом. При проведении полевых измерений выделены основные гидрогеологические эффекты, зарегистрированные при динамическом деформировании водонасыщенного коллектора под действием квазистационарных факторов – влиянием атмосферного давления и земных приливов и периодических факторов – при проведении массовых взрывов в шахте и карьере. Основное внимание в данной работе уделено анализу реакции системы «пласт-скважины» на высокоинтенсивное техногенное воздействие, связанное с разработкой железорудных месторождений с использованием взрывных технологий.

Методика измерений

Измерения проводятся на территории АО «Комбинат КМАруда», где имеется сеть скважин для стационарных наблюдений за режимом подземных вод. Рассматриваемый коллектор порово-трещинного типа сложен железистыми кварцитами и кварцево-слюдистыми межрудными сланцами, неравномерно трещиноватыми, которые характеризуются различными физико-механическими и фильтрационными параметрами. Железистые кварциты различаются по степени окисления и относятся к породам средней прочности и прочным, реже – очень прочным, так как среднее значение предела прочности на сжатие изменяется от 48.2 до 76.2 МПа, в отдельных случаях составляет 127.5 МПа. Сланцы относятся к грунтам средней прочности, среднее значение прочности на сжатие не превышает 50 МПа. Железистые кварциты и сланцы слабопористые, среднее значение пористости изменяется от 2.5 до 5.3%. Водопроводимость кварцитов варьирует в широких пределах от 0.2 до 3 $м^2$/сут, сланцев - возрастает до 20 $м^2$/сут.

Разработка Коробковского месторождения в шахте АО «Комбинат КМАруда» выполняется этажно-камерным методом. При каждом массовом взрыве в шахте с интервалом 30–50 с подрывается 3–4 камеры, расположенные на расстоянии около 1–2 км друг от друга. При проведении массовых взрывов в карьере подрываются от 1 до 8 блоков. Продолжительность отклика при взрывах в шахте не превышает 1–3 с, при взрывах в карьере - увеличивается до 5–7 с. В рамках данной работы каждый взрыв в массовом взрыве рассматривается и анализируется отдельно.

В состав аппаратурно-измерительного комплекса входят датчики уровня воды Keller PR-36XW, датчик атмосферного давления Keller PAA-33X, сейсмометры СПВ-3К и 6-ти канальные регистраторы REFTEK-130 и Centaur CTR4-6S. Частота опроса составляет 200 Гц. Более подробное описание измерительного комплекса приведено в [1, 2]. С ноября 2020 г. проводится синхронный мониторинг уровня воды в двух скважинах, вскрывающих напорный архей-протерозойский водоносный горизонт в сланцах (измерительный пункт 1) в интервале 68.1-90.1 м и в кварцитах (измерительный пункт 2) в интервале 109.8-140.9 м. Датчики уровня установлены в наблюдательных

скважинах на глубине 44.6 и 86.4 м (на 3 м ниже уровня воды) соответственно. Измерительные пункты удалены друг от друга на расстояние ~1.6 км.

За период наблюдений с ноября 2020 г по настоящее время сформирована база данных гидрогеологических откликов, соответствующих реакции системы «пласт-скважина» на прохождение сейсмических волн от массовых взрывов, производимых в шахте им. Губкина и Лебединском карьере. Комплексный анализ гидрогеологических откликов водоносного горизонта и сейсмических данных при прохождении волн от массовых взрывов проводился с учетом приведенного расстояния (соотношение между эпицентральным расстоянием и количеством взрывчатого вещества в ступени замедления). Обработка данных включала анализ амплитуд и периодов зарегистрированных откликов, исследование спектральных характеристик, чувствительности системы «пласт-скважина». Влияние вариаций атмосферного давления на коротком временном интервале на уровень подземных вод отсутствует или находится в пределах точности определения и не учитывается.

Обсуждение результатов

Проведенный анализ гидрогеологических и сейсмических данных, полученных при разработке железорудных месторождений подземным и открытым способами свидетельствует о различии в реакции водонасыщенных коллекторов, представленных сланцами в пункте наблюдений 1 и кварцитами в пункте 2, на сейсмическое воздействие. Волновые формы откликов уровня воды в скважинах в пункте 1 и 2 различаются и отличаются по внешнему виду от зарегистрированных сейсмических сигналов (рис. 1).

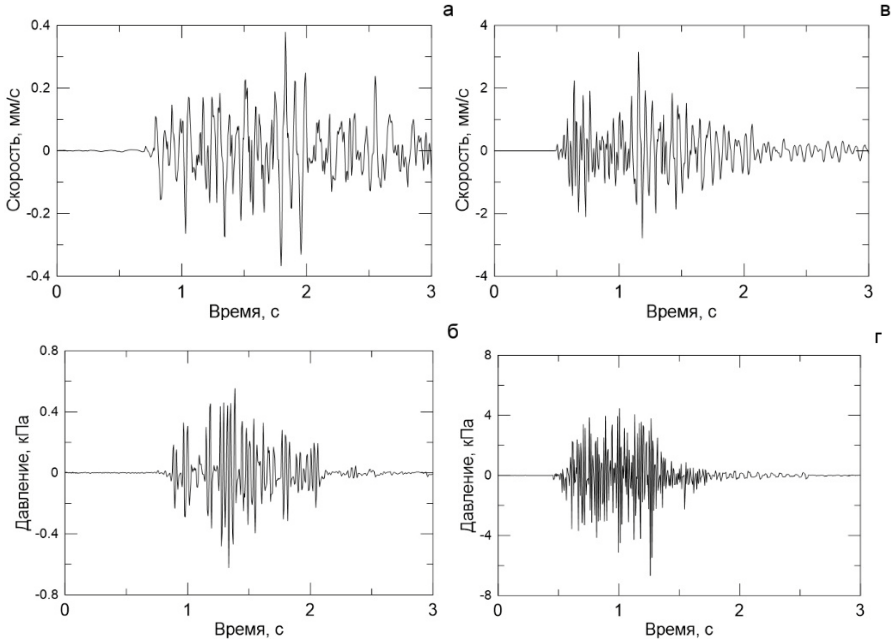


Рис. 1. Сейсмограммы по Z-компоненте (а, в) и диаграммы вариаций давления в системе «пласт-скважина» (б, г) в пунктах наблюдений I (а, б) и II (в, г) при одновременном подрыве двух камер 19.12.2020 г.

Спектральный анализ позволил выделить основные частоты, на которых проявляются отклики. Зарегистрированные сейсмические сигналы выделяются в частотном диапазоне 10-60 Гц (рис. 2). Гидрогеологический отклик в пункте 1 устойчиво проявляется в диапазоне частот 20-50 Гц. Для пункта наблюдений 2 отклик уровня воды отмечен в более широком диапазоне частот от 20 до 90 Гц. Различный частотный состав зарегистрированных откликов свидетельствует о существенном влиянии локальных особенностей расположения измерительных пунктов 1 и 2.

Чувствительность системы «пласт-скважина» для пункта 1 (рис. 3а) имеет выраженные максимумы в диапазоне 25-35 Гц, 45-55 Гц, 65-80 Гц и 80-90 Гц для всех компонент сейсмометра. Максимальные значения чувствительности отмечаются по вертикальной компоненте в диапазоне частот 84–86 Гц. Для амплитудно-частотной характеристики системы «пласт-скважина» для пункта 2 (рис. 3б) отмечается увеличение чувствительности по горизонтальным компонентам в диапазоне частот 60-100 Гц, а для вертикальной компоненты на частотах 40-100 Гц с максимумом на частоте 70 Гц. Максимальные значения чувствительности достигаются по горизонтальной N-компоненте на частотах 90-95 Гц. Чувствительность двух рассматриваемых систем «пласт-скважина» зависит не только от технических характеристик, но и может быть обусловлена различием в геологическом

строении. В пункте наблюдений 2 мощность осадочного чехла, залегающего над разрабатываемым массивом, достигает 106.1 м, в пункте 1 – не превышает 65.1 м.

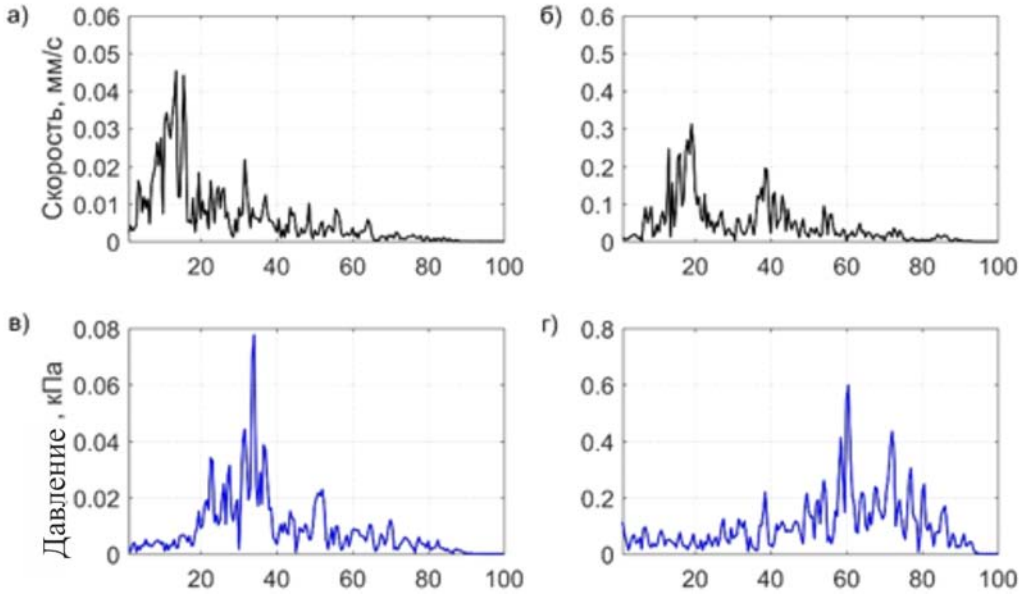


Рис. 2. Амплитудные спектры сейсмограмм (а, б), вариаций давления в системе «пласт-скважина» (в, г) в пунктах наблюдений I (а, в) и II (б, г) при одновременном подрыве двух камер 19.12.2020 г.

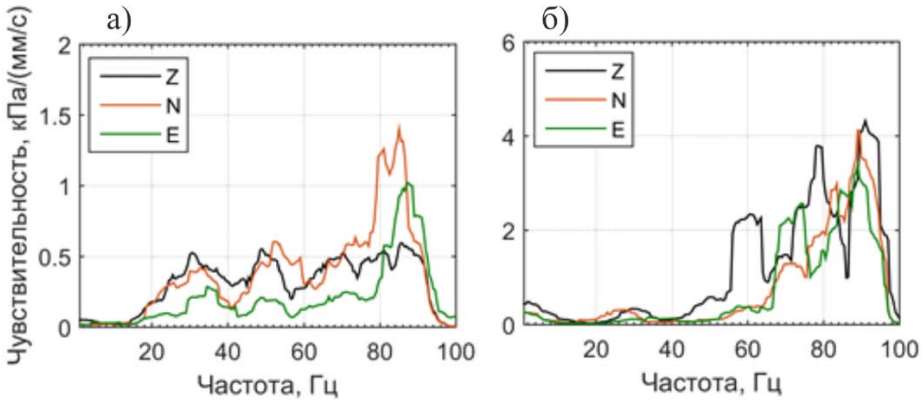


Рис. 3 Аппроксимированная чувствительность системы «пласт-скважина» в пунктах наблюдений 1 (а) и 2 (б) при одновременном подрыве двух камер 19.12.2020 г.

В пределах разрабатываемого шахтного поля рабочие камеры по-разному расположены относительно пунктов наблюдений, но могут быть сгруппированы по блокам, которые условно обозначены от восточного до западного (рис. 4). Наиболее устойчивая степенная зависимость между максимальной скоростью смещения грунта, приведенным расстоянием и реакцией напорного архей-протерозойского водоносного горизонта отмечается при проведении взрывов в восточном блоке, который представлен преимущественно целиком с единичными горными выработками (рис. 4-1). Напротив, для северо-западного блока подобная зависимость не выражена, что, вероятно, обусловлено горно-технологическими условиями, так как отработанное пространство между действующими камерами, расположенными в пределах этого блока и пунктом наблюдений 1 заполнено пастообразной смесью технических отходов.

В напорном архей-протерозойском водоносном горизонте зарегистрированы гидрогеологические отклики на все взрывы, произведенные в шахте, с амплитудами давления от 40 Па до 7.3 кПа в пункте наблюдений 1 (до 13 кПа в пункте наблюдений 2) на приведенных расстояниях от 404 до 68 м/кг$^{1/3}$ (60 м/кг$^{1/3}$ соответственно) (рис. 4-1). Реакция водонасыщенного коллектора трещинно-пластового типа в пункте наблюдений 1 на взрывы в карьере регистрируется при больших значениях максимальной скорости смещения грунта от 1.2 до 14.4 мм/с при сохранение степенной зависимости (рис. 4-2). При проведении взрывов в разных камерах Коробковского месторождения и блоках Лебединского карьера амплитуды вариаций давления в системе «пласт-скважина» изменяются от 20 Па до 10 кПа при максимальной скорости смещения грунта от 0.3 до

12 мм/с. При открытой разработке Лебединского железорудного месторождения прослежено более интенсивное динамическое воздействие на водонасыщенный коллектор надрудного комплекса по сравнению с результатами комплексных измерений, полученных в процессе подземной разработки Коробковского месторождения.

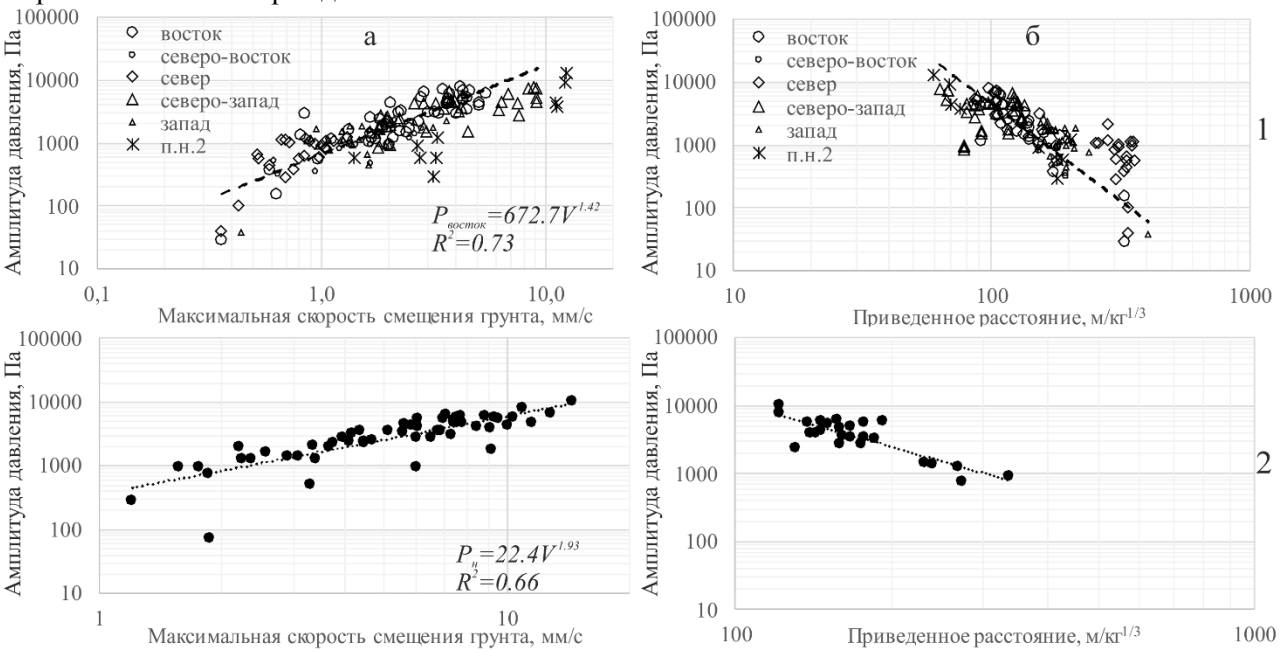


Рис. 3. Зависимость изменения давления воды в системе «пласт-скважина» от массовой скорости смещения грунта (а) и приведенного расстояния (б) в нижнем напорном горизонте при взрывах в шахте (1) и карьере (2) по пункту I, данные по регистрации в пункте II обозначены крестиками.

Заключение

За два года комплексных измерений на территории АО «Комбинат КМАруда» сформирован банк синхронизированных экспериментальных данных (сейсмических, барометрических, гидрогеологических), зарегистрированных при массовых взрывах в процессе работы горнодобывающих предприятий. Проведена систематизация полученных рядов с учетом основных параметров взрывов в камерах и блоках. Определены амплитуды вариаций давления в системе «пласт-скважина» и скорости смещения грунта при взрывах. Выполнен анализ амплитудно-частотных характеристик системы «пласт-скважина». Прослежены зависимости между интенсивностью сейсмического воздействия на водонасыщенный коллектор, приведенным расстоянием и расположением разрабатываемых залежей. Отмеченные закономерности могут быть использованы при оценке пороупругой деформации водонасыщенных коллекторов, залегающих в кровле железорудных месторождений, эксплуатируемых с использованием взрывных технологий, и разработке модели реакции системы «пласт-скважина» при техногенном воздействии.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А17-117112350020-9) и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00809.

Список литературы

1. *Батухтин И.В., Беседина А.Н., Горбунова Э.М., Петухова С.М.* Реакция водонасыщенных коллекторов на проведение массовых взрывов // Сборник ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2020. С. 36–45. DOI: 10.26006/IDG.2020.77.82.005.

2. *Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Батухтин И.В., Петухова С.М.* Прецизионный гидрогеологический мониторинг в техногенно-нарушенных условиях: организация, проведение и обработка экспериментальных данных // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57. № 2. С.62–80. DOI: 10.21455/si2021.2-4.

УДК 50.834:550.838.2:551.214.6(571.645)

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОДВОДНЫХ ВУЛКАНОВ КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

Блох Ю.И.[1], Бондаренко В.И.[2], Долгаль А.С.[3], Новикова П.Н.[3], Петрова В.В.[4], Пилипенко О.В[5]., Рашидов В.А.[6], Трусов А.А.[7]

[1] г.Москва, yuri_blokh@mail.ru
[2]Костромской государственный университет, г. Кострома,
[3]Горный институт УрО РАН, г. Пермь
[4]Геологический институт РАН, г. Москва
[5]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва
[6]Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
[7]АО "ГНПП Аэрогеофизика", г. Москва

Введение

Наблюдение за активностью подводных вулканов затруднено из-за незначительного количества ее видимых проявлений. В пределах Курильской островной дуги (КОД), являющейся важным элементом Тихоокеанской переходной зоны, постоянно происходят извержения наземных и подводных вулканов, землетрясения, цунами. Получение новой достоверной информации об этих явлениях имеет большое значение,как для фундаментальных исследований, так и для оперативного оповещения населения, морских и воздушных судов о возможных негативных последствиях, связанных с данными процессами.

Методы исследований

В период с 1981 по 1991 гг. в пределах КОД было выполнено 11 рейсов на научно-исследовательском судне «Вулканолог» [1], в которых проведены комплексные геолого-геофизические исследования распространенных здесь подводных вулканов. В комплекс исследований входили эхолотный промер, непрерывное сейсмоакустическое профилирование, модульная гидромагнитная съемка и драгирование. Геофизические исследования проводились по сети галсов, которая наращивалась при проведении последующих работ на изучаемых объектах, что обеспечивало геофизический мониторинг подводных вулканов, а увеличение количества станций драгирования, и, следовательно, объема опробованного материала, – геологический мониторинг. В настоящее время мониторинг подводных вулканов в пределах КОД происходит с помощью постоянной ревизии имеющихся оригинальных материалов и доступных литературных и фондовых источников [2].

Результаты исследований

В пределах КОД в настоящее время выделено 126 подводных вулканов и 6 подводных или частично затопленных кальдер и кратеров вулканов. В пределах КОД находится также 68 наземных вулканов, 36 из которых являются действующими.

С помощью апробированной эффективной технологии количественной интерпретации материалов гидромагнитной съемки в комплексе с эхолотным промером, непрерывным сейсмоакустическим профилированием, а также анализа петромагнитных свойств и химического состава драгированных горных пород в пределах КОД выделены подводные кальдеры, подводные и наземно-подводные вулканические массивы, изолированные подводные вулканы [4-7], образующие ряд линейно-вытянутых зон различного простирания (рис. 1).

Построены различные структурные и батиметрические карты, и также карты аномального магнитного поляΔTa (рис. 2). Изучены морфология, строение осадочного чехла, аномальное магнитное поле, геологическое строение, петрография, минералого-геохимический состав и эволюция подводных вулканов, установлена связь вулканизма с неотектоникой, геодинамикой и глубинным строением центральной и южной частей КОД, сделаны оценки возраста образования ряда вулканических построек, продолжительности и масштабов проявления подводной вулканической деятельности. Выявлены поля распространения газовых гидратов, участки проявления грязевого вулканизма и изучены взаимоотношения этих процессов с неотектоникой и вулканизмом. Выполнено

изучение обвально-оползневых процессов, которые могут явиться причиной возникновения цунами со стороны Охотского моря.

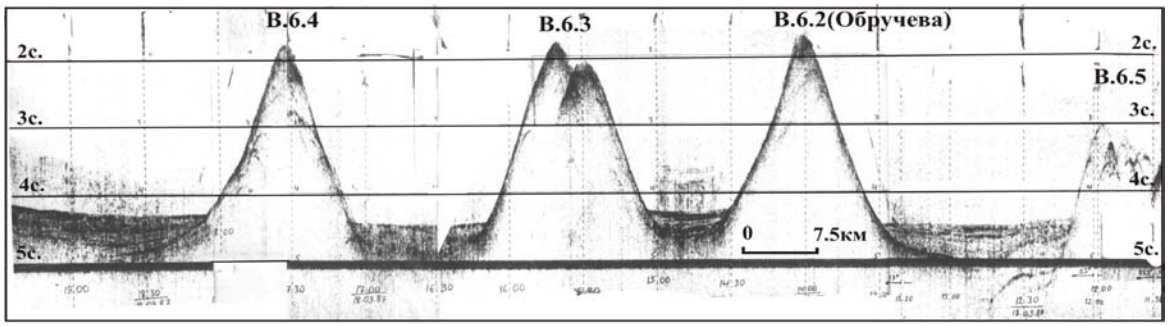


Рис. 1. Фрагмент профиля непрерывного сейсмоакустического профилирования, пересекающего подводные вулканы 6.4, 6.3, Обручева и 6.5, расположенные в Броутонской поперечной зоне подводных вулканов КОД.

В пределах КОД наиболее распространенными породами являются базальты нормального ряда, реже встречаются андезибазальты, дациандезиты и дациты. В пределах единых вулканических массивов могут наблюдаться потоки разного петрографического состава. Отмечена некоторая тенденция увеличения щелочности (особенно калиевой составляющей) пород в направлении южной части КОД. Естественная остаточная намагниченность горных пород, слагающих подводные вулканические постройки в пределах КОД, достигает 64.5 А/м.

Установлено, что к большинству вулканических построек приурочены локальные аномалии магнитного поляΔТа (рис. 3-5) интенсивностью до 1800 нТл, а мощность осадочного чехла, перекрывающего основания построек, достигает 600 м (рис. 1).

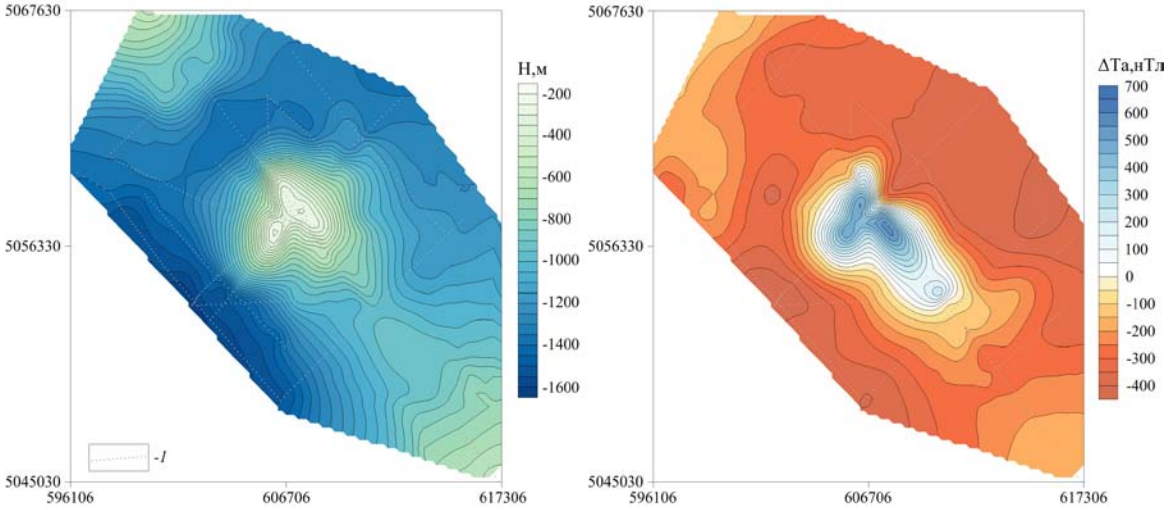


Рис. 2. Рельеф (слева) и аномальное магнитное поле ΔТа (справа) подводного вулкана 7.10: 1 – галсы.

В ряде вулканических построек установлены экструзии [6], подводящие каналы, периферические магматические очаги (рис. 4, 5) и отдельные лавовые потоки [4-6].

Сделан вывод о том, что постройки образовались во время геомагнитных инверсий [3-6].

Результаты моделирования подводного вулкана 7.10 (рис. 5) позволили предположить, что при терминальном извержении небольшие лавовые потоки изливались в север-северо-восточном и юго-западном направлениях, а основной лавовый поток излился в юго-восточном направлении и достиг основания вулканической постройки.

Установлена приуроченность основных особенностей функций, описывающих аномальное магнитное поле подводного вулкана 8.10, к верхней кромке вулканических пород и сделано предположение о наличии подводящих каналов север-северо-западного направления и периферических магматических очагов на глубинах 2.4 км и 3.6 км (рис. 3). Вектор эффективной намагниченности горных пород $\mathbf{J_{эф}}$ имеет склонение 52° и наклонение 26° и развернут относительно вектора нормального магнитного поля Земли $\mathbf{T_0}$ на 54° (рис. 6).

В постройке подводного вулкана Лисянского выделена линейная область с четырьмя локальными субвертикальными положительными зонами (рис. 4), прослеживающимися до глубины 1 км и обособленная интенсивная субвертикальная положительная зона на ЮВ с глубиной залегания нижней кромки порядка 2 км [1].

Последние исследования [8] показывают, что проявление подводной газо-гидротермальной активности в пределах КОД более масштабное, чем было принято считать. Например, она отмечена в Чиринкотанской группе подводных вулканов КОД и в юго-западной части Охотоморского склона о. Кунашир (рис. 7). В драгированных на подводных вулканах породах встречены вторичные минеральные ассоциации, состоящие из хлорита, эпидота, рудных минералов и, иногда, цеолитов, что является свидетельством наличия поздних высокотемпературных гидротермальных процессов, осложняющих активные фазы вулканизма.

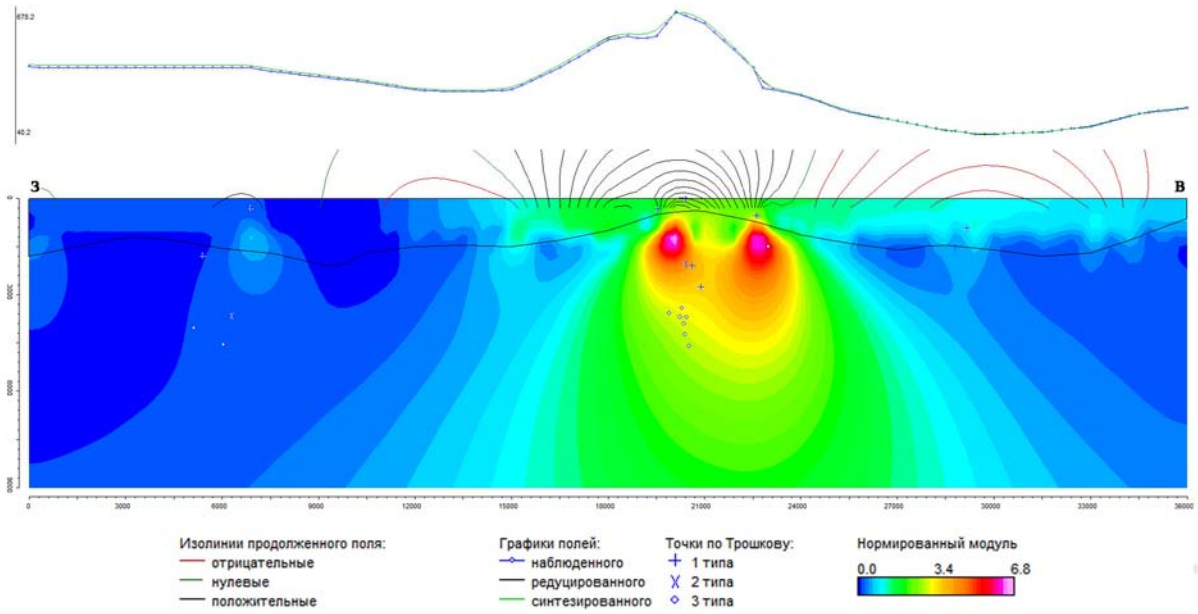


Рис. 3. Изображения, синтезированные системой СИНГУЛЯР для локализации особых точек функции, описывающее аномальные магнитные поля ΔTa подводного вулкана 8.10, наложенные на рельеф дна.

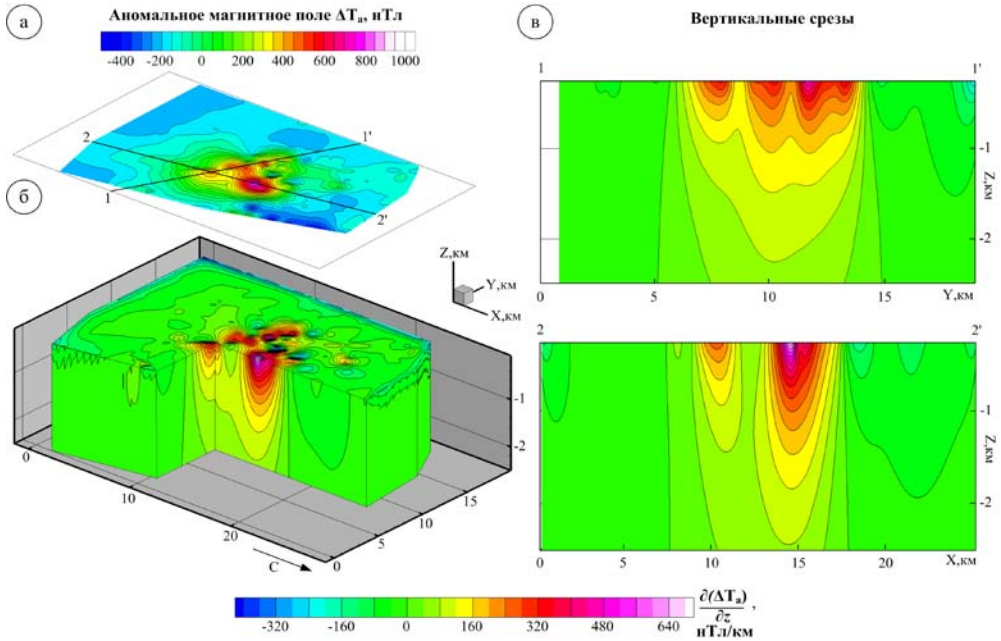


Рис. 4. Томографический анализ аномального магнитного поля подводного вулкана Лисянского. Изолинии аномального магнитного поля ΔTa (а), 3D-диаграмма, отражающая пространственное распределение квазинамагниченности горных пород, слагающих постройку подводного вулкана Лисянского (б), и ее вертикальные срезы (в) [2].

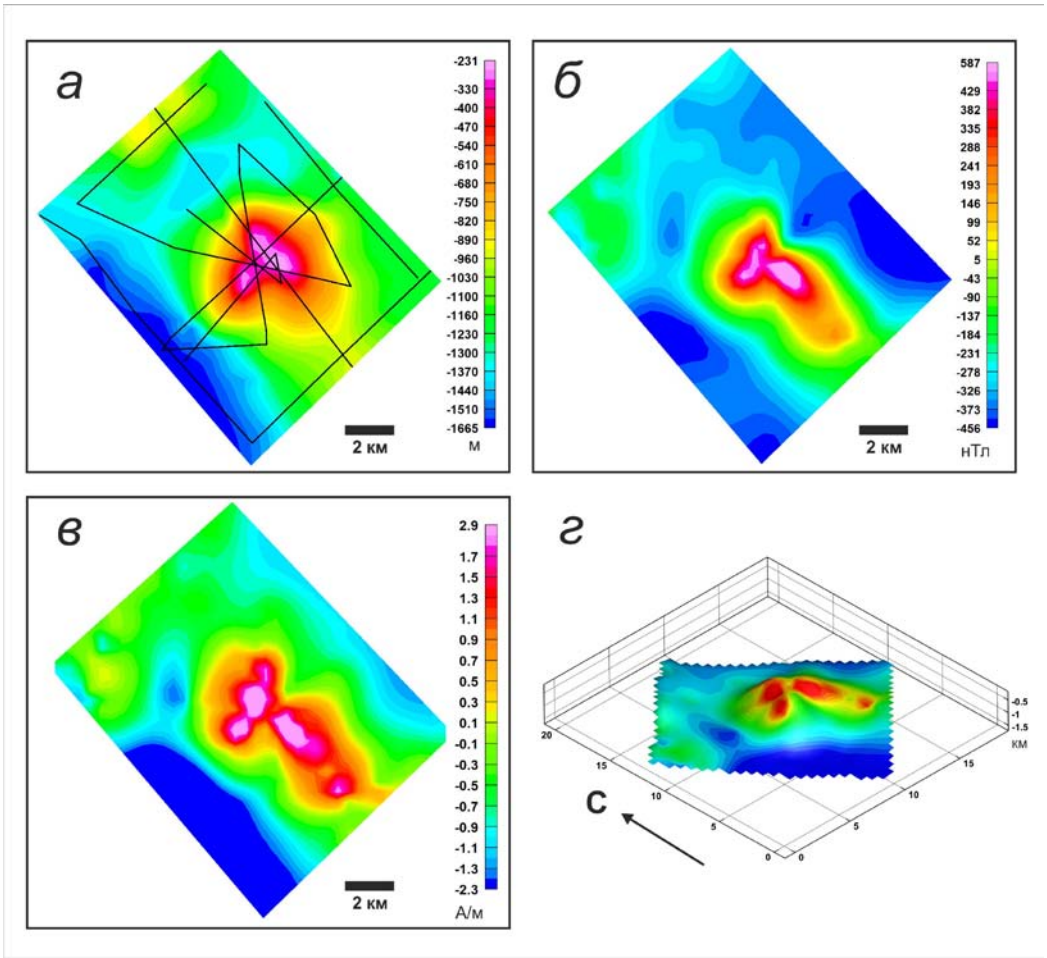


Рис. 5. Подводный вулкан 7.10: *а* – батиметрия; *б* – аномальное магнитное поле ΔTa; *в* – распределение эффективной намагниченности Jэф; *г* – распределение эффективной намагниченности Jэф, изображенное на поверхности вулкана.

Заключение

Проведенные исследования значительно расширили имеющиеся представления о строении Тихоокеанской зоны перехода и подводном вулканизме Мирового океана. Только в последние три года выполнено моделирование 13 вулканических построек в пределах центральной и южной частей КОД (рис. 3-6). Получены 125 анализов силикатного, редкоэлементного и редкоземельного составов пород, слагающих 33 подводные вулканические постройки и проведено 195 измерений петромагнитных свойств образцов горных пород, драгированных с 20 подводных вулканических построек в пределах КОД.

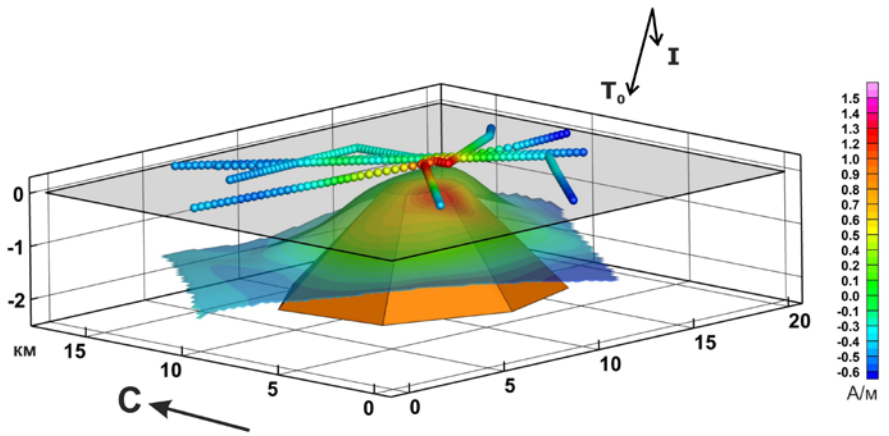


Рис. 6. Уточнение ориентации вектора эффективной намагниченности **Jэф** подводного вулкана 8.10.

Установлено, что в пределах КОД значительное распространение получили эрозионные и оползневые процессы, которые могут стать причиной цунами. Подводные вулканы КОД, которые образовались в периоды геомагнитных инверсий, сложены породами ряда от базальтов до дацитов, а сами породы сильно дифференцированы по своим петромагнитным характеристикам. В пределах вулканических построек выделены вершинные кальдеры, подводящие каналы, периферические магматические очаги и отдельные лавовые потоки.

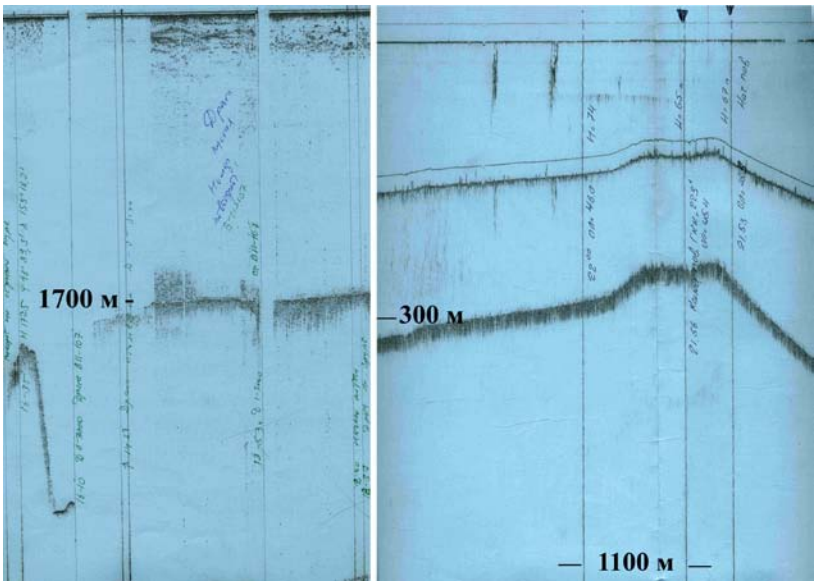


Рис. 7. Газо-гидротермальная активность на вершине вулкана 3.15, расположенного в Чиринкотанской группе подводных вулканов КОД (слева) и в юго-западной части Охотоморского склона о. Кунашир (справа) [7].

Анализ имеющихся материалов позволил сделать вывод о том, что проявления газо-гидротермальной активности в пределах КОД намного масштабнее, чем предполагалось ранее.

Полученные результаты использованы при составлении комплекта карт ГФО-200 листа M-56-XVIII (Парамуширская площадь) и геологических картРоссийской Федерации масштаба 1:1000000 (третье поколение) M-56 (Курильские о-ва, северная часть) и M-57 (Корякско-Курильская серия).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-00654 А).

Список литературы

1. *Авдейко Г.П., Антонов А.Ю., Волынец О.Н. и др.* Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги. М.: Наука, 1992. 528 с.

2. *Аникин Л.П., Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Долгая А.А., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Романова И.М., Рыбак-Франко Ю.В., Трусов А.А.* Комплексные геолого-геофизические исследования подводных и наземных вулканов Курильской островной дуги в 2020 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2021 г. / Гл. ред. д.г.-м.н. А.Ю. Озеров. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С. 68–71.

3. *Блох Ю.И., Рашидов В.А., Трусов А.А.*Оценка остаточной намагниченности подводных вулканов Курильской островной дуги с применением программы ИГЛА // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2. Вып. № 26. С. 5–10.

4. *Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А.* Подводный вулканический массив Рикорда (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2018. № 4. С. 26–42.

5. *Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А.*Комплексные геолого-геофизические исследования подводного вулканического массива Ратманова (Курильская островная дуга) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 2. Вып. № 46. С. 55–71.

6. *Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А.* Вулканический массив Райкоке (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 4. С. 61–80.

7. *Бондаренко В.И., Рашидов В.А.* Строение вулканического массива Ушишир (Центральные Курилы) // Вулканология и сейсмология. 2018. № 1. С. 16–34.

8. *Бондаренко В.И., Рашидов В.А*. Подводная газо-гидротермальная активность в пределах Курильской островной дуги // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5. № 1. С. 4–13.

УДК 556.3+550.34

ВИБРАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ИЗМЕНЕНИЯХ ДАВЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (ПО ДАННЫМ СКВАЖИННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ)

Болдина С.В., Копылова Г.Н.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, boldina@emsd.ru

Введение

Многообразие откликов давления подземных вод при похождении сейсмических волн является широко обсуждаемым вопросом при проведении наблюдений в скважинах [1, 6, 8, 10, 11, 12]. Даже при одном и том же землетрясении в близко расположенных скважинах могут проявляться различные эффекты вибрационного воздействия в изменениях давления подземных вод – колебания (осцилляции), понижения и повышения различной продолжительности. Познавательный интерес представляет объяснение такого многообразия на основе соответствующих моделей гидрогеодинамических процессов в системе скважина-водовмещающая порода.

В работе [6] на примере данных многолетней регистрации уровня воды в скважине ЮЗ-5 с периодичностью 5 мин. были выделены четыре типа откликов давления подземной воды при землетрясениях в диапазоне магнитуд $M_w = 6.8 – 9.1$ и эпицентральных расстояний d_e=80 – 14600 км и рассмотрены модели их формирования. С использованием широкополосных записей землетрясений на ближайшей сейсмостанции, продемонстрирована зависимость проявления четырех выделенных типов откликов давления воды от амплитудно-частотного состава сейсмических волн и параметров интенсивности вибрационного воздействия, таких как удельная плотность сейсмической энергии и максимальная скорость сейсмических волн в районе скважины. Таким образом, на примере одной скважины с известными строением, упругими и фильтрационными свойствами водовмещающих пород было продемонстрировано, что разнообразие откликов давления подземной воды на динамическую деформацию водовмещающих пород определяется инициацией различных гидродинамических процессов в системе скважина-водовмещающая порода, сопровождающихся колебаниями, а также ростом или понижением давления различной продолжительности, в зависимости от амплитудно-частотного состава максимальных фаз сейсмических волн. При этом ведущими факторами, вызывающими разнообразие эффектов вибрационного изменения давления (напора) подземных вод, являются вертикальные смещения ствола скважины, усиление вариаций давления в системе скважина-водовмещающая порода на определенных резонансных частотах сейсмического воздействия [9], а также локальные понижения и повышения давления в водовмещающей породе вследствие неоднородности ее строения и, соответственно, неоднородного изменения поля давления подземных вод вблизи скважины [6, 8, 11].

Индивидуальные особенности отдельных скважин в проявлениях вибрационных эффектов и в целом разнообразие откликов уровня/давления воды в наблюдательных скважинах является отражением совокупности гидродинамических процессов, инициированных воздействием сейсмических волн различного амплитудно-частотного состава, и локализованным распределением импульсов повышения или понижения давления в пространстве неоднородных водовмещающих пород вблизи ствола скважины на расстояниях от первых метров до сотен метров.

Определенный вклад в многообразии откликов давления при воздействии сейсмических волн также вносят упругие свойства подземной воды [11]. В частности, при наличии в воде свободного газа ее сжимаемость резко повышается, и величина коэффициента Скемптона, равного отношению изменений давления воды к общему напряжению в скелете породы, резко уменьшается [4, 6]. В этом случае в изменениях давления подземных вод, например, в скважинах Е-1, полуостров Камчатка и BV, Калифорния, США, вибрационные эффекты проявляются в монотонных повышениях уровня воды в течение суток-десятков суток после наиболее сильных землетрясений с интенсивностью сотрясений не менее 5-6 баллов по шкале MSK-64.

Таким образом, многообразие откликов давления подземных вод в скважинах на прохождение сейсмических волн в общем виде объясняется особенностями локальных условий наблюдательных скважин – различиями их конструкции, упругими и фильтрационными свойствами водовмещающих пород и неоднородностью их строения. Это обстоятельство предполагает создание моделей вибрационного воздействия на основе прецизионных данных наблюдений за вариациями давления

подземных вод для каждой наблюдательной скважины, используемой в системе геофизического мониторинга. Для решения этой задачи в отношении наблюдательных скважин на территории Петропавловск-Камчатского полигона, в 2017–2021 гг. была выполнена модернизация системы наблюдений с использованием цифровых средств прецизионной регистрации давления подземных вод с частотой от 20 до 0.008 Гц. В работе представлены данные о выполненной модернизации и первые результаты наблюдений вибрационных эффектов в изменениях давления подземных вод, полученных с использованием нового оборудования.

Модернизация системы наблюдений

Цифровые наблюдения за вариациями уровня воды проводятся КФ ФИЦ ЕГС РАН с 1996 г. В [5, 6, 7] представлены данные о строении скважин Е-1 и ЮЗ-5, свойствах водовмещающих пород, закономерностях гидрогеодинамического режима и зарегистрированных гидрогеодинамических предвестниках, косейсмических скачках и вибрационных эффектах в изменениях уровня воды при местных и телесейсмических землетрясениях при периодичности измерений 5 мин.

В состав оборудования, установленного в 2017–2021 гг. на скважинах ЮЗ-5, Е-1, М-1 и 1303 были включены однотипные погружные высокочувствительные датчики PAA36 XiW CTD Si (давление, температура и электропроводность воды) и PAA36 XW (давление и температура воды) фирмы Keller, Швейцария. В таблице приводится характеристика скважин и установленного оборудования.

Таблица. Данные о наблюдательных скважинах и установленном оборудовании, полуостров Камчатка

Скважина	**Координаты, с.ш./в.д.**	**Глубина, м открытый интервал, м**	**Возраст, состав пород**	**Дебит Q, дм^3/с; уровень воды, h, м**	**Температура воды, °С; минерализация воды, г/дм^3**	**Состав воды; состав газа**	**Состав установленного оборудования (частота регистрации давления подземных вод)**
М-1	53.18°/ 158.28°	600 310–313 407–410 553–556	N, туфы	самоизлив, Q=1.5	16; 0.25	SO_4–Ca–Na; растворенный газ, N_2	С июля 2020 г.: датчик PAA36 XiW CTD Si, и миникомпьютер в качестве регистратора (1 Гц)
Е-1	53.26°/ 158.48°	665 625–645	N, туфы	пьезометрическая, h=28	10; 1.5	Cl–HCO_3–Na; свободный газ, N_2–CH_4	С июля 2020 г.: датчик PAA36 XiW CTD Si и регистратор GSM-2, (2 мин)
ЮЗ-5	53.17°/ 158.41°	800 310–800	K_2, алевролиты	пьезометрическая, h=1.5	14; 0.45	HCO_3–SO_4–Na–Ca; растворенный газ, N_2	С окт. 2017 по май 2019 гг.: датчик PAA36 XW и регистратор CR6 (10 и 40 Гц). С мая по окт. 2019 г.: датчик PAA36 XiW CTD Si и регистратор GSM-2 (1 мин). С января 2020 г. по н. вр. датчик PAA36 XiW и регистратор CR1000, (20 Гц).
1303	53.14°/ 158.36°	717 517–717	N, туфопесчаники	пьезометрическая, h=25	14; 0.67	HCO_3–SO_4–Na; растворенный газ, N_2	С апреля 2021 г. датчик PAA-36XiWSi и миникомпьютер в качестве регистратора (1 Гц)

На скв. ЮЗ-5 отрабатывался вариант технического и программного совмещения датчиков фирмы Keller, Швейцария с регистраторами фирмы Campbell, США. В сентябре 2017 – мае 2019 гг. проводилась регистрация давления воды на глубине 5.6 м с частотой 10 и 40 Гц; были получены высокочастотные записи вариаций давления при телесейсмических событиях с $M_w = 7.0 – 8.1$ в районах Аляски и Мексики [2]. В 2018 г. проходил тестирование в полевых условиях комплект аппаратуры производства фирмы Keller, включающий датчик PAA36XiW CTD Si (установлен на глубине 8 м ниже уровня воды) и регистратор GSM-2. С использованием этого оборудования получены непрерывные записи давления с периодичностью 1 мин и были зарегистрированы его вариации при местных землетрясениях с $M > 4$ и при телесейсмических событиях 30 ноября и 20 декабря 2018 г. [2].

С 2020 г. в скв. ЮЗ-5 проводится на постоянной основе регистрация давления воды на глубине 8 м с частотой 20 Гц с использованием датчика PAA 36XiW и регистратора CR1000. Были получены записи вариаций давления при телесейсмических событиях с $M_w = 7.1 – 8.2$ в районах Аляски и Японии; при сильных местных событиях 25.03.2020 г., $M_w = 7.5$ и 16.03.2021 г., $M_w = 6.6$, а также при камчатских землетрясениях с $M_w \leq 5.2$.

На скв. Е-1 в июле 2020 г., дополнительно к отечественному оборудованию для измерений уровня воды Кедр ДМ [7], были установлены датчик PAA36XiW CTD Si (глубина 6 м ниже уровня воды) и регистратор GSM-2. Периодичность измерений давления, температуры и электропроводности воды составляет 2 мин.

В самоизливающейся скв. М-1 с 2013 г. проводятся измерения температуры, электропроводимости воды и атмосферного давления с периодичностью 5 мин. с использованием оборудования Кедр ДМ. Дополнительно к нему, в июле 2020 г. установлен комплект аппаратуры в составе датчика PAA 36XiW CTD Si (глубина 5 м) и миникомпьютера Lenovo IdeaCentre Stick 300, Windows 8, в качестве регистратора. На миникомпьютере установлено программное обеспечение к датчику PAA 36XiW CTD Si для измерения давления, температуры и электропроводимости воды с периодичностью 1 Гц. Были получены высокочастотные записи параметров подземных вод при телесейсмических событиях с $M_w = 7.1 – 8.2$ в районах Аляски и Японии и при местном землетрясении 16.03.2021 г. с $M_w = 6.6$.

В пьезометрической скв. 1303 с апреля 2021 г. проводятся измерения давления и температуры воды (датчик PAA 36XiW) на глубине 5 м с частотой 1 Гц. В качестве регистратора используется миникомпьютер Ultra-Slim Computer STCK1A8LFC, Windows 8, с установленным программным обеспечением к датчику.

Результаты наблюдений

На рис. 1 и 2 приводятся данные высокочастотной регистрации давления воды в скв. ЮЗ-5 при двух землетрясениях 2021 г. в сопоставлении с записями этих событий на сейсмостанции PET, соответствующие спектры и их отношения. При построении спектров производился переход к частоте дискретизации 1 с путем усреднения исходных записей с частотой 20 Гц в 20 раз. Спектры строились с использованием метода максимальной энтропии Бурга.

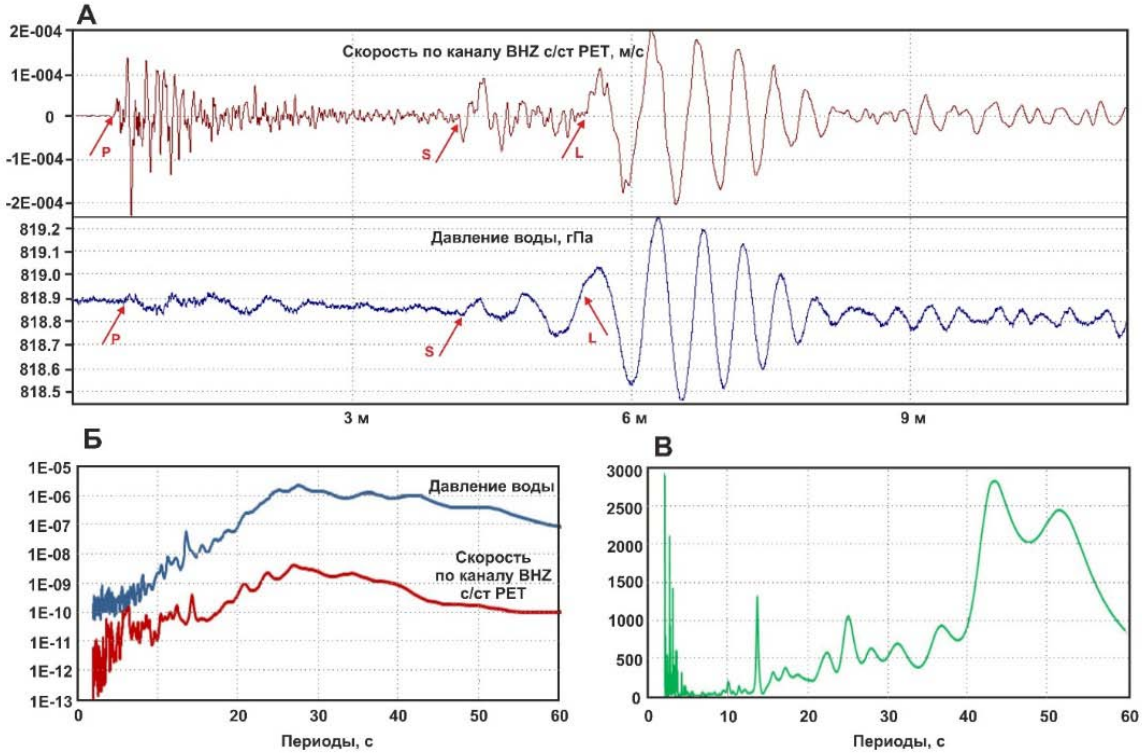


Рис. 1. Вариации давления воды в скважине ЮЗ-5 при землетрясении 13 февраля 2021 г., $M_w = 7.1$, эпицентральное расстояние $d_e = 2150$ км в сопоставлении с записью на канале BHZ на с/ст. PET (датчик STS-1, 20 Гц) (**А**); спектры мощности вариаций давления и сейсмического сигнала (**Б**) и их отношение (**В**). На графике отношения спектров (**В**) максимальное усиление вариаций давления соответствует периодам 40-50 с, что согласуется с оценкой резонансной частоты скважины ЮЗ-5 в 44 с [3].

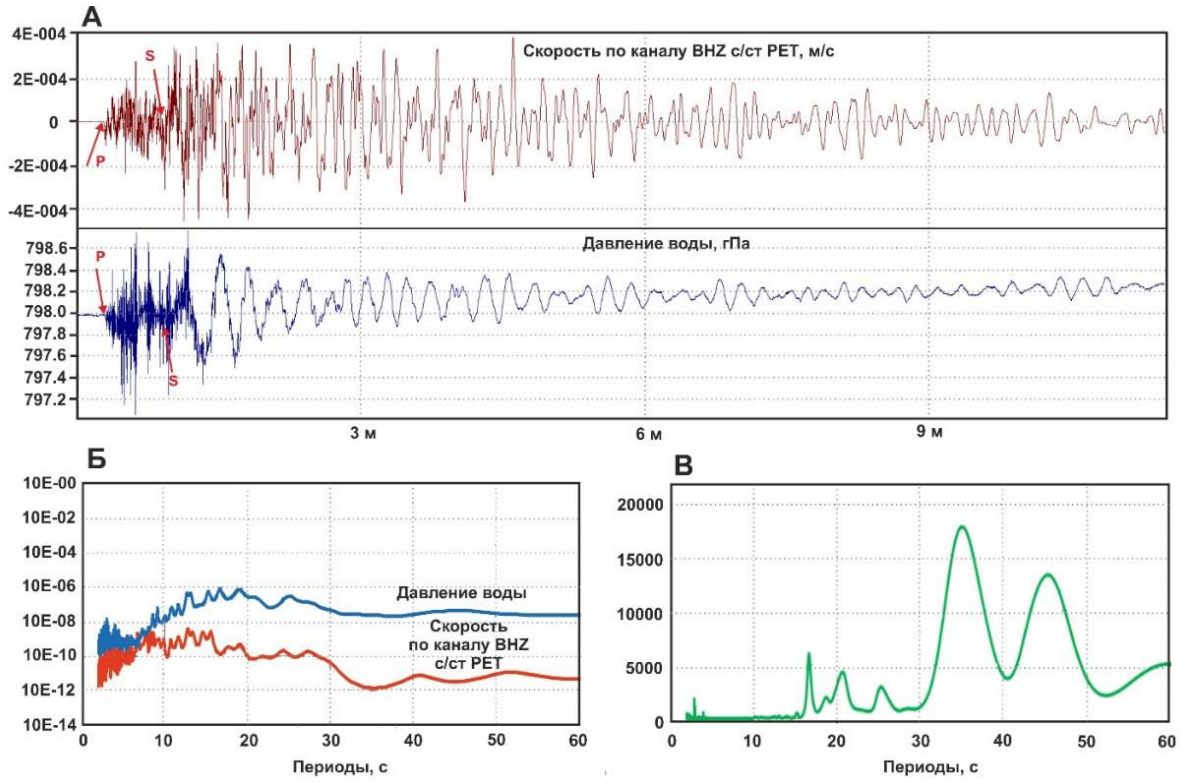


Рис. 2. Вариации давления воды в скважине ЮЗ-5 при землетрясении 16 марта 2021 г., M_w = 6.6, d_e = 350 км в сопоставлении с записью на канале BHZ на с/ст. PET (датчик STS-1, 20 Гц) (**А**); спектры мощности вариаций давления и сейсмического сигнала (**Б**) и их отношение (**В**). На графике отношения спектров (**В**) видно, что усиления вариаций давления воды также приходится на период резонансной частоты скважины 44 с со смещением в область меньших периодов (30-40 с), по сравнению с удаленным землетрясением в Японии (рис. 1**В**).

Вступление сейсмических волн P и S в записях давления воды хорошо выделяются и соответствуют временам вступления на с/ст. PET (рис. 1**А**, 2**А**). В случае удаленного землетрясения 13.02.2021 г., в изменениях давления проявились поверхностные волны на периодах более 20 с, идентичные сейсмической записи. В спектрах мощности (рис. 1**Б**, 2**Б**) максимальные амплитуды вариаций давления приходятся на периоды в первые десятки секунд, на которых наблюдается эффект усиления вариаций давления по отношению к вертикальным смещениям поверхности земли при максимуме на резонансной частоте скважины 44 с [3].

Наблюдаемое смещение максимумов отношения спектральных амплитуд вариаций давления и вертикальных скоростей движения земной поверхности в окрестности резонансной частоты скважины (44 с) может быть связано с особенностями фильтрационных процессов в системе скважина-водовмещающая порода при различных землетрясениях.

Заключение

Выполненная в 2017–2021 гг. модернизация системы наблюдений на четырех скважинах Петропавловск-Камчатского полигона с использованием прецизионного оборудования позволяет проводить детальное исследование вибрационных эффектов в изменениях давления подземных вод при прохождении сейсмических волн от землетрясений в широком диапазоне магнитуд и эпицентральных расстояний. Особенностью проводимого эксперимента является использование различных комплектов оборудования, что повышает обоснованность выделения и последующего изучения вибрационных эффектов в высокочастотных вариациях давления подземных вод в различных скважинах, в зависимости от их конструкции, свойств и строения водовмещающих пород.

Перспективы дальнейших исследований связаны с накоплением достоверных данных о высокочастотных откликах давления подземных вод в наблюдательных скважинах сети при вибрационном воздействии сейсмических волн от землетрясений в широких диапазонах магнитуд и эпицентральных расстояний, представляющих природные зондирующие сигналы состояния

наблюдательных систем скважина-водовмещающая порода с потенциальной возможностью оценки фильтрационных свойств водовмещающих пород и мониторинга их изменчивости во времени.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21 и целевой программы «Развитие») с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Киссин И.Г., Николаев А.В.* О некоторых эффектах вибрационного сейсмического воздействия на водонасыщенную среду. Сопоставление их с эффектами удаленных сильных землетрясений // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297. № 1. С. 52–56.

2. *Болдина С.В., Копылова Г.Н., Чубарова Е.Г.* Гидрогеодинамические эффекты сильных землетрясений 2017–2018 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Седьмой научно-техн. конф. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября–7 октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 27–31.

3. *Копылова Г.*Н., *Болдина С.В*. Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, на Суматра-Андаманское землетрясение 26 декабря 2004 г., *M*=9.3 // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 39–48.

4. *Копылова Г.*Н., *Болдина С.В*. О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Восточная Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008-2009 гг. и сильными (*M*≥5) землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 41−54.

5. *Копылова Г.*Н., *Болдина С.В*. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977 – 2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20. https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-20.

6. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Эффекты сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине: экспериментальные данные и модели // Физика Земли. 2020. № 4. С. 102–122. https://doi.org/10.31857/S0002333720030035.

7. *Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смирнов А.А., Чубарова Е.Г.* Опыт регистрации вариаций уровня и физико-химических параметров подземных вод в пьезометрических скважинах, вызванных сильными землетрясениями (на примере Камчатки) // Сейсмические приборы. 2016. № 4. Т. 52. С. 43–56. https://doi.org/10.21455/si2016.4-4.

8. *Brodsky et al., Brodsky E.E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M.A*. A Mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes // Journal of Geophysical Research. *2*003. V. 108. P. 2390−2400. https://doi.org/10.1029/2002JB002321.

9. *Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopulos I.S., Bennet R.R.* The response of well-aquifer system to seismic waves // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 3915−3926.

10. *Kopylova G. and Boldina S.* Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study From the Kamchatka Peninsula. Front. Earth Sci. 2020. 8:576017. https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017.

11. *Roeloffs,* Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. // JGR.1998. V. 103. N0.B1. P. 869−889.

12. *Wang, Manga,* Wang Ch.-Y., Manga M. Water and Earthquakes. Lecture Notes in Earth System Sciences. Cham: Springer, Switzerland, 2021. 387 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64308-9.

УДК 550.343.64+550.343.3

ВЛИЯНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Валитов М.Г., Прошкина З.Н.

Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, Россия, Владивосток, valitov@poi.dvo.ru

Введение

В настоящее время прогноз землетрясений, как наиболее опасных геодинамических событий, развивается в различных направлениях наук о Земле, используя, в том числе, и геофизические методы. Традиционно для этих целей используется изучение сейсмического режима [8, 9], геодезические наблюдения, в том числе с использованием спутниковой геодезии [7] электромагнитные исследования [2], анализ вариаций газовых эманаций [10], мониторинг деформаций и уровнемерные наблюдения [3, 11] и гравиметрические измерения [1].

Гравиметрические методы в основном направлены на измерение абсолютных значений поля силы тяжести, позволяющих определить высоту точки наблюдения и ее вертикальные перемещения посредством вычисления ускорения свободного падения. Преимущество абсолютных методов – это отсутствие дрейфа или «сползания нуля», в отличие от относительных. Измерения относительными методами с использованием высокоточных гравиметров широко распространены по всему миру. Существует мировая сеть приливных станций, где производится регистрация вариаций гравитационного поля Земли. Одна из таких станций располагается на территории Приморского края, на базе морской экспериментальной станции (МЭС) «Мыс Шульца» ТОИ ДВО РАН (бухта Витязь, п-ов Гамова). Здесь, начиная с 2012 г, ведется круглогодичный мониторинг приливных вариаций поля силы тяжести [6]. Для регистрации используется лабораторный относительный гравиметр gPhone №111.

Периодические вариации поля силы тяжести порождаются влиянием небесных тел, в основном Луной и Солнцем [4], однако в наблюдаемом поле существуют эффекты, помимо известных эффектов от гидросферы и атмосферы, связанные с геодинамическими процессами, протекающими в литосфере и вызывающими непериодические изменения поля силы тяжести. Выявление таких непериодических вариаций может быть полезным при обнаружении предвестников готовящегося землетрясения. С целью обнаружения в поле вариаций силы тяжести этих эффектов, как от подготовки землетрясений, так и от постсейсмических изменений в литосфере было выполнено исследование, основанное на методике расчета приливных параметров в скользящем окне. Используя эту методику можно проследить плавное изменение основных параметров главных приливных волн, а используя выборки разной длительности – определить оптимальную ширину окна (продолжительность временного ряда) для фиксации непериодических аномальных эффектов. Данная методика носит экспериментальный характер и одной из целей работы является ее апробация. В целом исследование было направлено на обнаружение эффектов в гравитационном поле Земли, связанных с геодинамическими процессами, протекающими в зоне перехода от континента к Японскому морю, т.е. в геодинамически активном регионе.

Экспериментальный материал

Методика исследований заключалась в многократном расчёте основных параметров главных приливных волн с различной длиной анализируемой выборки и шагом смещения расчетного окна. Иными словами, из генеральной выборки наблюдений вариаций силы тяжести выбирались «окна» определенной продолжительности, внутри которых выполнялись вычисления. После чего расчетное окно «сдвигалось» на определённое количество дней (от 3 до 12) и вычисления повторялись. Таким образом, для генеральной выборки были получены серии расчетов с выборками различной длины, в которых, начиная с определенной ширины окна, как мы предполагаем, могут присутствовать эффекты от геодинамических процессов, связанных с сейсмичностью региона. При увеличении ширины окна аномальный эффект должен плавно затухать, а параметры главных приливных волн стремиться к параметрам, полученным при анализе полного временного ряда.

Здесь необходимо отметить, что интерполированные участки, связанные с техническим простоем гравиметра, дают значительные сдвиги по амплитудным показателям и важной задачей при использовании подобной методики является минимизация перерывов в записи.

Еще одним шагом в подготовке данных являлось избавление наблюденных вариаций поля силы тяжести от влияний океанической нагрузки. Для этих целей использовались данные уровнемерных измерений, что позволило учесть локальные особенности при расчете океанической модели [5]. Такой подход позволил выявить эффекты в твердой Земле и сравнить их с теоретическими данными для модели PREM [12].

Данные по землетрясениям получены из каталога National Earthquake Information Center (NEIC) (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/) Геологической службы США.

Применяя данную методику расчета приливных параметров в скользящем окне, с различной шириной окон (от 30 до 120 сут), был выявлен эффект в вариациях гравитационного поля, избавленных от влияния океанической нагрузки [5], для главной лунной волны *O1* при подготовке близких землетрясений (рис. 1).

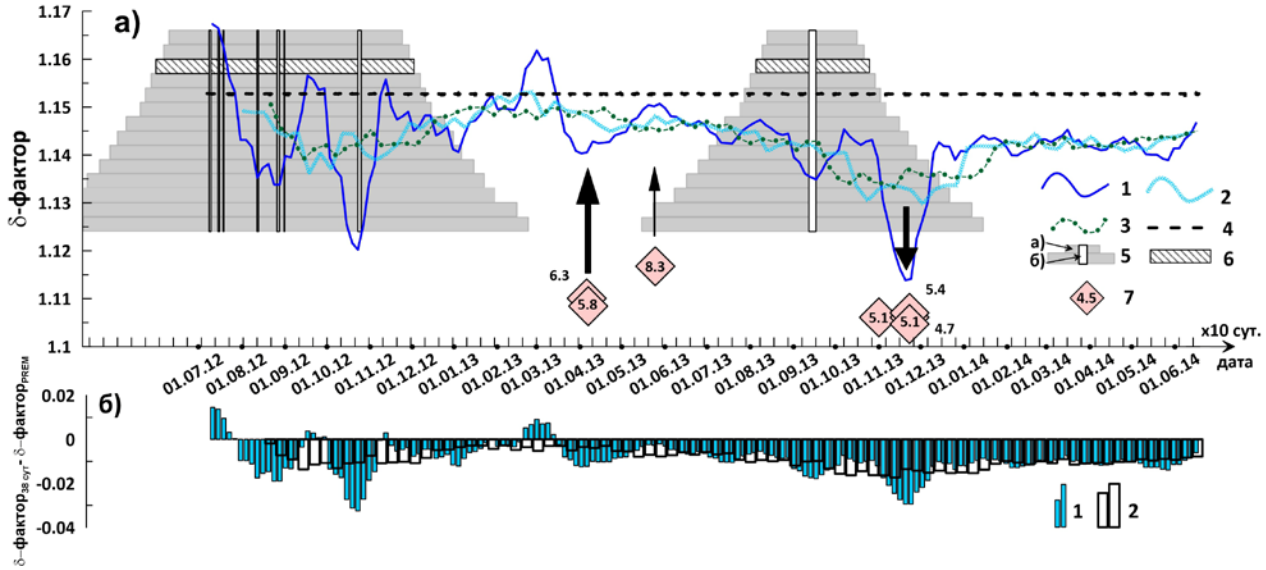


Рис. 1. а) Расчет амплитудного параметра (δ-фактора) в скользящем окне для главной лунной приливной волны *O1* (за период 2012–2014 гг): 1–3 – наблюденный δ-фактор для ширины окна 38 сут(1), 80 сут (2) и 120 сут (3); 4 – δ-фактор для твердой Земли по модели PREM [12]; 5–6 – области возможного влияния интерполированных участков записи, связанных с технического простоем гравиметра, для разной ширины расчетного окна от 30 до 120 сут (5 а), область фактического простоя гравиметра (5 б) и для ширины расчетного окна 38 сут (6); 7 – близкие к СПГ землетрясения с указанием магнитуды. Жирной черной стрелкой отмечены моменты ближайших землетрясений, тонкой черной стрелкой – момент отдаленного землетрясения. б) 1–2 – разность амплитудных параметров (δ-факторов) для главной лунной приливной волны *O1* наблюденного и модельного для твердой Земли PREM для ширины окна 38 (1) и 120 сут (2).

Как видно из рис. 1 (а) амплитудный параметр (σ-фактор) главной лунной волны *O1* при счете с окном 38 сут изменяется в пределах от 1.115 до 1.165, при этом интерполированные участки вносят значительный вклад в изменение данного параметра. В промежутке между февралем и началом апреля 2013 г. наблюдается сначала резкий подъем, а потом спад σ-фактора, при этом интерполированные участки на этот временной интервал не оказывают никакого влияния. Анализ сейсмичности показал, что выявленный эффект предшествовал двум сильнейшим глубокофокусным землетрясениям (*M* от 5.8 до 6.3 с глубиной гипоцентра около 600 км), произошедшим в нескольких км от СГП, в районе посёлка Зарубино 5–6 апреля 2013 г. Другой участок с резким уменьшением амплитудного параметра зафиксирован между октябрем и концом ноября. Этот участок также предшествовал серии коровых землетрясений, произошедшей на территории КНР (*M* от 4.7 до 5.4 и глубиной гипоцентра от 2 до 10 км) 31 октября и 22 ноября 2013 г. При этом землетрясение 31 октября можно считать форшоком к основному сейсмическому событию. На рис. 1а выделен интерполированный участок для счета с размером окна 38 сут, который, как видно из рисунка, не попадает в анализируемый период и, поэтому выявленное снижение амплитудного параметра перед серией китайских землетрясений можно считать реакцией прибора на геодинамические эффекты, связанные с сейсмическим событием.

Для сравнения на рис. 1а добавлено сильнейшее землетрясение, произошедшее в Охотском море на глубине 609 км с магнитудой 8.3. Как видно никаких значимых эффектов в период его подготовки не наблюдается.

Анализ сейсмичности показал, что значительная доля землетрясений региона сосредоточена в районе Японских островов, гораздо меньше землетрясений на территории Китая, Кореи и Юго-востока России. На записи гравиметра фиксируются прохождения сейсмических волн от этих событий, что является для нас мешающим фактором. Стоит отметить, что «континентальные» землетрясения проявляются на записи гравиметра гораздо сильнее «островных», при сопоставимой магнитуде и глубине гипоцентра последних. При подготовке гравиметрических данных все скачки в записи, связанные, в том числе, и с землетрясениями, сглаживаются и интерполируются часовыми значениями с использованием высокочастотной фильтрации. Выявленные аномальные снижения амплитудных параметров наблюдались только от близких к СГП землетрясений, локализованных на континенте. Вероятно, это может быть связано с глубинным строением рассматриваемого региона, поскольку пункт наблюдения расположен на периферии обширного батолита, который в основном развит на территории Китая, и, поэтому даже незначительные деформации массива отражаются в записи гравиметра.

Поскольку наблюденные данные были избавлены от океанической нагрузки, то предполагается, что данный эффект у главной лунной волны *O1* связан с локальной перестройкой плотностной среды в литосфере, либо с деформацией массива горных пород, явившейся причиной изменения абсолютной высоты пункта наблюдений, поэтому, чтобы судить об аномальности выявленного эффекта, было решено рассчитать по такой же методике модельные значения для твердой Земли по модели PREM [12] (рис. 1а). Как видно амплитудный показатель модельной волны *O1* остается постоянным на всем периоде наблюдений, тогда как у наблюденной кривой он слабо изменяется в периоды затишья и испытывает резкие скачки перед близкими землетрясениями. Разность наблюденного и модельного амплитудного показателя волны *O1*, рассчитанная для ширины окна 120 сут (рис. 1б), демонстрирует, что с начала января и до момента основного сейсмического события 5–6 апреля 2013 г. наблюдается плавное увеличение амплитудного параметра, при этом наблюденный показатель стремится сравняться с модельным значением, а после «энергетической разрядки» плавно уменьшается, достигая минимальных значений в период с октября 2013 г по январь 2014 г., и далее, снова незначительно увеличиваясь, остается практически постоянным до конца 2014 г. В разности, рассчитанной для ширины окна 38 сут (рис. 1б), наблюдается такой же длиннопериодный тренд, на который накладываются локальные скачки амплитудного показателя, связанные, в одном случае, с интерполированными участками, а в другом – с изменением амплитуды у волны O1 при подготовки близких землетрясений. Надо отметить, что в разности между амплитудными показателями наблюденной и модельной волны *O1*, рассчитанной для окна 38 сут (рис. 1б), в период подготовки глубокофокусных землетрясений, локализованных ближе всего к СГП, с начала февраля до начала марта 2013 г. наблюдается превышение модельных значений перед их резким спадом, предшествовавшим основным сейсмическим событиям. Выявленный длиннопериодный тренд на увеличение наблюденного амплитудного показателя волны *O1***,** а также резкий его скачок, а затем спад перед сейсмической активизацией, вероятно свидетельствует о длительном глубинном процессе, происходящим в литосфере и ставшим причиной возникновения напряженности в глубоких слоях планеты, вызвавшей довольно сильные землетрясения.

Кроме выявленного гравитационного эффекта для волны *O1*, применяемая методика позволила зафиксировать гравитационный эффект у главной солнечной волны *K1*, по всей видимости, связанный с цикличностью солнечной активности (рис. 2).

Как видно из рисунка при расчете амплитудного показателя волны *K1* с шириной окна 38 сут наблюдаются высокочастотные пики, особенно в пределах интерполированных участков. При увеличении ширины окна до 120 сут высокочастотные пики сглаживаются, и проявляется цикличность, в которой максимумы и минимумы амплитудных показателей приурочены к холодным и теплым сезонам соответственно. Сглаживание значений по 21 точке, представленное на рис. 2а, показало присутствие такой же цикличности и в расчетах для ширины окна 38 сут. В модели твердой Земли PREM такой цикличности не наблюдается, соответственно этот эффект не учтен при составлении модели. Предположительно, данный эффект связан с сезонными изменениями, происходящими в окрестностях пункта наблюдения (температурными эффектами, воздействующими на кристаллический массив на котором расположен пункт наблюдений, остаточными гидродинамическими и атмосферными эффектами или их совместным воздействием). При расчете разности амплитудных показателей (δ-факторов) для наблюденной волны *K1* и модельной для

твердой Земли PREM в окне 120 сут (рис. 2б) полугодовая цикличность отчетливо проявляется в период с октября по май (в сторону увеличения амплитуд относительно модельных параметров) и с мая по октябрь (в сторону уменьшения амплитуд относительно модельных параметров). При этом в теплые месяцы наблюденные параметры стремятся приблизиться к модельным значениям.

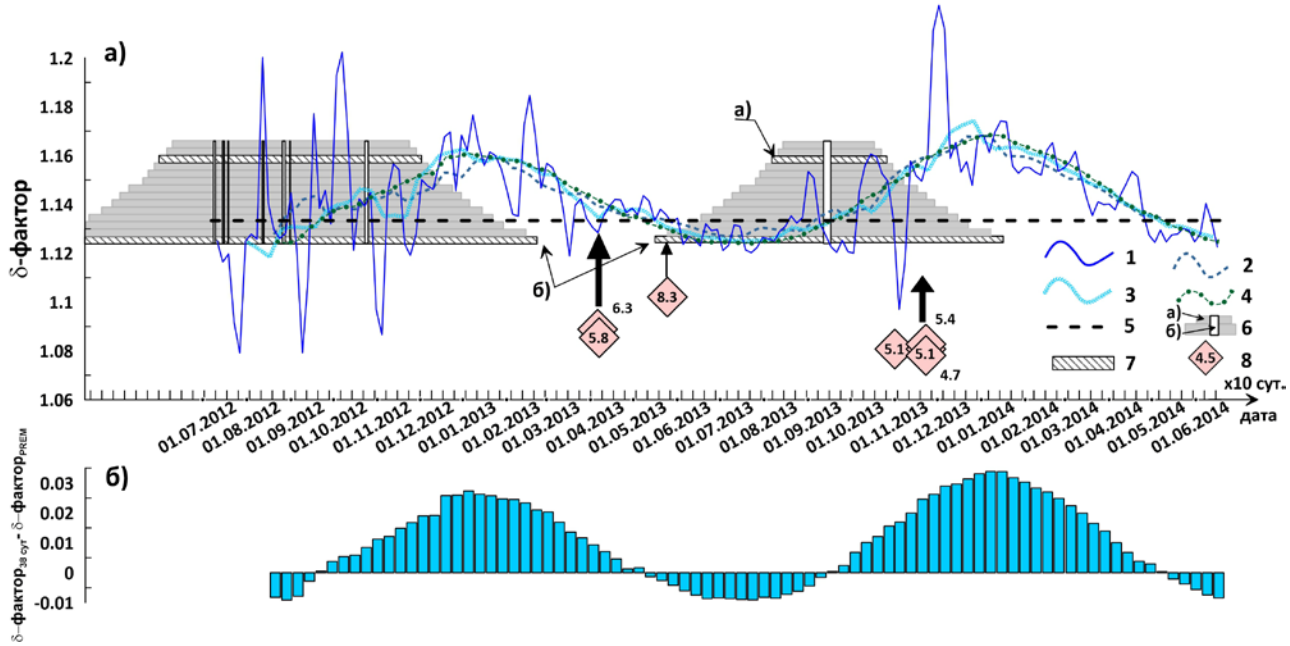


Рис. 2. а) Расчет амплитудного параметра (δ-фактора) в скользящем окне для главной солнечной приливной волны *K1* (период с 2012 по 2014 г.): 1–2 – δ-фактор для ширины окна 38 сут наблюденный (1) и сглаженный по 21 точке (2); 3–4 – наблюденный δ-фактор для ширины окна 80 сут (3) и 120 сут (4); 5 – δ-фактор для твердой Земли по модели PREM [12]; 6–7 – области возможного влияния интерполированных участков записи, связанных с техническим простоем гравиметра, для ширины расчетного окна от 30 до 120 сут (6 а), область фактического простоя (6 б) и для ширины окон 38 сут (7 а), 120 сут (7 б); 8 – близкие землетрясения к СГП с указанием магнитуды. Жирной черной стрелкой отмечены моменты ближайших землетрясений, тонкой черной стрелкой – момент удаленного землетрясения. б) Разность амплитудных параметров (δ-факторов) для главной солнечной приливной волны *K1* наблюденного и модельного для твердой Земли PREM для ширины окна 120 сут.

Выводы

Применение методики расчета приливных параметров в скользящем окне позволило выявить снижение амплитудного показателяσ(-фактора) в приливных вариациях поля силы тяжести для волны *O1*, при этом данный эффект наблюдался за несколько дней до землетрясений, локализованных вблизи пункта наблюдения и различающихся по глубинности и магнитуде. Для мелкофокусных китайских землетрясений снижение амплитудного параметра проявилось значительнее, чем для глубокофокусных землетрясений (около 600 км), произошедших всего в нескольких километрах от СГП. Вероятно, что глубинные процессы, вызвавшие эти землетрясения, были сосредоточены в нижних слоях литосферы и отклик от них на поверхности был менее амплитудным, но значительная магнитуда (*M* до 6.3) готовящихся событий и близость к СГП все же позволила выявить амплитудный эффект в приливных вариациях поля тяжести в период их подготовки, даже с учетом большой глубинности. Выявление эффекта для китайских коровых землетрясений вероятно связано с геологическим строением участка, где расположен СГП. В геологическом плане СГП расположен на гранитном массиве, уходящим на несколько км вглубь и простирающимся в сторону Китая и, вероятно, захватывающим область, где произошли сейсмические события в 2013 г.

Для суточной волны *K1* при счете с шириной окна 120 сут выявлена полугодовая сезонная цикличность, связанная, на наш взгляд, с температурным эффектом, воздействующим на массивы горных пород, на которых установлен СГП. Выявленный эффект требует дальнейшего изучения.

Негативным фактором в реализации данной методики являются разрывы в записи, поэтому в будущем необходимо минимизировать технические простои гравиметра, что позволит более качественно отслеживать эффекты, связанные с геодинамическими процессами, протекающими на границах литосферных плит в геодинамически активном регионе. Проведенное исследование

является ретроспективным и по большей части имеет цель апробации методики обработки приливных параметров в скользящем окне, но в будущем, возможно, что оно будет полезным в составлении краткосрочных прогнозов опасных сейсмических событий.

Список литературы

1. *Добровольский И.П.* Гравитационные предвестники тектонического землетрясения // Физика Земли. 2005**.** №4. С. 23–28.

2. *Довбня Б. В., Пашинин А. Ю., Рахматулин Р. А.* Краткосрочные электромагнитные предвестники землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 3. С. 731–740. https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0438.

3. *Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Широков О.П., Чупин В.А., Яковенко С.В.* Деформационные и акустические предвестники землетрясений // Доклады Академии наук. 2007. Т. 413. № 1. С. 96–100. https://doi.org/10.1134/S1028334X07020341

4. *Мельхиор П.* Земные приливы**.** М.: Мир, 1968**.** 483 с.

5. *Прошкина З.Н., Валитов М.Г., Колпащикова Т.Н., Наумов С.Б.* Оценка влияния гидродинамики на приливные вариации силы тяжести в зоне перехода от континента к Японскому морю // Физика Земли. 2021**.** №1. С. 109–121. https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1069351321010067.

6. *Прошкина З.Н., Валитов М.Г., Кулинич Р.Г., Колпащикова Т.Н.* Изучение приливных вариаций силы тяжести в зоне перехода от континента к Японскому морю // Вестник КРУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2015. № 3 (27). С 71–79.

7. *Сдельникова И.А., Стеблов Г.М.* Мониторинг цунамигенных землетрясений методами спутниковой геодезии // Геофизические исследования. 2016. Т. 17. № 1. С. 46–55.

8. *Семенов Р.М.* Землетрясение 27.08.2008 года на юге Байкала и его предвестники // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 4. С. 441–447.

9. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.

10. *Уткин В.И., Юрков А.К.* Радон как индикатор геодинамических процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 2. С. 277–286. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.022.

11. *Федотов С.А., Магуськин М.А., Левин В.Е. и др.* Деформации земной поверхности на восточном побережье Камчатки и их связь с сейсмичностью // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 24–40.

12. *Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary reference Earth model // Phys. Earth Planet. Inter. 1981. V. 25. P. 297–356.

УДК 550.34

СЕТЬ КОМПЛЕКСНЫХ СКВАЖИННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕТРОПАВЛОВСК–КАМЧАТСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА: ЗАДАЧИ, СОСТАВ И ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА ИЗМЕРЕНИЙ, ГЛАВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗА 20 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гаврилов В.А. [1]***, ДещеревскийА.В.*** [2]***, Власов Ю.А.*** [1]***, Бусс Ю.Ю.*** [1]***, Морозова Ю.В.*** [1]***, Полтавцева Е.В.*** [1]***, Федористов О.В.*** [1]***, Денисенко В.П.*** [1]

[1]*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, vgavr1403@mail.ru*
[2]*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, г. Москва*

Введение

Созданная к настоящему времени на территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (ПГП) уникальная сеть непрерывных комплексных скважинных измерений (далее – «Сеть») дает возможность проведения перспективных фундаментальных научных исследований в области изучения эндогенных процессов, связанных с подготовкой сильных землетрясений. Кроме этого Сеть является информационной основой системы средне- и краткосрочного прогноза сильных камчатских землетрясений Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН. Первый измерительный пункт Сети был создан в конце 1990-х годов на базе скважины Г-1, расположенной в черте г. Петропавловска-Камчатского. В этот период были организованы непрерывные скважинные геоакустические измерения на глубине 1035 м, дополненные в 2003 г. электромагнитными измерениями с подземной электрической антенной. Уже самые первые результаты показали, что геоакустические измерения, проводимые in situ в глубоких скважинах в сочетании с электромагнитными измерениями с подземными электрическими антеннами, позволяют получать научные результаты, недостижимые при измерениях на дневной поверхности. К таким результатам, в первую очередь, можно отнести открытие эффекта модулирующего воздействия слабых электромагнитных СНЧ полей на интенсивность геоакустической эмиссии горных пород [7, 20], а также установление и описание механизма указанного эффекта [3, 9, 21]. Указанные результаты легли в основу нового научного направления [6]. Следует также выделить разработку нового метода непрерывного мониторинга удельного сопротивления пород геосреды, базирующегося на использовании подземных электрических антенн [5].

В ходе многолетних измерений на ПГП было установлено, что разработанные методы мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды, основой которых являются данные скважинных геоакустических измерений и измерений с подземными электрическими антеннами, могут с успехом использоваться в региональных системах среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений [6–9, 12, 18]. С января 2014 г. заключения о текущей сейсмической опасности для района г. Петропавловска-Камчатского, подготавливаемые лабораторией комплексного мониторинга сейсмоактивных сред ИВиС ДВО РАН на основе данных комплексных скважинных измерений, каждые две недели или чаще подаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска, а также в Совет по прогнозу землетрясений и извержений вулканов ИВиС ДВО РАН.

Конфигурация Сети и состав измерений

В настоящее время в сеть комплексных скважинных измерений ПГП входят пять радиотелеметрических пунктов, созданных на базе скважин Г-1, Р-2, Е-1, К-33, ГК-1, расположенных в радиусе 35 км от г. Петропавловска-Камчатского, и Центра сбора и обработки данных (ЦСОД), расположенного в здании ИВиС ДВО РАН в г. Петропавловск-Камчатский.

Основная информация о составе проводимых на базе указанных скважин измерений, представлена в таблице 1.

По результатам многолетних исследований наиболее информативными в рамках задач мониторинга НДС геосреды являлись измерения, проводившиеся на базе скважин Г-1, Р-2 и ГК-1. Остановимся на некоторых особенностях указанных скважин и составе проводимых на их базе измерений.

Таблица 1. Виды наблюдений на пунктах ПГП

Название скважины, координаты, глубина скважины, дата начала непрерывных измерений	**Вид измерения; дата начала измерений**
Г-1, 53°03’*N*_158°37’48”*E*, 2540 м, август 2000 г.	1. Геоакустические, три компоненты, на глубинах более 1000 м: а) непрерывно с 04.08.2000 г. по июль 2003 г. на глубине 1035 м; б) непрерывно с октября 2009 г на глубине 1012 м; 2. Геоакустические (Z-компонента) на глубине 270 м – непрерывно с июля 2010 г. 3. Геоакустические (гидрофон) на глубине 200 м - февраль 2008 г. 4. Электромагнитные с подземной электрической антенной – непрерывно с мая 2003 г. 5. Электромагнитные с наземной антенной, каналы 30 Гц и 160 Гц – декабрь 2016 г.; каналы 560 Гц и 1200 Гц – июнь 2018 г. 6. Удельная электропроводность воды на глубине 41 м – май 2020г. 7. Температура воздуха в аппаратурном помещении – сентябрь 2007г.
Р-2, 53°05’25”*N*_158°54’20”*E*, 1504 м, июль 2005 г.	1. Геоакустические (Z-компонента), измерения с пьезокерам. геофоном на глубине 300 м – июль 2006 г.; с гидрофоном на глубине 215м – июнь 2008 г. 2. Геоакустические (три компоненты) на глубине 730 м – октябрь 2010 г. 3. Электромагнитные с подземной электрической антенной – октябрь 2010 г. 4. Электромагнитные с наземной электрической антенной – июль 2019 г. 5. Давление на глубинах 3 м и 53 м – с ноября 2005 г. по февраль 2008 г.; затем с апреля 2014 г. 6. Температура воды на глубинах 3 м и 53 м – апрель 2014 г. 7. Уровень воды скважины: с дифференциальным датчиком давления - с октября 2006 г. по апрель 2008 г.; с датчиком давления воды на глубине 53 м и датчиком атмосферного давления – апрель 2014 г. 8. Атмосферное давление - с октября 2006 г. по апрель 2008 г.; затем с апреля 2014 г. 9. Температура воздуха отдельным датчиком в аппаратурном помещении - октябрь 2010 г.
Е-1, 53°16’*N*_ 158°29’*E*, 3003 м, август 2011 г.	1. Геоакустические (три компоненты) на глубине 600 м – август 2011 г. 2. Электромагнитные с подземной электрической антенной – август 2011 г.
К-33, 52°53’590”*N*_158°11’470”*E*, 300 м, ноябрь 2011 г.	1. Геоакустические (гидрофон) на глубине 210 м – ноябрь 2011 г. 2. Электромагнитные с подземной электрической антенной – ноябрь 2011 г.
ГК-1, (самоизливающаяся, с дебитом воды около 0.1 л/с), 53°17'6.45"*N*_158°24'33.75"*E*, 1261 м, февраль 2016 г.	1. Измерения гидрофоном на глубине 280 м шумов дегазации – апрель 2018 г. 2. Измерения удельной электропроводности воды скважины на глубине 1 м – апрель 2018 г. 3. Измерения шумов дневной поверхности на глубине 0.5 м (геофон, вертикальная компонента), август 2018 г. 4. Измерения температуры воды скважины на глубинах 5 см и 7.5 м.

Скважина Г-1 расположена в разломной зоне Петропавловского горста, имеет глубину 2542 м, обсажена на всю глубину. В интервале глубин 1710–1799 м и 2530–2536 м имеется перфорация. После окончания бурения в 1987 г. дебит скважины в июне 1987 г. при самоизливе составлял около 0.3 л/с. Дебит постепенно снижался и в начале 1997 г. составлял около 0.002 л/с, а с сентября 1998 г. – не более 0.00015 л/с.

В непрерывном режиме пункт Г-1 начал функционировать в августе 2000 г. На начальном этапе на пункте проводились измерения геоакустической эмиссии (ГАЭ) с использованием скважинного трехкомпонентного геофона типа МАГ-3С [1], установленного на глубине 1035 м [7]. В 2003 г. в ходе исследований физических причин эффекта модулирующего воздействия слабых электромагнитных излучений на интенсивность ГАЭ на пункте начали проводиться электромагнитные измерения (ЭМИ) с подземной электрической антенной [5], а затем ряд других измерений (см. табл. 1).

На указанной скважине был получен основной объем данных по этим видам измерений, ставших основой наиболее важных научных результатов. При этом можно сделать вывод, что высокая эффективность измерений на скв. Г-1 явилась следствием удачного сочетания трех факторов: расположения скважины в хорошо развитой разломной зоне, ее значительной глубины и

оптимального выбора глубины установки основного геофона для проведения непрерывных геоакустических измерений.

Важность расположения измерительной скважины в развитой разломной зоне, в первую очередь, объясняется тем, что большинство методов мониторинга НДС геосреды, используемых на ПГП, ориентированы на мониторинг интенсификации процессов флюидизации геосреды, связанных с подготовкой землетрясений. По этой причине крайне важно, чтобы измерительные скважины были расположены в зонах с развитыми структурами активных разломов и имели с такими структурами хорошую гидравлическую связь. Как показывается в [17], именно таким зонам свойственна высокая динамичность фильтрационных процессов на заключительных этапах подготовки землетрясений.

Кроме этого эффективность геоакустических измерений существенно зависит от глубины установки геофона. Как показывают результаты исследований, измерения на глубинах более 300 м, позволяют значительно снизить влияние шумов дневной поверхности [14]. Однако при сложном геологическом строении участка скважины уровень шумов, а также чувствительность проводимых измерений к процессам подготовки землетрясений, может определяться и другими факторами. В частности, по данным одновременных геоакустических измерений геофонами на глубинах 270 м и 1012 м в скв. Г-1 было установлено, что по чувствительности к процессам подготовки землетрясений измерения на указанных глубинах очень сильно различаются. В этом случае имеет место высокая чувствительность измерений для глубины 1012 м и крайне низкая чувствительность для глубины 270 м. Физические причины таких результатов объясняются тем, что более глубокая зона измерений (глубины более 900 м), имеет хорошую гидравлическую связь с развитой разломной структурой ПГП, в то время как верхняя зона измерений с геофоном на глубине 270 м экранирована от разломной структуры полигона внедрением на интервале глубин 589–900 м диоритов экструзивного массива горы Мишенной [13].

Кроме геоакустических и электромагнитных измерений на скв. Г-1 ведутся измерения удельной электропроводности воды скважины. Такие же измерения с аналогичным комплектом аппаратуры проводятся и на скв. ГК-1.

Скважина Р-2 расположена в лесном массиве 20 км на северо-восток от скв. Г-1 на расстоянии около 4 км от береговой черты Авачинского залива. Скважина имеет глубину 1504 м, обсажена до глубины 768 м. Уровень воды находится на глубине около 21 м от дневной поверхности.

Ввиду значительного удаления скв. Р-2 от населенных пунктов спектр ЭМИ в зоне этой скважины определяется, в основном, электромагнитным излучением естественного происхождения. Это позволяет на базе скв. Р-2 проводить разработку методов мониторинга НДС геосреды, ориентированных на использование ЭМИ естественного происхождения. Для этой цели была создана высокочувствительная подземная антенна, основным конструктивным элементом которой является обсадная колонна скв. Р-2. Результаты, полученные с использованием указанной антенны, позволили показать принципиальную возможность использования естественного ЭМИ в системах мониторинга НДС геосреды, базирующихся на геоакустических и электромагнитных скважинных измерениях [10].

Кроме электромагнитных измерений с подземной антенной в настоящее время на скв. Р-2 проводятся непрерывные геоакустические измерения с использованием трехкомпонентного геофона, установленного на глубине 730 м, а также ряд других измерений (см. табл. 1), среди которых можно выделить непрерывные измерения давления и температуры воды в стволе скважины одновременно на двух глубинах. Результаты этих измерений используются для непрерывного мониторинга уровня воды и проницаемости геосреды. Основная идея, заложенная в метод мониторинга изменений проницаемости геосреды, применяемый на скв. Р-2, состоит в том, что изменения плотности воды скважины связаны (с поправкой на изменения температуры) с изменениями объема газов, поступающих в воду скважины из геосреды. В свою очередь, изменения объема газов определяются преимущественно изменениями проницаемости геосреды в районе скважины. Данные по изменениям плотности воды на скв. Р-2 получают расчетным путем, используя результаты непрерывных измерений давления и температуры воды в скважине на глубинах 3 м и 53 м. Указанный вариант метода мониторинга проницаемости геосреды позволил получить интересные научные результаты, связанные с подготовкой сильнейших Симуширских землетрясений (15.11.2006 г., $M_W = 8.3$; 13.01.2007 г., $M_W = 8.1$) [4]. Мониторинг уровня воды, который проводится на скв. Р-2 в непрерывном режиме с ноября 2005 г., также весьма эффективен в рамках задач мониторинга НДС геосреды. Амплитуды аномалий уровня воды, предшествующие сильным землетрясениям, достигают 53 см.

Скважина ГК-1 расположена в 35 км от г. Петропавловска-Камчатского, имеет глубину 1261 м, обсажена до глубины около 600 м. Скв. ГК-1 является самоизливающейся скважиной со среднемноголетним значением дебита около 0.1 л/с. Особенностью воды скважины является ее

достаточно высокая газонасыщенность (порядка 50 мл/л) с преобладанием в составе метана (до 90 %). Это позволяет использовать для мониторинга проницаемости геосреды оригинальный метод, базирующийся на измерениях шумов дегазации в воде скважины. Полученные к настоящему времени результаты указывают на перспективность использования этого метода в системе среднесрочного и краткосрочного прогноза камчатских землетрясений [12, 18]. На скв. ГК-1 также проводятся автоматизированные измерения удельной электропроводности воды скважины, аналогичные измерениями на скв. Г-1.

Техническое оснащение измерительных пунктов

Основным режимом функционирования измерительных пунктов (ИП) сети скважинных измерений ПГП является *режим непрерывного мониторинга*, при котором измерения ведутся непрерывно, а данные текущих измерений сохраняются в энергонезависимой памяти ИП для дальнейшей передачи по запросу из ЦСОД (в обычном режиме – ежесуточно в будние дни).

Обобщенная структурная схема аппаратурного комплекса, используемого в настоящее время на ПГП для такого режима измерений, приводится на рис. 1.

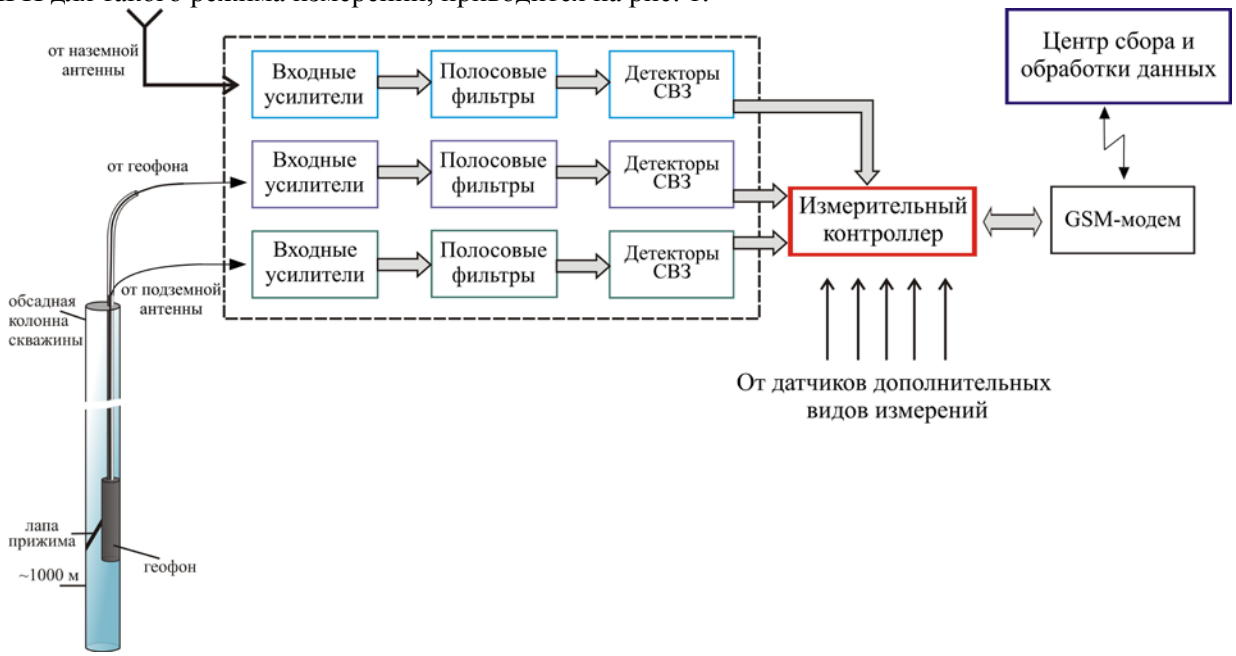


Рис. 1. Обобщенная структурная схема аппаратурного комплекса сети скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона.

Конфигурация комплекса для конкретного ИП подбирается исходя из состава проводимых на пункте измерений. Основой комплекса является измерительный контроллер, в функции которого входит аналого-цифровое преобразование измеряемых сигналов, их цифровое осреднение, привязка данных к точному времени по UTC, а также хранение массивов обработанных данных для их дальнейшей передачи по каналу связи в ЦСОД. Подробные технические характеристики контроллера представлены в [2]. При необходимости организации большого числа измерительных каналов на пункте могут одновременно использоваться несколько контроллеров. В режиме непрерывного мониторинга исходные сигналы с выходов геоакустических датчиков и электрических антенн поступают на входы контроллера после аналоговой обработки с выделением средневыпрямленных значений (СВЗ) сигналов ГАЭ и ЭМИ (см. рис. 1). Использование такой схемы измерений связано с широкой (порядка 1.5 кГц) полосой исходных сигналов ГАЭ и ЭМИ. Аналоговая обработка сигналов ГАЭ и ЭМИ приводит к значительному (примерно к 2000-кратному) уменьшению объема данных, подлежащих передаче в ЦСОД, что позволяет использовать для их передачи доступные и дешевые каналы сотовой GSM-связи.

Геоакустические скважинные измерения

В настоящее время при проведении геоакустических измерений на ПГП используются скважинные аналоговые геофоны двух типов, а также аналоговые и цифровые гидрофоны.

Скважинные геофоны. С августа 2000 г. до сентября 2009 г. на ПГП в качестве основных геофонов применялись трехкомпонентные скважинные геофоны типа МАГ-3С с датчиками на основе

магнитоупругих кристаллических ферромагнетиков [1]. С сентября 2009 г. на ПГП в качестве основных используются скважинные геофоны с пьезоэлектрическими датчиками – акселерометрами типа А1612 (производство ЗАО "Геоакустика"). Геофоны используются в трех- и однокомпонентном (Z-компонента) вариантах совместно с предварительными и линейными усилителями собственной разработки. Рабочий диапазон частот датчиков составляет 0.1–1000 Гц по уровню 0.7, номинальное значение коэффициента преобразования 1.0 $В \cdot с^2 \cdot м^{-1}$. Среднеквадратическое значение собственных шумов датчиков в диапазоне 0.2–400 Гц не превышает $2 \cdot 10^{-5}$ $м \cdot с^{-2}$. Необходимо отметить, что по чувствительности в области высоких частот (500–1200 Гц) геофоны с пьезоэлектрическими датчиками значительно уступают геофонам типа МАГ. Это связано с тем, что сигнал на выходе датчиков на основе магнитоупругих кристаллических ферромагнетиков, используемых в геофонах типа МАГ, пропорционален скорости ускорения, т.е. третьей производной от смещения. Соответственно в этом случае крутизна амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в рабочей полосе частот в пересчете на смещение составляет 60 дБ на декаду изменения частоты. Для пьезокерамических датчиков-акселерометров А1612 крутизна АЧХ составляет 40 дБ на декаду изменения частоты, что приводит в итоге к значительно меньшей (примерно на порядок) чувствительности измерений в области высоких (500–1000 Гц). В этой связи отметим, что измерения в 2001 г. с геофоном МАГ-3С позволили получить очень важные результаты, перспективные для целей краткосрочного прогноза сильных землетрясений в районе Авачинского залива. Наиболее интересные результаты были получены во временной окрестности роя сильных землетрясений в октябре 2001 г. для самых высокочастотных каналов (центральные частоты фильтров 560 Гц и 1200 Гц) [21]. Для повышения чувствительности сети скважинных геоакустических измерений к изменениям НДС в ближайшее время планируется на отдельных ИП возобновить использование геофонов МАГ-3С.

Электромагнитные измерения с подземными антеннами

В настоящее время на измерительных пунктах ПГП используются подземные электрические антенны трех типов. Для измерений на пункте Р-2, в зоне которого электромагнитное излучение связано, в основном, с источниками естественного происхождения, используется подземная электрическая антенна типа «монополь», которая по своей конструкции, аналогична антенне, описанной в [19]. Результаты, полученные в ходе измерений на пункте Р-2, показали, что применение антенн подобного типа, благодаря присущей им высокой чувствительности, позволяет использовать для целей мониторинга НДС геосреды даже слабые ЭМИ естественного происхождения [10]. Применение подземных антенн, подобных по конструкции антенне типа «монополь», требует наличия значительной свободной площади вокруг скважины для размещения подземного рефлектора, а также проведения большого объема земляных работ. При нахождении вблизи скважины строений, дорог и т.п., такой вариант подземной антенны практически нереализуем. В этой связи авторами был разработан оригинальный вариант подземной электрической антенны, не требующий применения рефлектора [5]. Антенны этого типа используются для измерений на скважинах Г-1 и Е-1. Для получения корректных результатов по мониторингу удельного сопротивления геосреды при обработке данных измерений с подземными антеннами требуется учитывать изменения напряженности внешнего ЭМИ, воздействующего на геосреду в зоне скважины. Для этой цели измерительные пункты оснащаются аппаратурой для проведения наземных электромагнитных измерений. При этом измерения с наземными и подземными антеннами проводятся в одних и тех же частотных диапазонах. Результаты наземных измерений используются затем при обработке данных в ЦСОД.

Обработка данных электромагнитных измерений на измерительных пунктах аналогична описанной выше обработке исходных широкополосных сигналов ГАЭ.

На ИП сети также ведутся непрерывные **измерения различных служебных параметров**: температуры в помещениях пунктов, напряжений источников электропитания аппаратуры ИП, уровней собственных шумов измерительных трактов и другие измерения, которые относятся к служебным. Данные этих измерений используются при обработке временных рядов скважинных измерений для контроля условий измерений, что позволяет существенно повысить качество данных и уменьшить риск некорректной интерпретации результатов мониторинга [11, 16].

К настоящему времени наиболее широкий комплекс служебных измерений организован на ИП ГК-1. Кроме температуры воздуха и напряжений электропитания аппаратуры на данным пункте контролируются изменения температуры воды в самоизливающейся скв. ГК-1 на глубине 5 см (практически на изливе скважины) и на глубине 7.5 м. В качестве датчиков используются

термометры сопротивления PT-100. Результаты этих измерений необходимы для компенсации суточных и сезонных вариаций данных гидрофона, установленного в скв. ГК-1 на глубине 280 м для измерений шумов дегазации воды скважины. Кроме этого на пункте ведется непрерывный мониторинг уровня шумов дневной поверхности. Для этой цели используется однокомпонентный (вертикальная компонента) геофон с пьезоэлектрическим датчиком типа A1612, установленный на глубине 0.5 м на расстоянии 30 м от скв. ГК-1. Получаемые при этом данные дают возможность при обработке данных шумов дегазации учитывать изменения в зоне скважины уровня шумов экзогенного происхождения.

Передача данных в ЦСОД и обработка данных

При спокойной сейсмической обстановке сеансы связи с ИП в будние дни организуются ежедневно, а в выходные и праздничные дни не реже, чем каждые двое суток. Передача данных, накопленных с момента предыдущего сеанса связи, осуществляется поочередно с каждого ИП по запросу из ЦСОД. Передача данных с ИП производится по каналам сотовой связи стандарта GSM. Благодаря значительному сокращению массива геоакустических и электромагнитных данных за счет их предварительной обработки время передачи суточного массива с одного пункта обычно не превышает четырех минут. В случае отказа канала связи контроллер обеспечивает продолжение измерений и регистрации данных в автономном режиме в течение месяца и более. Так, при одноминутном осреднении в памяти контроллера сохраняются результаты измерений за последние 51 сутки. Зарегистрированные данные могут быть считаны непосредственно на измерительном пункте с помощью портативного компьютера через интерфейс RS-232.

Принятые в ЦСОД очередные массивы данных измерительных пунктов автоматически вносятся в базу исходных данных, созданных в формате программного пакета WinABD [15]. Пакет WinABD обеспечивает хранение рядов данных многолетних комплексных геофизических измерений и работу с ними в единой программной среде. Наряду с данными скважинных измерений ПГП, в базу первичных данных загружаются и данные, получаемые из сторонних организаций.

По окончании сеанса связи дежурный оператор имеет возможность провести предварительный контроль внесенных данных, в том числе, оценить результаты последних измерений по служебным каналам ИП (напряжения на источниках питания и пр.). Также имеется возможность при необходимости дистанционно изменить настройки основных опций контроллеров ИП: установка текущего времени, интервала усреднения данных и др.

Дальнейшая работа с новыми данными предусматривает трехэтапный цикл их обработки с последующим присоединением к ранее накопленному массиву данных, который хранится в чистовой базе данных. Такой цикл включает в себя следующие действия по обработке временных рядов:

- устранение различных дефектов в данных;
- коррекция рядов при нештатных скачках среднего уровня и/или дисперсии сигналов, связанных, как правило, с изменением настроек или заменой блоков аппаратуры;
- устранение в рядах вариаций, связанных как с изменением температуры в помещении ИП, так и с иными помехами естественного и техногенного происхождения.

Таким образом, в базе данных сохраняются как первичные результаты измерений, так и ряды, прошедшие первичную обработку. Весь цикл обработки выполняется в среде пакета WinABD.

Основным режимом, используемым в Сети для геоакустических и электромагнитных измерений, является режим непрерывного мониторинга, при котором регистрируются только средневыпрямленные значения этих сигналов. Вместе с тем, для решения ряда задач, связанных, например, с изучением спектров и волновых форм, требуется также регистрация исходных широкополосных сигналов. В таких случаях в дополнение к режиму непрерывного мониторинга применяется *режим широкополосной автономной регистрации сигналов ГАЭ и ЭМИ*. Для этой цели используется измерительный цифровой модуль Zet220, позволяющий проводить высокоточные геоакустические и электромагнитные измерения с частотой дискретизации до 8 кГц с регистрацией данных на USB-флэш-накопитель (без передачи данных по каналу связи). Такие измерения проводятся сеансами продолжительностью от нескольких суток до нескольких месяцев.

Заключение

За 22 года функционирования Сети комплексных скважинных измерений ПГП был получен целый ряд важных научных результатов, относящихся к физическим причинам аномальных изменений параметров ГАЭ и ЭМИ во временных окрестностях сильных землетрясений, а также к

методам мониторинга и краткосрочного прогноза землетрясений [3, 6–9, 20, 21,]. Вместе с тем, по мнению авторов, главным результатом следует считать само создание указанной Сети.

В настоящее время сеть комплексных скважинных измерений ПГП можно рассматривать, во-первых, как непрерывно функционирующую и развивающуюся экспериментальную базу для изучения процессов подготовки сильных землетрясений в одном из самых сейсмоактивных регионов мира. Во-вторых, Сеть также является информационной основой, действующей в районе г. Петропавловска-Камчатского системы среднесрочного и краткосрочного прогноза сильных камчатских землетрясений.

Первую из двух этих задач можно условно отнести к числу фундаментальных, а вторую - к прикладным задачам. Однако фактически результаты, получаемые в рамках этих направлений исследований, в значительной мере взаимосвязаны. Так, например, открытие эффекта воздействия внешнего ЭМИ на интенсивность геоакустических процессов [7, 20] и исследование его физических причин [3, 8, 9, 21] оказало очень серьезное положительное влияние на развитие работ по среднесрочному и краткосрочному прогнозу камчатских землетрясений. И наоборот: результаты многолетних измерений с подземными антеннами [5, 22], организованные на ПГП, прежде всего, с целью развития методов прогноза землетрясений, позволили получить уникальные результаты о влиянии изменений удельного электрического сопротивления верхней части земной коры на параметры глобальной электрической цепи [18].

Очевидно, что данные, полученные в ходе рассматриваемых геоакустических и электромагнитных измерений и ставшие основой большого числа научных результатов, невозможно было бы получить при наблюдениях на поверхности. Проведение основной части измерений в достаточно глубоких скважинах, т.е. фактически in situ, является крайне важной особенностью созданной Сети.

Другой важной особенностью сети скважинных измерений ПГП является их комплексность. Касаясь состава проводимых на ПГП измерений отметим, что их выбор определялся, в первую очередь, задачей вероятностного краткосрочного прогноза времени сильнейшего ($M \geq 7.5$) неглубокого землетрясения в районе Авачинского залива. Успешные прогнозы ряда сильных камчатских землетрясений, сделанные на основе данных комплексных скважинных измерений, показывают, что в целом состав проводимых измерений и базирующиеся на них методы мониторинга НДС геосреды соответствуют решаемым задачам. Прежде всего, это относится к скважинным геоакустическим измерениям и электромагнитным измерениям с подземными электрическими антеннами, на основе которых удалось разработать высокоэффективные методы мониторинга НДС геосреды, не имеющие аналогов на отечественных и зарубежных сейсмопрогностических полигонах.

Благодарности

Работа выполнена по проекту № 0282-2019-0005 государственного задания ИВиС ДВО РАН и по проекту № 0144-2019-0011 государственного задания ИФЗ РАН.

Список литературы

1. *Беляков А.С.* Магнитоупругие акустические геофоны для геофизических исследований // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН, 2004. Вып. 40. С. 28–35.

2. *Власов Ю.А., Гаврилов В.А., Денисенко В.П., Федористов О.В.* Телеметрическая система сети комплексного геофизического мониторинга // Сейсмические приборы. 2008. Вып. 44. № 2. С. 32–38.

3. *Гаврилов В.А.* Физические причины суточных вариаций уровня геоакустической эмиссии // ДАН. 2007. Т. 414. № 3. С. 389–392.

4. *Гаврилов В.А.* Динамика микротрещинноватости геосреды в связи с катастрофическими Симуширскими землетрясениями 2006-2007 гг. по данным комплексных скважинных измерений на Камчатке // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. К 40-летию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. Материалы докладов Всероссийской конференции. Т. 2. М.: ИФЗ, 2009. С. 295–302.

5. *Гаврилов В.А.* О методе непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 3. С. 25–38.

6. *Гаврилов В.А.* Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 2017. 385 с.

7. *Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В.* Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 52–67.

8. *Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Власов Ю.А., Денисенко В.П., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В., Федористов О.В.* О прогнозе Южно-Камчатского землетрясения (28.02.2013 г., Mw=6.8) по данным

комплексных скважинных геофизических измерений // Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. Гл. 11. С. 136–138.

9. *Гаврилов В.А., Пантелеев И.А., Рябинин Г.В.* Физическая основа эффектов электромагнитного воздействия на интенсивность геоакустических процессов // Физика Земли. 2014. № 1. С. 89–103.

10. *Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В., Дещеревский А.В., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В.* Мониторинг состояния геосреды на основе синхронных геоакустических и электромагнитных скважинных измерений: использование естественного электромагнитного излучения // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 4. С. 41–57.

11. *Гаврилов В.А., Дещеревский А.В., Полтавцева Е.В., Сидорин А.Я.* Технологии предварительной обработки данных комплексного геофизического мониторинга и опыт их применения в системе геоакустических наблюдений на Камчатке // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 4. С. 57–75.

12. *Гаврилов В. А., Морозова Ю.В., Дещеревский А.В, Бусс Ю.Ю., Пантелеев И.А.* Отражение процесса подготовки сильного близкого Жупановского землетрясения в данных комплексных скважинных измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы V Международной конференции, Москва, 04–07 июня 2019 г. / под. ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. 2019. С 38–44.

13. *Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Бусс Ю.Ю., Полтавцева Е.В.* Результаты одновременных геоакустических измерений на разных глубинах в скважине Г-1: связь с особенностями геологического строения околоскважинного пространства // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 29–30.03.2021 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С 83–86.

14. *Гальперин Е.И., Нерсесов И.Л, Воровский Л.М. и др.* Изучение сейсмического режима крупных промышленных центров. М.: Наука, 1978. 188 с.

15. *Дещеревский А.В., Журавлев В.И., Никольский А.Н., Сидорин А.Я.* Программный пакет ABD – универсальный инструмент для анализа данных долговременных наблюдений // НТР. 2016. Том 95. № 4. с.35–48. DOI: 10.21455/std2016.4-6.

16. *Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Фаттахов Е.А.* Комплексная методика описания и фильтрации экзогенных эффектов в данных мониторинга, учитывающая вид наблюдений и дефекты экспериментальных данных // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98. № 2. С. 25–60. DOI: 10.21455/std2019.2-2.

17. *Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2015. 328 с.

18. *Bogdanov V., Gavrilov V., Pulinets S., Ouzounov D.* Responses to the preparation of strong Kamchatka earthquakes in the lithosphere–atmosphere–ionosphere system, based on new data from integrated ground and ionospheric monitoring, E3S Web Conf., 196 (2020) 03005. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019603005.

19. *Fujinawa Y., Takahashi K., Tomizawa I.* Characteristcs of casing-pipe antennas // Techn. Note Nat. Res. Inst. Earth Sci. and Disaster Prev. 1995. N. 166. P. 83–94.

20. *Gavrilov V., Bogomolov L., Morozova. Yu., Storcheus A.* Variations in geoacoustic emissions in a deep borehole and its correlation with seismicity // Annals of Geophysics. V. 51. N. 5/6. October/December 2008. P. 737–753.

21. *Gavrilov V.A., Naumov A.V.* Modulation of geoacoustic emission intensity by time-varying electric field // Russian Journal of Earth Sciences. 2017. V. 17. N 1. P. 1–9.

22. *Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Deshcherevskii A.V., Lander A.V., Morozova Yu.V., Buss Yu.Yu., Vlasov Yu.A.* Stress-strain state monitoring of geological environment based on multi-instrumental measurements in boreholes: Experience from of the studies at Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic testing site (Kamchatka, Russia) // Pure and Applied Geophysics (2020). V. 177. N 1. P. 397–419.

УДК 550.8:551.211

ОСОБЕННОСТИ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ И ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

Жигалин А.Д. [1,3], Лавров В.С.[1], Архипова Е.В.[2], Брянцева Г.В.[3]

[1]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, zhigalin.alek@yandex.ru
[2]Государственный университет «Дубна», г. Дубна
[3]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Введение

Тихий океан представляет собой огромную по величине и потенциальным научным возможностям природную лабораторию, могущую удовлетворить самое безграничное любопытство исследователя. Это определяется, во-первых, его географическим положением, объемом занимаемого пространства гидросферы, примыкающей атмосферы и подстилающей литосферы специфического, не похожего на континентальную литосферу, вида. С геофизических позиций, что также следует отметить, это во-вторых, океаническая чаша привлекает внимание окаймляемым большую часть ее периметра так называемым «огненным кольцом». Северо-западная часть Тихого океана представляет собой весьма активную часть «тихоокеанского огненного кольца», где сходятся геофизические силы, управляющие тектоническими подвижками литосферных плит, периодическими проявлениями сейсмической, вулканической и циклонической активности. Тихоокеанское вулканическое огненное кольцо охватывает область по периметру Тихого океана, в которой находится большинство действующих вулканов и происходит множество землетрясений. Всего в этой зоне насчитывается 328 действующих наземных вулканов из 540, известных на Земле. На западном побережье Тихого океана вулканическая цепь тянется от полуострова Камчатка через Курильские, Японские, Филиппинские острова и далее до Новой Зеландии и Антарктиды. Южная часть океана как бы «отсекается от антарктического бассейна холодным Течением Западных ветров, что придает форме северной и экваториальной части Тихого океана форму чаши, отделяя его от Мирового океана.

Для понимания особенностей проявления катастрофических природных событий необходимо исследовать пространственно-временные закономерности их распределения с учетом влияния друг на друга смежных геосфер – литосферы, поверхностной и/или подземной гидросферы, атмосферы. В основу проведенного исследования было положено предположение о возможной (вероятной) взаимной связи природных катастроф, таких как землетрясения, извержения вулканов и атмосферные вихри (тропические циклоны) на наблюдаемых участках высокой нестабильности геосфер. В качестве объекта исследований рассматривается сегмент Тихого океана, расположенный к северу от экватора, в районе Филлипинской литосферной плиты и выше вплоть до п-ова Камчатка. Этот сегмент представляется наиболее опасным с геофизических позиций регионом земного шара, поскольку именно здесь ежегодно происходит значительное число стихийных бедствий, связанных как с литосферными, так и с атмосферными процессами. В результаты проведенных исследований с, использованием пространственно-временного удалось выявить ряд закономерностей распределения сейсмических, вулканических и атмосферных катастрофических событий, стало возможным свести воедино данные о сейсмичности, вулканизме и распространению тропических циклонов в районе Филлипинской плиты и к северу от нее за длительный период времени.

Тектоническая, сейсмическая и циклоническая активность западного обрамления Тихого океана

Геологическое строение и современное геодинамическое напряженное состояние узлового региона Филиппинской литосферной плиты и ее окружения определяется наличием зон субдукции с обеих сторон и вулканических островных дуг, а также глубоководных желобов (рис. 1). Филиппинская литосферная плита и ее обрамление представляют собой сложно деформированную буферную зону, в пределах которой наблюдается встречное движение Евроазиатской и Тихоокеанской мегаплит. Филиппинский архипелаг испытывает интенсивные современные деформации, поскольку с двух сторон зажат противоположно наклоненными зонами субдукции. Поддвигающиеся под архипелаг западные и восточные участки коры в зонах субдукции характеризуются наличием действующих стратовулканов. Относительная скорость конвергенции Филиппинской островной дуги и плиты Южно-Китайского моря в районе Манильского желоба на

различных участках составляет от 20 до 50 мм/г. В свою очередь, плита Филиппинского моря поддвигается под Филиппинскую островную дугу со средней скоростью около 16 мм/г. Значительная относительная скорость сближения плит и наличие зон субдукции определяют исключительно высокую сейсмическую и вулканическую активность этого района. Так, в районе Филиппинской плиты ($0–30^0$ с. ш. и $110–170^0$ в. д.) за период с 1990 по 2020 гг. произошло 617 сильных сейсмических событий с $M \geq 6$ с очагами в диапазоне глубин от 0 до 664 км. События приурочены, главным образом, к сейсмофокальным зонам, которые, в свою очередь, сопряжены с вулканическими островными дугами и глубоководными желобами и обрамляют Филиппинскую литосферную плиту с запада и востока. Вулканическая активность района Филиппинского моря, как и сейсмичность, приурочена, главным образом, к островным дугам, обрамляющим Филиппинскую плиту. За период с 1983 по 2020 г. в этом районе Тихого океана зарегистрировано 161 вулканическое извержение.

Отмечено, что для Филиппинского моря характерна высокая плотность теплового потока, что обусловлено неглубоким положением астеносферы. Наибольшие величины теплового потока до 2 Вт/м^2 установлены в Марианском троге (Марианской впадине), в центральной части которого в 1987 г. были обнаружены обширные зоны эманации флюидов, разогретых до 285^0С. В частности, под современными рифтовыми структурами Марианского трога изотермы $1000–1200^0$С расположены наиболее высоко, достигая уровня земной коры. Характерной особенностью центральной части Тихого океана является активная циклоническая активность, выражающаяся в регулярном возникновении разрушительных тропических тайфунов, обрушивающихся на северо-западное его побережье (рис. 2).

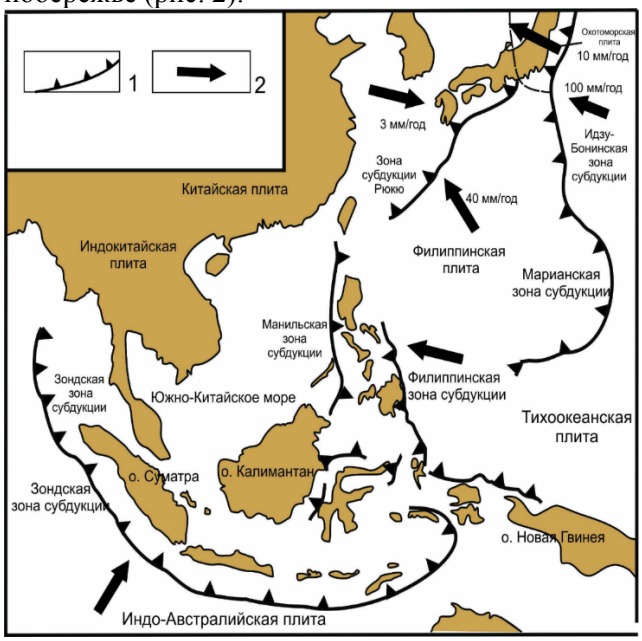


Рис. 1. Схема тектонического взаимодействия литосферных плит в районе Филиппинского моря [3]: 1-зоны субдукции; 2-направление движения литосферных плит; 3- глубоководные желоба.

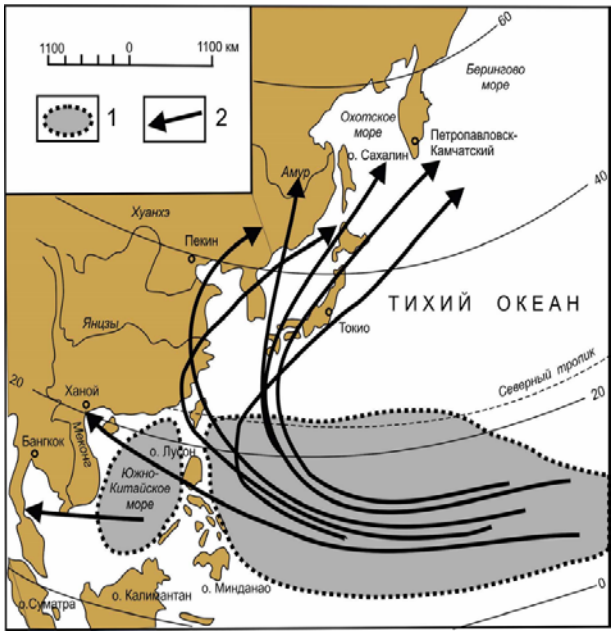


Рис. 2. Направление движения гигантских атмосферных вихрей (тайфунов) в центральной и северо-западной частях Тихого океана [3]: 1-траектория движения циклонических вихрей; 2-зона зпрождения тайфунов и высокой сейсмической активности.

Сильные землетрясения и извержения вулканов являются проявлениями эндогенной активности и в океанах приурочены, в основном, к линейным зонам островных дуг. Сопоставление временных рядов, отражающих долговременные вариации этих событий (около 30 лет наблюдений) не обнаруживают значимой корреляции. Вместе с тем можно заметить, что снижение сейсмической активности (числа сильных землетрясений с $M \geq 6$) в средней части рассматриваемого периода наблюдается на фоне вулканической активизации и, наоборот, активизация вулканов происходит на фоне общего снижения сейсмической активности (рис. 3). Процессы вулканизма и сейсмичности сопровождают глобальный процесс тектонической перестройки земной коры в зонах взаимодействия литосферных плит и, по сути, являются различными способами реализации эндогенной энергии Земли, сопровождающей тектонические перестройки. Возможно, что в районе Филиппинской литосферной плиты, с двух сторон окаймляемой зонами субдукции, выход тектонической энергии

происходит попеременно – либо за счет активизации вулканической деятельности, либо за счет разгрузки накопленного напряжения в форме усиления сейсмической активности. Во всяком случае, мы имеем дело с устойчивой тенденцией отображения на поверхности эндогенных процессов, протекающих на значительной глубине (землетрясения) или визуально наблюдаемых и отчасти угадываемых на дне океана (вулканические извержения).

Рис. 3. Сопоставление 5-летних сумм землетрясений с M≥6 и вулканических извержений в районе Филиппинской плиты в период с 1983 по 2020 гг.

Наряду с высокой эндогенной активностью (сейсмичность и вулканическая деятельность), район Филиппинского моря и его окрестностей представляется одним из участков северо-западной части Тихого океана, наиболее подверженных воздействию катастрофических атмосферных вихрей. Так, за рассматриваемый период с 1983 по 2019 гг. в его пределах наблюдалось перемещение 889 атмосферных вихрей со скоростью ветра до 50 м/с. Вихри зарождаются в экваториальной зоне на широте от 0 до 20 градусов и перемещаются в сторону континента в западном направлении, а затем резко поворачиваются к северу и мигрируют вдоль побережья на север и северо-восток (рис. 2). При этом прослеживается «обратная корреляция» сейсмической и циклонической активности, наиболее заметная в средней части временно́го интервала наблюдений (1999 - 2009 гг.). Скорее всего, причина «зеркальности» заключается, как и для сочетания землетрясения–извержения вулканов, в неодновременной разгрузке накопившегося напряжения «геофизических сил» уже в двух сферах – литосфере и атмосфере (рис. 4). В дополнение следует отметить и взаимосвязь вулканических извержений и циклонической активности (рис. 5). Результаты сопоставления указанных факторов оказываются двойственными. С одной стороны, наблюдается затишье циклонической активности в период с 1993 по 2003 гг. и в то же время имеет место резкое возрастание вулканической активности. С другой стороны, в другом временно́м интервале с 2005 по 2013 гг. почти синхронно с небольшим расхождением по годам «прорисовывается» спад как циклонической, так и вулканической активности.

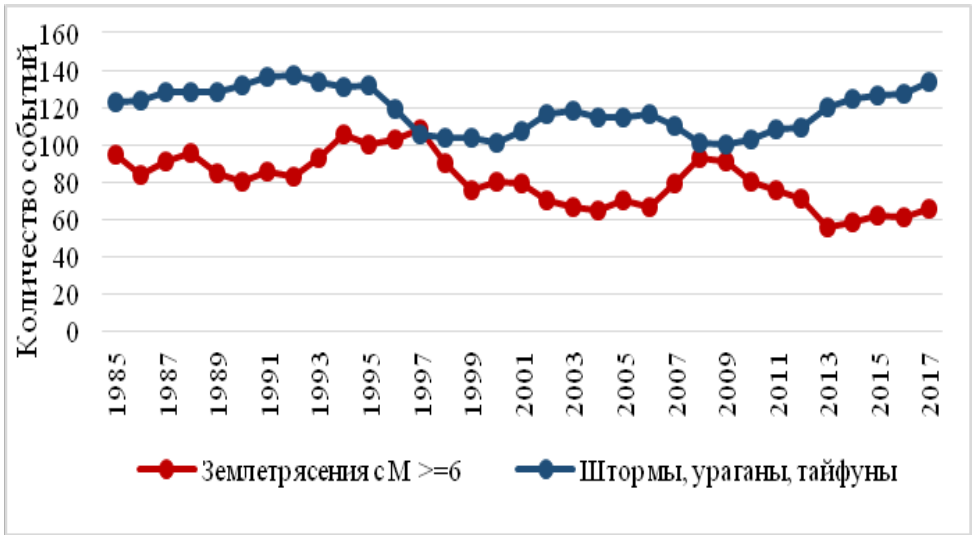


Рис. 4. Сопоставление 5-летних сумм землетрясений с M≥6 и атмосферных вихрей в районе Филиппинской плиты в период с 1983 по 2020 гг.

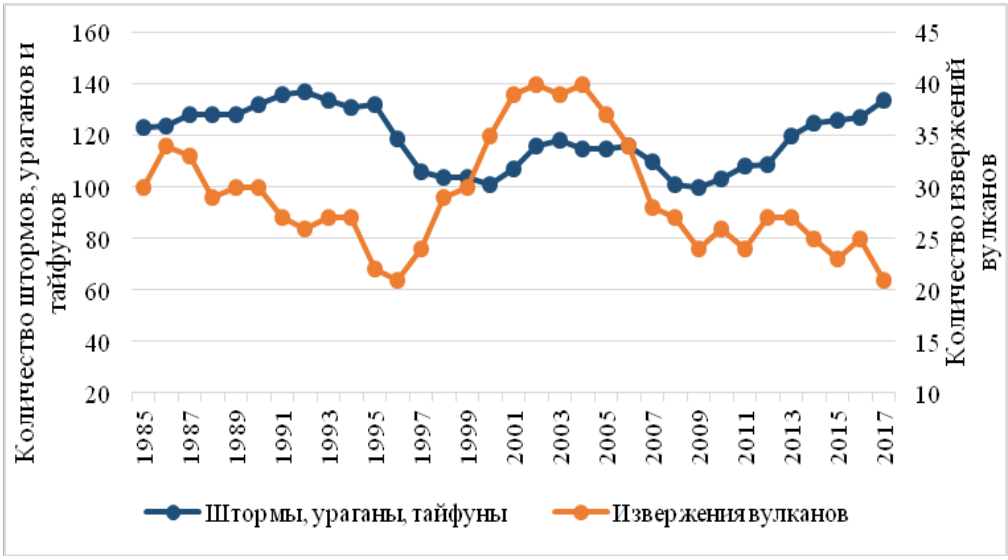


Рис. 5. Сопоставление 5-летних сумм вулканических извержений и атмосферных вихрей в районе Филиппинской плиты в период с 1983 по 2020 гг.

Обсуждение результатов

Результаты анализа тектонической и циклонической активности в северо-западной части Тихого океана, проводившегося в течение более 30 лет, показали вполне закономерную и ожидаемую взаимосвязь между землетрясениями, с одной стороны, и вулканической и циклонической активностью, с другой стороны, а также между проявлениями вулканизма и формирующимися тропическими циклонами. Мы можем наблюдать как явные случаи корреляции (положительной и/или отрицательной), так и случаи так называемой «визуальной» корреляции (когда очень хочется ее увидеть!). При этом если в отношении связки «землетрясения-вулканы» многое представляется понятным (?), то, что касается циклонической активности, все оказывается не таким простым.

Происхождение тропических атмосферных вихрей с высокой скоростью ветра – это еще одна проблема, пока не вполне объяснимая в рамках действующих климатических моделей. В общем виде можно отметить, что для образования и поддержания урагана необходим постоянный источник избыточной энергии. Отмечено, что для Филиппинского моря характерна высокая плотность теплового потока, обусловленная неглубоким положением астеносферы. Наибольшие величины теплового потока до 2 Вт/м^2 установлены в Марианском троге, в центральной части которого в 1987 г. были обнаружены обширные зоны эманации флюидов, разогретых до 285^{0}С. В частности, под современными рифтовыми структурами Марианского трога изотермы 1000–1200^{0}С расположены наиболее высоко, достигая уровня земной коры. Однако физика ураганов, механизм их формирования остается все еще не вполне понятным. В соответствии с наблюдениями, показывающими, что ураганы обычно рассеиваются над сушей и в высоких широтах, такой источник энергии следует искать во влажном воздухе, который поднимается над поверхностью теплого океана. Теплота, выделяющаяся при конденсации воды, возможно, обеспечивает ураганы необходимой энергией.

Считается, что атмосферные процессы осуществляются только за счет излучения Солнца и энергетически независимы от глубинных источников. Гидрометеорология строго придерживается схеме теплового баланса Земли и классическому алгоритму теплопереноса – верхний слой океана в тропической зоне нагревается и уходит на север, чтобы там, охладившись, вновь вернуться к экватору. И это все при нулевом тепловом балансе Земли [1]. Возникают вопросы: откуда берется энергия для избыточного разогрева воздушных масс с большим содержанием поднятой вихрем воды, которые время от времени «радуют» народы, населяющие северо-восточное побережье и соседствующие с ними архипелаги Тихого океана, достаточно ли нагрева приповерхностного слоя воды в океане глубиной от 100 до 500 м, чтобы «закрутить» разрушительный вихрь, перемещающийся на большие расстояния и несущий суточную энергию от 10^{17}до 10^{19} Дж при средней продолжительности существования от 6-8 до 18 суток? Поиск ответа на эти вопросы заставляет посмотреть, нет ли иных, кроме Солнца, источников тепла, инициирующих циклоническую активность.

Наиболее интересным предположением является возможность «долевого участия» тепловых потоков, разгружающихся на дне Тихого океана через трещины или действующие вулканы. Если на

суше ежегодно в результате 20-30 вулканических извержений на поверхность поступает в среднем до 1.5 км^3 магматического расплава, то за это же время из подводных вулканов извергается 18-23 км^3 лавы. Подводные вулканы создают вертикальные гидротермальные струи, вода в которых нагрета до температуры в несколько сотен градусов. В последнее время вулканическая деятельность планеты активизировалась, что потребовало учитывать вклад действующих подводных вулканов при создании климатических моделей. При изучении тропических тайфунов неизбежно возникает вопрос, достаточно ли нагрева приповерхностного слоя воды в океане глубиной до 100-500 м, для того, чтобы «закрутить» разрушительный вихрь, перемещающийся на большие расстояния и несущий суточную энергию от 10^{17}до 10^{19} Дж при средней продолжительности существования от 6-8 до 18 суток? Поиск ответа заставляет посмотреть, нет ли иных, кроме Солнца, источников тепла, инициирующих циклоническую активность [2]. В итоге, замыкая систему «океан – атмосфера» только на внешнюю энергетическую подпитку от Солнца, исследователи сталкиваются с проблемами при попытках объяснения целого ряда явлений и процессов, включая и глобальные квазипериодические осцилляции теплоотдачи Мирового океана, и атмосферные явления эпизодического характера, такие как тропические циклоны.

Следует отметить, что работ, в которых содержатся результаты исследований, касающиеся сейсмичности и вулканической активности в пределах Тихого океана, достаточно много. Однако о теплогенерирующей деятельности подводных вулканов с выходом теплового потока к поверхности океанов работ не так много. И еще меньше попыток как-то связать подводный активный вулканизм с сейсмической активностью участков морского дна. Представляется целесообразным осуществить комплексный анализ сейсмотектонической и вулканической активности в сочетании с изучением геотермических характеристик процессов подводного вулканизма. Создается впечатление, что тропические циклоны в определенной мере «управляются» деятельностью подводных вулканов. Это проявляется, например, в резком изменении к северу траектории вихрей при приближении к западному побережью Тихого океана. Похоже, что имеет место «подогрев» верхнего водного слоя, поступление дополнительной энергии. Такая точка зрения не должна быть проигнорирована. Это позволит оценить вклад каждого из упомянутых факторов в формирование общей атмо- гидро-термальной обстановки в пределах «традиционных» областей зарождения и движения тропических циклонов разрушительной силы. Это также даст возможность решить целый ряд фундаментальных (академических, теоретических) и практически интересных задач.

Современный мир очень неустойчив с точки зрения проявлений стихии. Мы недостаточно полно представляем жизнь Земли как планетного тела, недооцениваем роль эндогенных процессов, которые, наряду с солнечной радиацией и иными космическими факторами, определяют настоящее и будущее планеты. Большинство исследователей в области наук о Земле до сих пор верят тому, что основной источник энергии, приводящий в движение тепловую машину Землю – это Солнце и что планету изнутри разогревают радиоактивные элементы и пока горячее ядро. Однако это может быть не совсем так. Солнце не является единственным источником процессов, наблюдаемых нами процессов в различных сферах Земли и околоземном пространстве. Оценка воздействия космических и планетарных факторов на Землю энергетически оценивается в 10^{16}-10^{25}Дж. Землетрясения, извержения вулканов, циклоны, «разгоняющиеся» до энергии 10^{16}-10^{18} Дж, близки к энергетическому уровню пока неподвластных природных факторов. Следует также заметить, что «рукотворная энергетика» вышла на уровень 10^{16} Дж/г. Все это следует иметь в виду, если ставить задачу «управления природой» и одновременно руководствоваться желанием сберечь ее и, таким образом, обеспечить человечеству будущее на планете Земля.

Список литературы

1. *Будыко М. И., Герасимов И. П.* Тепловой и водный баланс земной поверхности, общая теория физической географии и проблема преобразования природы. Тр. 3-го съезда Геогр. о-ва СССР. Л.: Геогр. о-во СССР, 1959. 18 с.

2. *Галанин А.В.* Эндогенное тепло Земли подогревает океан и влияет на климат, 2011. Интернет-ресурс URL: http://ukhtoma.ru/seevulkan.htm (дата обращения 09.02.2021).

3. *Жигалин А. Д., Архипова Е. В., Харькина М. А.* Подводный вулканизм как одна из причин циклонической активности центральной части Тихого океана // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». 2018. № 4 (41). С. 14–21.

4. *Шейдеггер А.Е.* Физические аспекты природных катастроф: Пер. с англ. М.: Недра, 1981. 232 с.

УДК 550.34

ВАРИАЦИИ ПОЛЯ ФОНОВОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА В РАЙОНЕ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА ПО ДАННЫМ 2011-2021 гг.

Копылова Г.Н.[1], Касимова В.А.[1], Любушин А.А.[2], Таранова Л.Н.[1]

[1] Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая Геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, vika@emsd.ru
[2] Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва

Введение

Актуальным направлением исследований, особенно для высокосейсмичной территории Камчатского края и сопредельных районов Дальнего Востока России, является развитие методов обработки непрерывных сейсмических записей для повышения эффективности их использования в решении задач геофизического мониторинга и диагностики признаков подготовки сильных землетрясений. Техническое развитие системы сейсмологических наблюдений в Дальневосточном регионе России в XXI в. [7, 8] обеспечило условия для изучения вариаций сейсмического шума, непрерывно регистрируемого на сети широкополосных станций ФИЦ ЕГС РАН, и оценки сейсмопрогностического потенциала таких данных. С 2011 г. авторами, с использованием методики и программных средств, созданных А.А. Любушиным, проводятся исследования сейсмопрогностических свойств фонового сейсмического шума (ФСШ), регистрируемого на вертикальных каналах сети из 21 широкополосных станций ФИЦ ЕГС РАН в районе п-ва Камчатка, Командорских о-вов и о-ва Парамушир (рис. 1). В работах [2, 4, 6] приведены данные о расположении сети станций, ее геометрии, регистрирующей аппаратуре, фрагменты волновых форм шума и их спектральные характеристики.

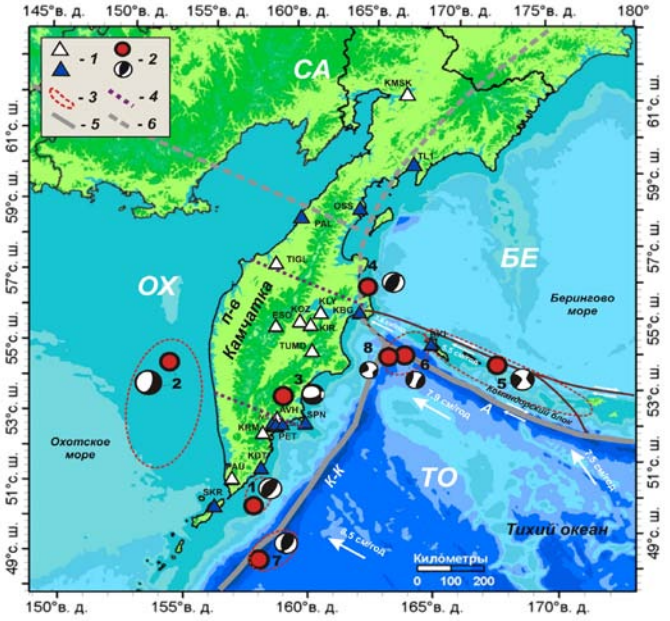


Рис. 1. Карта района работ с расположением сейсмостанций и эпицентров землетрясений, M_w = 6.6 – 8.3 (табл. 1) с элементами тектоники, орографии и батиметрии: *1* – сейсмостанции с указанием их кодов; *2* – эпицентры землетрясений и их механизмы; *3* - области очагов землетрясений по афтершокам первых суток; *4* – границы выделенных групп станций – северной, центральной, южной; *5* - северо-западная и северо-восточная границы Тихоокеанской (*ТО)* плиты: Курило-Камчатский (*К-К*) и Алеутский (*А*) глубоководные желоба; *6* – граница Северо-Американской *(СА*) плиты и малых литосферных плит Беринга *(БЕ)* и Охотская *(ОХ)*. Белыми стрелками указано направление движения *ТО* и Командорского блока плиты *БЕ*.

Таблица 1. Данные о землетрясениях 2011-2021 гг. с $M_w \geq 6.6$ (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes).

№	Дата дд.мм.гггг	Название/район	Время чч:мм:сс	Координаты		*H*, км	M_w	M_0, $H \cdot м \cdot 10^{20}$	Сутки от 01.01. 2011г.
				°*N*,	°*E*				
1	28.02.2013	Южно-Камчатское	14:05:50	50.95	157.28	41	6.9	0.2	790
2	24.05.2013	Охотоморское	05:44:48	54.89	153.22	598	8.3	38.4	875
3	30.01.2016	Жупановское	03:25:12	53.98	158.55	177	7.2	0.8	1856
4	29.03.2017	Южно-Озерновское	04:09:24	56.94	162.79	17	6.6	0.1	2280
5	17.07.2017	Ближне-Алеутское	23:34:13	54.44	168.86	10	7.7	5.2	2390
6	20.12.2018	Углового поднятия	17:01:55	55.10	164.70	17	7.3	1.0	2911
7	25.03.2020	Северо-Курильское	02:49:21	48.97	158.69	58	7.5	2.0	3372
8	16.03.2021	Кроноцкий п-в	18:38:21	54.74	163.18	14	6.6	0.1	3728

Примечание: *H* — глубина гипоцентра; M_W — «моментная» магнитуда землетрясения или магнитуда по Канамори; M_0 — сейсмический момент землетрясения.

Рассматривались нелинейные статистики временных рядов сейсмического шума, включающие величины ширины носителя спектра сингулярности $\Delta\alpha$, обобщенной экспоненты Херста α^*, минимальной нормализованной энтропии распределения квадратов ортогональных вейвлет-коэффициентов *En* и вейвлетной спектральной экспоненты β, оцениваемые по суточным 1-минутным записям сейсмических сигналов на каждой станции сети. В работах [2, 4-6, 9] дано детальное описание вычислений указанных статистик сейсмического шума, построение и принципы анализа соответствующих временных рядов и карт их пространственного распределения; рассмотрены пространственно-временные особенности изменений статистик шума в связи с землетрясениями 2013 - 2018 гг. с $M_w \geq 6.6$.

Целью многолетних исследований является разработка метода прогнозирования землетрясений с величинами магнитуд порядка 7-8 и более [4]. В основу работы положены общие идеи о поведении динамических систем на стадии подготовки критического перехода в их состоянии из теорий катастроф и критических явлений применительно к анализу поведения статистик ФСШ в связи с сильными землетрясениями [1, 5, 10]. Главное внимание уделяется диагностике изменений характера случайных флуктуаций и увеличения эффектов синхронизации в поведении поля ФСШ при приближении к критическому явлению (сильному землетрясению), проявляющемуся в упрощении структуры временных рядов параметров ФСШ из-за потери ими мульти-фрактальности и увеличения энтропии. Для диагностики таких явлений производится построение набора карт распределения отдельных статистик ФСШ за различные интервалы времени – от суток до месяцев и лет, а также расчет графиков медианных значений статистик ФСШ, оцениваемых по всей сети станций. Карты и графики медианных значений с их сейсмопрогностической интерпретацией приводятся в публикациях [2, 4, 6], а также на рис. 2 и рис. 3*а*.

В качестве дополнительного признака (флага) подготовки сильного землетрясения, также рассматривается увеличение пространственных корреляций или частотно-зависимых когерентностей комплекса статистических параметров шума. Для этого проводилось построение частотно-временных диаграмм эволюции спектральной меры когерентного поведения $\nu(\tau, \omega)$ различных свойств ФСШ [2]. Величина $\nu(\tau, \omega)$ представляет модуль произведения покомпонентных канонических когерентностей 4-хмерного ряда статистик ФСШ, в зависимости от частоты ω, сут$^{-1}$ и временной координаты правого конца скользящего временного окна длиной 1 год (365 сут) с шагом 3 сут (рис. 3*б*). Рост величины $\nu(\tau, \omega)$ в некотором частотно-временном диапазоне может свидетельствовать о повышении коррелированности, росте синхронных вариаций и упрощении структуры поля ФСШ, предшествующем сильным землетрясениям.

С 2011 по июнь 2021 гг. в районе (рис. 1) произошли восемь землетрясений с M_w=6.6 – 8.3 (табл. 1), в т. ч. мантийное Охотоморское землетрясение 24 мая 2013 г. с M = 8.3 и Ближне-Алеутское землетрясение 17 июля 2017 г. с M = 7.7. В результате предыдущих исследований авторами были выделены характерные особенности в изменении статистик ФСШ на стадиях подготовки землетрясений 2013-2020 гг., проявляющиеся, главным образом, в уменьшении мультифрактальных параметров и в увеличении энтропии *En* в течение месяцев – первых лет. Сделанные ранее заблаговременные и ретроспективные прогнозы авторов относительно районов возникновения сильных землетрясений, приведенные в публикациях [2, 6], в целом оправдались. Так, например, оба из двух сильнейших землетрясений с M = 8.3 и 7.7 произошли в указанном диапазоне широт 53-58°с.ш., определенном по пространственному распределению статистик ФСШ за период 2011-2016 гг. Это позволило, начиная с 2020 г., перейти к ежеквартальным оценкам опасности сильных землетрясений с указанием наиболее вероятных мест их возникновения. Соответствующие заключения передавались в Российский экспертный совет по прогнозу землетрясений и в его Камчатский филиал. В частности, указывалось, что в середине 2019 г. произошло существенное изменение структуры поля ФСШ, показывающее смещение области опасности сильных землетрясений в южную часть района (диапазон широт 50-54° с.ш., рис. 2*а, б*, карты справа). При этом Северо-Курильское землетрясение (№7, рис 1, 2), произошедшее 25 марта 2020 г., рассматривалось как одно из возможной серии сильных сейсмических событий в южной части территории [4].

В настоящей работе представлены предварительные результаты развития методики мониторинга поля ФСШ с целью повышения обоснованности заблаговременных (месяцы – первые годы) оценок мест возникновения сильных землетрясений. Для этого были изучены эффекты когерентного (коллективного, синхронного) поведения статистик ФСШ в частотно-временной области в сравнении с произошедшими землетрясениями (табл. 1) с использованием данных по всей сети станций (рис. 3 *б*) и по их трем отдельным группам станций - северной, центральной и южной,

выделенным с учетом тектонических особенностей территории [3] и конфигурации сети. Кроме территориальной принадлежности станций, учитывалось влияния микросейсмических шумов вследствие берегового эффекта (континентальная и прибрежная группа станций) и активности действующих вулканов (группы вулканических и невулканических станций) (табл. 2). Разбиение станций на группы проводилось в целях оценки вклада конфигурации сети и сейсмотектонических условий района, а также влияния микросейсм океанического и вулканического происхождения, на особенности проявления эффектов когерентности в вариациях поля ФСШ на стадиях подготовки землетрясений.

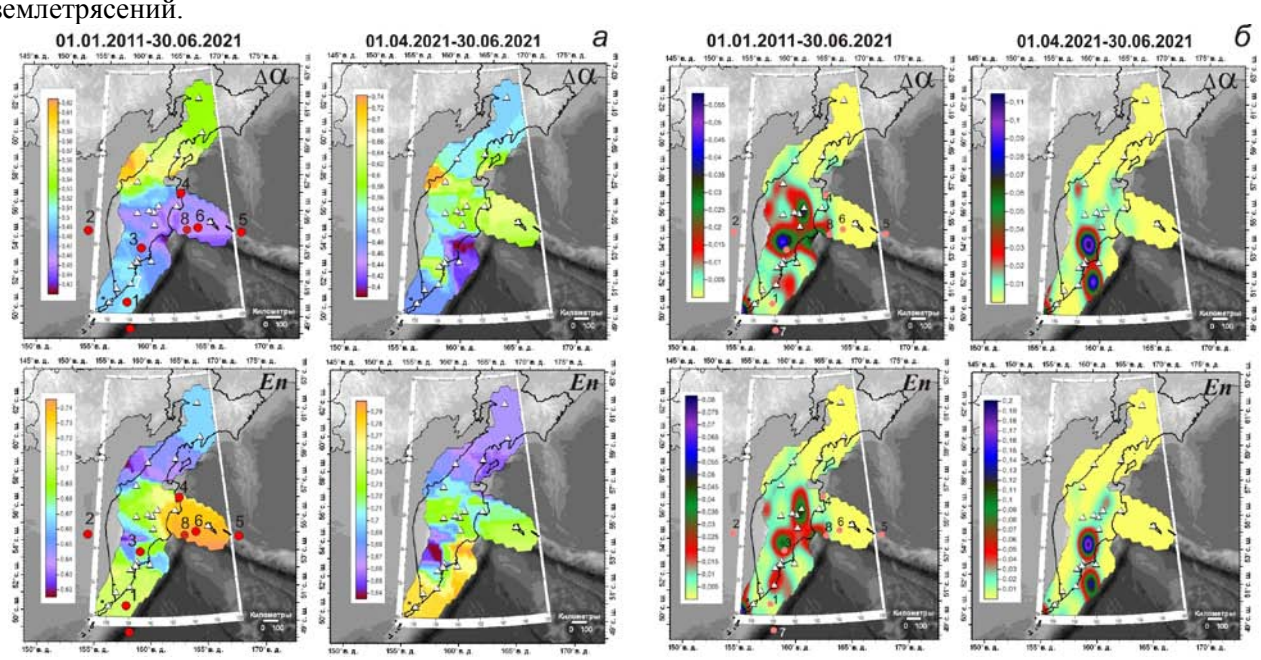


Рис. 2. Карты распределения (*а)* и карты плотности вероятности распределения минимальных значений $\Delta\alpha$ и максимальных значений *En* (*б*) за весь период наблюдений с 2011 по июнь 2021 гг. («фоновые» карты, слева) и за второй квартал 2021 г. (справа) с учетом конфигурации сети станций. Области повышенной опасности сильных землетрясений соответствуют пониженным значениям $\Delta\alpha$ и повышенным значениям *En*. Красные кружки – эпицентры землетрясений (табл. 1).

Таблица 2. Распределение станций по группам – северная, центральная, южная, с учетом числа станций, подверженных влиянию морского волнения (прибрежные станции) и вулканической активности (вулканические станции)

Группы станций факторы влияния*	**Все станции, N= 21(100%)**	**Северная, N=5(100%)**	**Центральная, N = 7(100%)**	**Южная, N=9(100%)**	**Невулканические , N=15(100%)**
прибрежные, n (%)	11(52%)	3(60%)	2(29%)	6(67%)	10(67%)
вулканические, n(%)	6(29%)	-	4(57%)	2(22%)	-

Примечание: * - символом «n» обозначено число станций, в скобках указан % от общего числа станций N в группе.

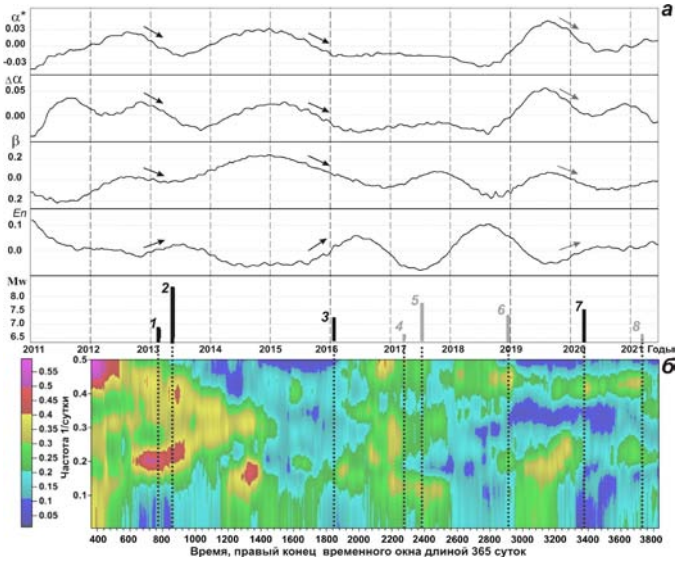


Рис. 3. Графики изменения медианных значений (*а)* и частотно-временные диаграммы спектральной меры когерентности $\nu(\tau, \omega)$ (*б*), построенные по данным для всей сети станций. **Черным цветом** обозначены номера землетрясений (табл. 1), произошедшие в области Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны; серым цветом показаны номера землетрясений, произошедших в области сочленения К-К и Алеутской островных дуг. Черными стрелками на рис. *а* отмечены синхронные изменения параметров ФСШ перед землетрясениями 2013 и 2016 гг. (№№ 1-3) по [2]; серыми - аналогичные изменения во второй половине 2019 – 2020 гг., предшествующие Северо-Курильскому землетрясению (№ 7).

Развитие методики исследований

1. Со второй половины 2020 г. построение карт распределения статистик ФСШ осуществляется с учетом конфигурации сети станций, расположенной в континентальных районах п-ова Камчатка, о-вов Беринга и Парамушир. Для этого в области мониторинга закраска распределения статистик ФСШ производилась лишь в районах, расположенных на расстояниях не более среднего расстояния между станциями сети (120 км) (рис. 2).

2. На рис. 1 показаны границы, разделяющие станции сети на три группы – северная, центральная и южная; в таблице 2 дана характеристика распределения станций по трем группам с учетом числа станций, подверженных влиянию морского волнения (прибрежные станции) и вулканической активности (вулканические станции).

На рис. 4 *а* приводятся графики изменения медианных значений статистик ФСШ, на рис. 4 *б* - частотно-временные диаграммы спектральной меры когерентности $\nu(\tau, \omega)$, рассчитанные по 4-хмерным временным рядам суточных медианных значений α^*, $\Delta\alpha$, β и En для каждой из трех групп станций за весь период наблюдений. По таким диаграммам выделялись интервалы времени и частотные полосы проявления максимальных значений $\nu(\tau, \omega)$, показывающие рост когерентности в изменениях всех четырех статистик шума.

При ретроспективном анализе карт и графиков фиксировались эффекты уменьшения величин α^*, $\Delta\alpha$, β и увеличения величины En, показывающие повышение сейсмической опасности и угрозу возникновения сильного землетрясения с M порядка 7 и более.

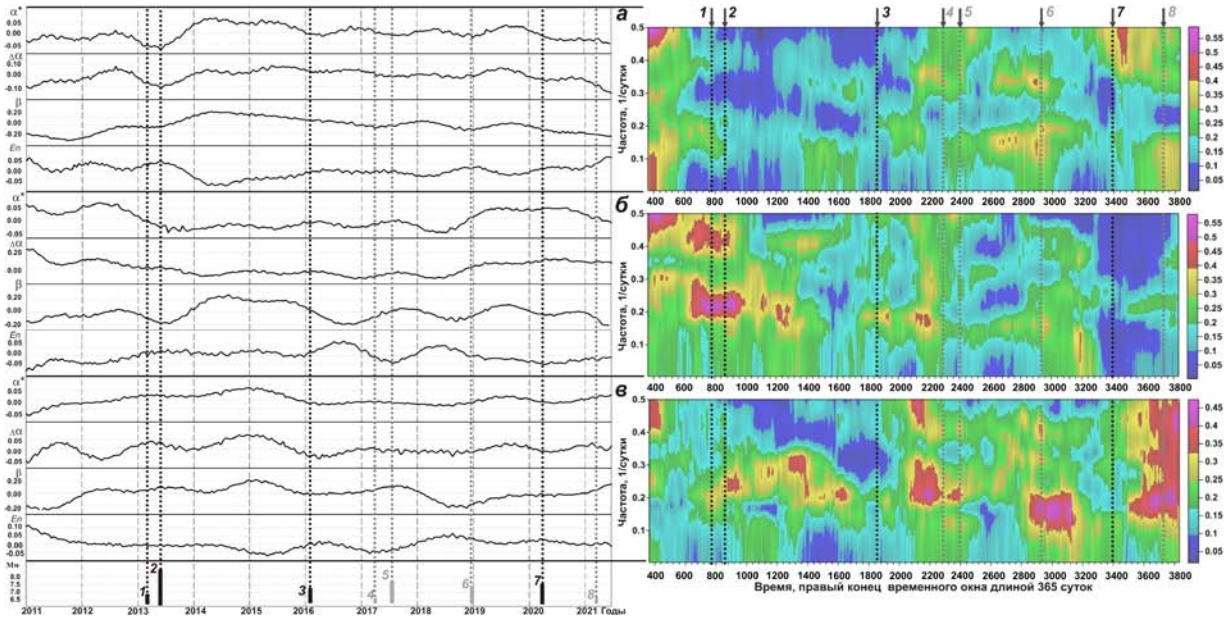


Рис. 4. Графики изменения медианных значений (слева) и частотно-временные диаграммы $\nu(\tau, \omega)$ (справа) для групп станций: северная (*а*), центральная (*б*), южная (*в*) в сопоставлении с землетрясениями (табл. 1). Черным цветом обозначены номера землетрясений, произошедшие в области К-К сейсмофокальной зоны; серым цветом показаны номера землетрясений, произошедших в области сочленения К-К и Алеутской островных дуг.

Обсуждение результатов

Главной особенностью проявления эффектов синхронизации параметров ФСШ является рост величины $\nu(\tau, \omega)$ на периодах 3.5-5 суток за 5-8 месяцев до возникновения сейсмических событий с $M_w \geq 7.5$, в частности, перед Охотоморским, Ближне-Алеутским и Северо-Курильским землетрясениями (рис. 3). Было обнаружено, что такие эффекты синхронизации перед указанными событиями наиболее четко выражены при использовании записей с сети сейсмостанций, расположенных вне влияния микросейсм, связанных с актитвностью действующих вулканов (табл. 2). В меньшей степени эффекты синхронизации в изменениях параметров ФСШ проявлялись при использовании записей со станций, расположенных в прибрежной зоне или вблизи действующих вулканов в стадии их активизации.

Анализ частотно-временных диаграмм $\nu(\tau, \omega)$ (рис. 4) показывает, что наиболее выраженный эффект роста когерентности в изменениях статистик ФСШ проявился для станций южной группы с октября 2020 г. по настоящее время (рис. 4 *в*). Это согласуется с распределением статистик $\Delta\alpha$ и En во втором квартале 2021 г. (рис. 2 *а,б*, карты слева), на которых область опасности сильных

землетрясений смещена в южный район Камчатской сейсмоактивной зоны, а также с выданным в феврале 2021 г. сейсмопрогностическим заключением о повышении опасности сильных землетрясений в этом районе.

Неожиданным эффектом оказалось то, что на графиках медианных значений статистик для выделенных трех групп станций (рис. 4, графики слева), признаки повышенной опасности сильных землетрясений присутствуют для северной и центральной групп станций (рост величины *En* и уменьшение величин мультифрактальных параметров) при их отсутствии для южной группы станций.

Выводы

При интерпретации эффектов роста величины $\nu(\tau, \omega)$, необходимо учитывать шумовое влияние вулканической деятельности на станциях, расположенных вблизи вулканов в стадиях активизации, а также морских волнений на прибрежных станциях. Подготовка сильных землетрясений проявляется в увеличении когерентности вариаций параметров ФСШ, в основном, на периодах 3.3-5.3 сут, в то время как эффекты когерентности вулканического генезиса могут проявляться в более широком диапазоне периодов.

С середины 2019 г. в пространственном распределении статистик ФСШ произошли существенные изменения (рис. 2), показывающие смещение области опасности сильных землетрясений в южную часть района (диапазон широт 50 - 54 °с.ш.). Южнее этого района произошло землетрясение с M_w =7.5 (№7, рис. 1, 2). Однако, «опасная» область не претерпела значительных изменений, и по данным текущей обработки данных ФСШ южный район продолжает выделяться, как область повышенной опасности сильного землетрясения.

По поведению медианных значений параметров ФСШ, построенным по всем станциям сети (рис. 3 *а*), перед событиями 2013, 2016 и 2020 гг. (№№ 1-3, 7) в Курило-Камчатской сейсмофокальной зоне в течение 3-8 мес. проявлялись выраженные эффекты их синхронного изменения в соответствии с сейсмопрогностическим алгоритмом – понижение величин мультифрактальных параметров α^*, $\Delta\alpha$, β и увеличение *En*. Перед землетрясениями в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской сейсмоактивных зон (№№ 4-6, 8) эффект синхронизации параметров ФСШ практически не проявлялся. Возможно, это связано с различием сейсмотектонических условий возникновения землетрясений либо с более низкой плотностью сети сейсмостанций в северной части района.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/, http://www.gsras.ru/unu/).

Список литературы

1. *Гульельми А.В.* Форшоки и афтершоки сильных землетрясений в свете теории катастроф // УФН. 2015. Т. 185. № 4. С. 415–429.

2. *Касимова В.А., Копылова Г.Н., Любушин А.А.* Вариации параметров фонового сейсмического шума на стадиях подготовки сильных землетрясений в Камчатском регионе // Физика Земли. 2018. № 2. С. 81–95.

3. *Кожурин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К.* Активная разломная тектоника юга центральной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. 12. С. 10–27.

4. *Копылова Г.Н., Любушин А.А., Таранова Л.Н.* Новая прогностическая технология анализа вариаций низкочастотного сейсмического шума (на примере районов Дальнего Востока России) // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т.3. №1. С. 75–91.

5. *Любушин А.А.* Прогноз Великого Японского землетрясения // Природа. 2012. №8. С. 23–33.

6. *Любушин А.А., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Таранова Л.Н.* О свойствах поля низкочастотных шумов, зарегистрированных на Камчатской сети широкополосных сейсмических станций // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. №2. Вып. 26. С. 20–36.

7. *Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеенко Е.А. и др.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91.

8. *Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.

9. *Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.

10. *Lyubushin A.A*. Low & Frequency Seismic Noise Properties in the Japanese Islands / Entropy. 2021. 23(4). 474. https://doi.org/10.3390/e23040474.

УДК 550.34

АНОМАЛИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ: НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА

Копылова Г.Н.[1], Серафимова Ю.К.[1], Любушин А.А.[2]

[1]Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru
[2]Институт физики Земли РАН, г. Москва

Введение

Проводится верификация гипотезы об аномальных изменениях метеопараметров на финальной стадии подготовки сильного землетрясения [2] на примере высокосейсмичного района Камчатки. Рассматривались вариации среднесуточных температур воздуха (Т) и атмосферного давления (АД) на метеостанции Пионерская Камчатского УГМС (Камчатский край, Елизовский район) с 04.11.1996 по 27.01.2021 гг. (24.2 лет) в связи с местными землетрясениями, вызвавшими ощутимые сотрясения в г. Петропавловске-Камчатском.

Использовались следующие данные: 1 – выборка землетрясений, вызвавших сотрясения в г. Петропавловске-Камчатском интенсивностью не менее $I = 4$–5 баллов по шкале MSK-64 из макросейсмического каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН [http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/macrosei.php; 4, 5]. Всего таких событий оказалось 12 (рис. 1, таблица 1). Координаты эпицентров, время, глубины, энергетические классы *K*s приводятся по каталогу КФ ФИЦ ЕГС РАН; d_e, км – эпицентральное расстояние до м/ст. Пионерская; L, км – величины максимальных линейных размеров очагов, рассчитанные по формуле $\lg L = 0.440 \cdot M_W - 1.289$ [3]. Значения магнитуд M_W взяты из каталога NEIC (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/).

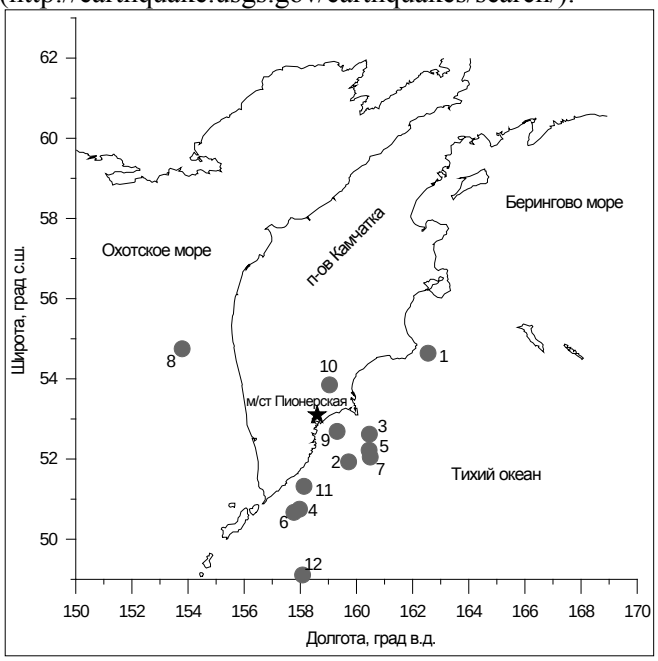


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений за период 04.11.1996 – 27.01.2021 гг., вызвавших сотрясения в г. Петропавловске-Камчатском $I_{MSK\text{-}64}$ 4–5 баллов (нумерация согласно табл. 1). Звездочкой показано положение м/ст. Пионерская.

2 – среднесуточные величины Т и АД, полученные путем осреднения трехчасовых значений по восьми срокам (рис. 2).

3 – среднегодовые сезонные функции X_i, где i = 1,2,… 365 (366), параметров Т и АД, полученные путем осреднения значений каждого из параметров на каждый день календарного года (рис. 3), среднеквадратические отклонения σ_i и диапазоны изменения $X_i \pm \sigma_i$, $X_i \pm 2\sigma_i$.

Методика выделения «метеоаномалий»

Аномалии в поведении метеопараметров Т и АД выделялись по рядам среднесуточных значений с учетом их величин на соответствующий день года по среднесезонным функциях. В качестве «аномалий» принимались значения метеопараметров, выходящие за диапазон $X_i \pm \sigma_i$ и $X_i \pm 2\sigma_i$, где X_i – среднее суточное значение величины метеопараметра на каждый день календарного года, i = 1, ..365 (366) (среднесезонная функция), σ_i – среднее квадратическое отклонение величины метеопараметра для каждого дня календарного года. Рассматривались как повышения, так и понижения, на интервале времени одна неделя перед землетрясением. (рис. 4).

Таблица 1. Параметры землетрясений, вызвавших сотрясения в г. Петропавловске-Камчатском интенсивностью $I \geq 4$–5 баллов, 04.11.1996 – 27.01.2021 гг.

N	Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс	Координаты		Глубина, км	K_s	M_W*	d_e, км	L, км	$M/\lg d_e$	Балл в ПТР по шкале MSK-64
			φ, °N	λ, °E							
1	05.12.1997	11:26:51	54.64	162.55	10	15.5	7.8	308	139	3.13	5–6
2	08.03.1999	12:25:43	51.93	159.72	7	14.3	6.9	149	56	3.18	5
3	08.10.2001	18:14:26	52.62	160.46	31	13.8	6.5	135	37	3.05	4–5
4	24.08.2006	21:50:34	50.75	157.97	38	14.3	6.5	262	37	2.69	4–5
5	30.07.2010	03:56:10	52.22	160.45	38	14.1	6.3	157	30	2.87	4–5
6	28.02.2013	14:05:48	50.67	157.77	61	15.2	6.9	273	56	2.83	4–5
7	21.05.2013	05:43:17	52.05	160.49	48	14.4	6.1	172	25	2.73	4–5
8	24.05.2013	05:44:47	54.75	153.79	630	17.0	8.3	362	231	3.24	5
9	19.02.2015	16:32:46	52.69	159.31	90	13.8	5.4	65	12	2.98	4–5
10	30.01.2016	03:25:08	53.85	159.04	178	15.7	7.2	87	76	3.71	4–5
11	06.07.2018	01:40:04	51.32	158.13	75	14.9	6.1	192	25	2.67	4–5
12	25.03.2020	02:49:20	49.11	158.08	47	16.8	7.5	441	103	2.84	4–5

Примечание: * – магнитуды M_w приводятся по каталогу Геологической службы США [https://earthquake.usgs.gov]

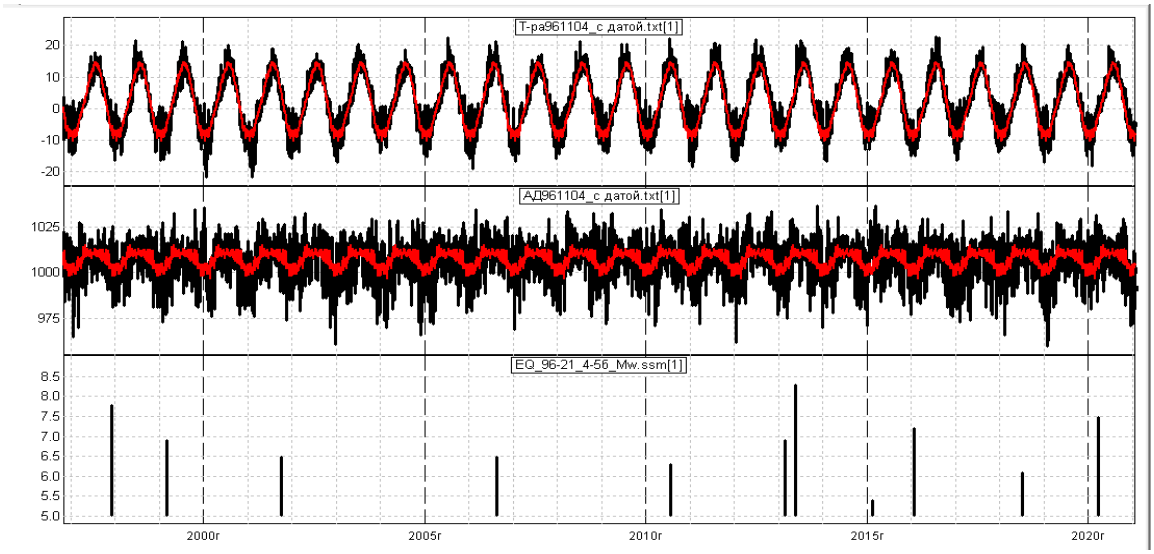


Рис. 2. Ряды среднесуточных значений температуры воздуха (Т, верхний график, черный цвет) и атмосферного давления (АД, средний график, черный цвет) за период 04.11.1996 – 27.01.2021 гг. в сопоставлении с землетрясениями (табл. 1) (нижний график). Красной линией показаны среднесезонные функции Т и АД.

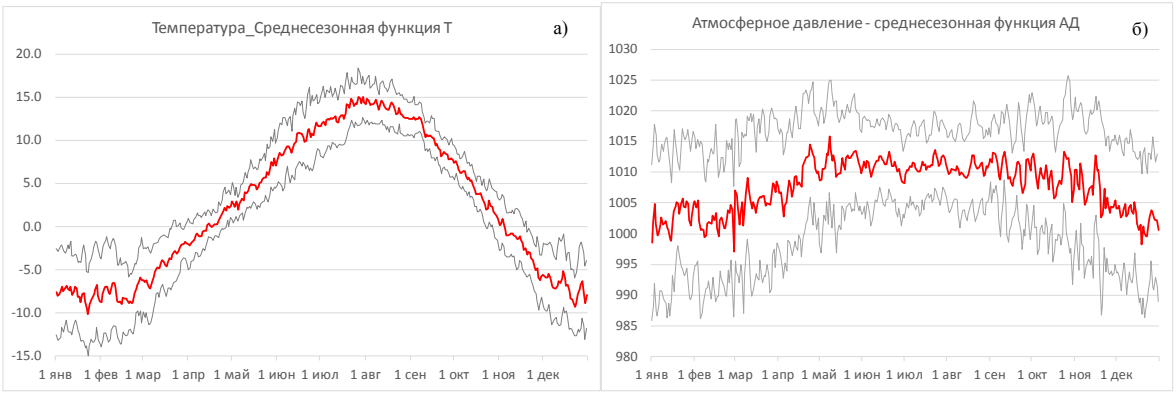


Рис. 3. Среднесезонные функции Т (а) и АД (б) (красные линии) для периода наблюдений 04.11.1996 – 27.01.2021 гг., метеостанция Пионерская (Камчатский край, Елизовский район). Серыми линиями показан диапазон $X_i \pm \sigma_i$.

Рассматривались 9 рабочих гипотез об изменении метеопараметров перед землетрясениями, в т. ч. о повышении или понижении Т или АД (1–4), о повышении одного и понижении другого

параметра (5–6), о повышении или понижении обоих параметров (7–8) на интервале одна неделя, а также гипотеза об аномальном изменении АД ($X_i \pm 2\sigma_i$) на интервале 1 мес. до землетрясения (9).

Таблица 2. Результаты проверки гипотез о связи «метеоаномалий» с подготовкой землетрясений (EQ, табл. 1)

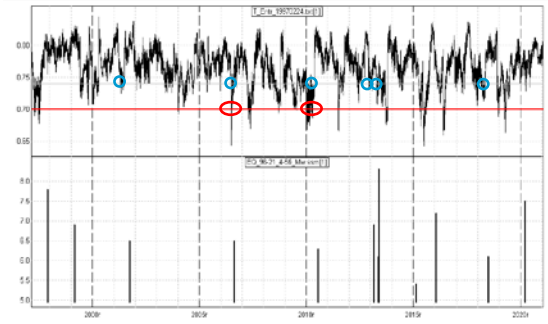
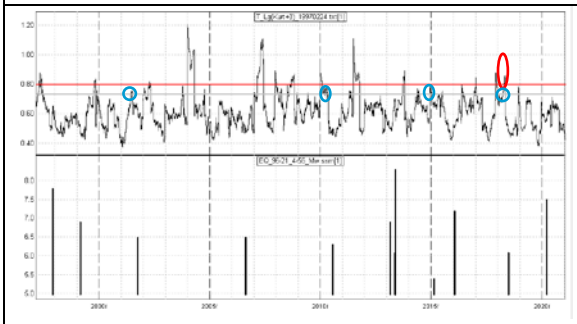
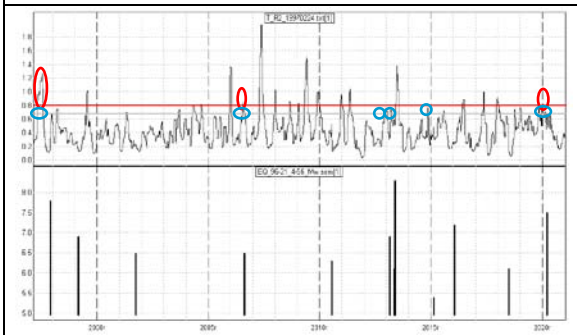
N	Гипотеза	Соответствующие гипотезе землетрясения	Δ, заблаговременность проявления «метеоаномалии» до EQ, сут	Оценка связи надежность / достоверность	Примечания
1	Повышение среднесуточной температуры воздуха (Т) за 1σ на недельном интервале перед EQ	08.03.1999 г. 24.08.2006 г. 19.02.2015 г. 25.03.2020 г.	1 5 6 4	0.33 / 0.008	В четырех случаях из 12 происходило повышение среднесуточной температуры воздуха за 1σ за 1–6 сут до EQ.
2	Понижение среднесуточной температуры воздуха (Т) за 1σ на недельном интервале перед EQ	05.12.1997 г. 08.10.2001 г. 30.07.2010 г. 28.02.2013 г. 21.05.2013 г. 24.05.2013 г. 30.01.2016 г.	2 3 7 0 3 6 1	0.58 / 0.007	В семи случаях из 12 происходило понижение среднесуточной температуры воздуха за 1σ за 0–7 суток до EQ.
3	Повышение среднесуточного атмосферного давления (АД) за 1σ на недельном интервале перед EQ	05.12.1997 г. 08.10.2001 г. 24.08.2006 г. 30.07.2010 г. 21.05.2013 г. 24.05.2013 г. 19.02.2015 г. 30.01.2016 г.	6; 3 2-1 5 5-3 2 5 7-0 7	0.67 / 0.019	В восьми случаях из 12 происходило повышение среднесуточного АД за 1σ за 0–7 сут до EQ.
4	Понижение среднесуточного атмосферного давления (АД) за 1σ на недельном интервале перед землетрясением	05.12.1997 г. 08.03.1999 г. 08.10.2001 г. 30.07.2010 г. 28.02.2013 г. 25.03.2020 г.	7; 4 4-3; 0 5-4 0 6-2 5; 3	0.5 /0.012	В шести случаях из 12 происходило понижение среднесуточного АД за 1σ за 0–7 суток до EQ.
5	Повышение АД и понижение Т за 1σ на недельном интервале перед EQ (антициклон)	05.12.1997 г. 08.10.2001 г. 30.07.2010 г. 21.05.2013 г. 24.05 2013 г. 30.01. 2016 г.		0.5 / –	
6	Понижение АД и повышение Т за 1σ на недельном интервале перед EQ (циклон)	08.03.1999 г. 25.03.2020 г.		0.17 / –	
7	Повышение АД и повышение Т за 1σ на недельном интервале перед EQ	24.08.2006 г. 19.02.2015 г.		0.17 / –	
8	Понижение АД и понижение Т за 1σ на недельном интервале перед EQ	05.12.1997 г. 08.10.2001 г.		0.17 / –	
9	Повышение или понижение АД за 2σ на интервале времени 1 мес. до EQ	08.03.1999 г. 08.10.2001 г. 24.08.2006 г. 28.02.2013 г. 21.05.2013 г. 24.05 2013 г. 19.02.2015 г. 30.01.2016 г. 06.07.2018г.;25.03.2020	↓ 4-3 ↓ 5; ↑ 28 ↑ 21 ↓ 6 ↑ 17; 21-20 ↑ 20; 24-23 ↑ 6; 19 ↓ 31 ↓ 30; ↑ 19; ↑ 18-17	0.83 / 0.043	Перед 10-ю событиями из 12 отмечено повышение или понижение АД за 2σ за 3–31 сутки.

Оценка связи «метеоаномалий» с землетрясениями, проявляющихся в отклонениях текущих значений от среднесезонных функций, проводилась с использованием величин надежности и достоверности. Надежность определялась отношением *n/N*, где *n* – число землетрясений, перед

которыми проявлялась «метеоаномалия», *N* – общее число рассматриваемых землетрясений. Достоверность определялась отношением *n/m*, где *m* – число проявлений исследуемой «метеоаномалии» за весь рассматриваемый период времени. Гипотезы, результаты их проверки и оценки надежности приведены в таблице 2.

Также были проведены расчеты трех статистических параметров, характеризующих «аномальные» флуктуации первых разностей величин Т, с использованием оценок минимумов нормализованной энтропии и максимумов логарифма эксцесса и авторегрессионной меры нестационарности [1, 6] в окне 112 сут (четыре лунных месяца) с шагом в одни сутки и сопоставление выявленных «аномалий» с произошедшими землетрясениями (таблица 3).

Таблица 3. Статистический анализ временного ряда приращений среднесуточных температур воздуха, ноябрь 1996 – январь 2021 гг.

	Нормализованная энтропия [6] приращений среднесуточных температур (верхний график) в сопоставлении с EQ (нижний график). Аномалии – пониженные значения. Красная линия – порог 0.7. Серая линия – порог 0.74, соответствует отклонению за -1 σ (0.03) от среднего (0.77). Красными овалами показаны два случая уменьшения энтропии ниже порога 0.7 на интервале 4 мес. перед EQ. Голубыми овалами показаны уменьшения энтропии за -1 σ (0.74) перед семью EQ. Надежность признака составляет 0.58. Достоверность 0.18.
	Логарифм эксцесса [1] приращений среднесуточных температур (верхний график) в сопоставлении с EQ (нижний график). Аномалии – повышенные значения. Красная линия – выбранный порог 0.8. Серая линия – порог 0.73 – показывает отклонение за +1 σ (0.12) от среднего (0.61). Красным овалом показан один случай превышения порога 0.8 перед EQ. Голубыми овалами показаны увеличения за +1 σ (0.73) перед четырьмя EQ. Надежность признака составляет 0.33. Достоверность 0.17.
	Авторегрессионная мера нестационарности [1] приращений среднесуточных температур (верхний график) в сопоставлении с EQ (нижний график) Аномалии – повышенные значения. Красная линия – выбранный порог 0.8. Серая линия – порог 0.68 – показывает отклонение значений за +1 σ (0.24) от среднего (0.44). Красными овалами показаны три случая превышения порога 0.8 перед EQ. Голубыми овалами показаны увеличения параметра за +1 σ (0.68) перед семью EQ. Надежность признака составляет 0.58. Достоверность 0.25.

Обсуждение результатов

Анализ связи между «метеоаномалиями» Т и АД на интервале времени одна неделя и наиболее опасными землетрясениями, сопровождающимися ощутимыми сотрясениями в г. Петропавловске-Камчатском, показал ее случайный характер. Не обнаружена связь между землетрясениями и предшествующими им антициклонами и циклонами. Статистический анализ ряда Т с использованием трех параметров, характеризующих «аномальные» флуктуации температуры воздуха на интервале 4 мес. до произошедших землетрясений (табл. 3), также не выявил значимой связи между EQ и аномалиями Т.

Наиболее примечательной оказалась гипотеза об «аномальном» изменении АД – его повышении или понижении на интервале времени 1 мес. до землетрясения (табл. 2, гипотеза 9). Такие аномалии наблюдались в 10-ти случаях из 12 (надежность связи 0.83). Однако, на 24-летнем

интервале, таких повышений/понижений было много (70 и 160 соответственно) и достоверность этого признака мала (0.043). Вместе с тем, на такие изменения АД следует обращать внимание, как на дополнительный признак, при анализе комплекса сейсмопрогностических данных для прогноза времени опасных ощутимых землетрясений в районе г. Петропавловска-Камчатского.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/, http://www.gsras.ru/unu/).

Список литературы

1. *Любушин А.А., Казанцева О.С., Манукин А.Б.* Анализ длительных наблюдений за уровнем подземных вод в асейсмическом регионе // Физика Земли. 2019. № 2. С. 47–67.

2. *Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В. и др.* Прогноз землетрясений возможен!? М.: Трован, 2014. 144 с.

3. *Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9−27.

4. *Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.

5. *Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеенко Е.А., Чебров Д.В.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91.

6. *Lyubushin A.* Global Seismic Noise Entropy // Frontiers in Earth Science. 2020. V.8. P. 1–12. https://doi.org/10.3389/feart.2020.611663

УДК 550.34

ВАРИАЦИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ, КАК СПОСОБ НАБЛЮДЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Левочкин К.Р.[1], Стенькин Ю. В.[1], Щеголев О.Б.[1],
Кулешов Д.А.[1], Фирстов П.П.[2], Макаров Е.О.[2]

[1]Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия, lev-kirill@mail.ru
[2]Камчатский филиал Единой геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Введение

В Институте ядерных исследований сейчас изучаются разные геофизические явления путем регистрации и последующего анализа природного потока тепловых нейтронов. Тепловые нейтроны находятся в динамическом равновесии со средой, поэтому несут в себе информацию об изменениях в ней. При этом, важную роль в образовании тепловых нейтронов вблизи детекторов играет газ радон-222, который является одним из промежуточных нуклидов уранового ряда и является одним из источников природных нейтронов, через (α, n)-реакции. Радон широко используется в геофизике для индикации геодинамики тектонических плит и в роли возможного предиктора сейсмической активности. Однако, несмотря на многолетнее измерение концентрации этого газа, предсказательная возможность не доказана. Причина этого может быть в том, что радонометры измеряют чаще всего концентрацию радона в воздухе, которая чувствительна к сквознякам, вентиляции, изменению влажности воздуха.

Есть альтернативный метод изучения параметров среды, который лишен вышеперечисленных недостатков. Разработанные в Институте ядерных исследований открытые (не экранированные) сцинтилляционные электронно-нейтронные детекторы (эн-детекторы) (рис.1), чувствительны к природному потоку тепловых нейтронов.

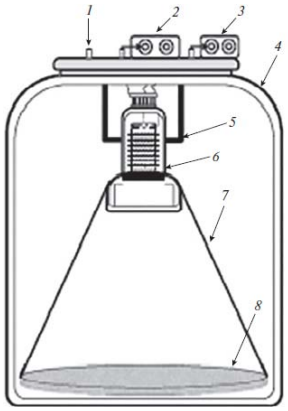


Рис. 1. Конструкция эн-детектора. 1 – высоковольтный разъем; 2 – предусилитель 8-го динода; 3 предусилитель 5-го динода; 4 – полиэтиленовый корпус; 5 – крепеж ФЭУ; 6 – ФЭУ-200; 7 – светособирающий конус; 8 – сцинтилляционный диск диаметром 70 см.

В основании детектора располагается неорганический сцинтиллятор ZnS(Ag) с добавкой необогащенного бора (B_2O_3), который обладает слабой чувствительностью к одиночным заряженным частицам и рекордным световыходом при регистрации тепловых нейтронов. Площадь сцинтиллятора 0.35 м^2, толщина сцинтилляционной композиции 50 мг/см^2. Сигнал, снимаемый с последнего динода ФЭУ, интегрируется с τ=10 мкс зарядо-чувствительным предусилителем, а затем оцифровывается 4-канальным, 10-битным АЦП (ADLINK PCI-9810) с шагом 50 нс. Следствием малой толщина сцинтиллятора является малый сигнал от одиночных релятивистских заряженных частиц. Благодаря тому, что сцинтиллятор имеет несколько временных констант, появляется возможность собирать заряд как от медленно движущихся продуктов захвата нейтронов, так и быстро движущихся релятивистских частиц. Однако сигнал от них мал из-за малой толщины сцинтиллятора и лежит ниже порога регистрации. Тем не менее, одновременные прохождения нескольких заряженных частиц (>3), например, от бета-распадов продуктов распада радона (преимущественно Bi-214 и Pb-214) вблизи детектора также регистрируются и их поток также мониторируется и анализируется, образуя «заряженную» компоненту.

Тепловые нейтроны образуются преимущественно в (α, n) – реакциях на легких ядрах, таких как Be, F, Al, Mg, Si и др. Эти элементы не содержатся в воздухе, поэтому и реакций с образованием тепловых нейтронов не происходит, а происходят они исключительно в грунте на расстоянии нескольких метров от детектора. Распады радона в воздухе приводят к образованию тяжелых нуклидов, которые также возможно детектировать с помощью эн-детекторов.

На данный момент существует работающая сеть эн-детекторов, расположенная в разных геофизических условиях: в Москве (на поверхности и под землей), в Тибете, на Камчатке и на Северном Кавказе (на поверхности и над землей). Ранее детекторы также располагались в Обнинске и в Италии, но на данный момент сбор данных оттуда не производится. Эта сеть детекторов позволяет производить непрерывный мониторинг вариаций природного потока тепловых нейтронов в различных геологических и геофизических условиях, а также получать и анализировать экспериментальные данные, с целью поиска связи тепловых нейтронов с различными природными явлениями. Работающая сеть вариационных установок уже дала ряд результатов: в работе [1] было показано, что лунная периодичность и сейсмическая активность влияют на вариации тепловых нейтронов; в работе [2] показано влияние землетрясений, которые произошли в радиусе 500 км от установки, на вариации тепловых нейтронов; в работе [3] был обнаружен геофизический эффект резкого возрастания потока тепловых нейтронов под землей при понижении атмосферного давления. В данном материале представлены результаты обработки землетрясений в Тибете и на камчатке с помощью анализа вариаций природного потока тепловых нейтронов.

Описание методики исследований и результаты

В Тибете землетрясения изучались на территории тибетского нагорья и брались за период с 1 января 2018 по 10 октября 2019 года. эн-детекторы располагались на территории тибетского университета, который расположен в городе Лхаса – городской округ в Тибетском автономном районе КНР. Исследовательская установка состоит из четырех детекторов, которые расположены под разной толщиной поглотителя: первый детектор расположен с самым большим уровнем поглотителя, четвертый – с самым низким уровнем. На Камчатке расположен один эн-детектор в подвале Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Землетрясения на Камчатке изучались в период с 1 мая 2019 по конец августа 2021 года. Расположение очагов землетрясений показано на рис. 2 и рис. 3.

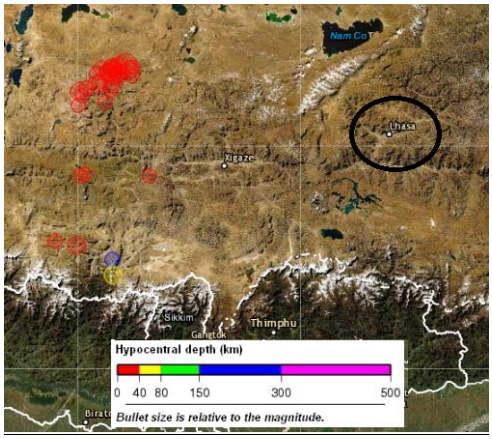


Рис. 2. Расположение очагов землетрясений для Тибета. Круги на карте обозначают очаги землетрясения. Разные цвета обозначают разную глубину очага землетрясения. В черном круге указано место нахождение детекторов.

В обоих случаях данные о землетрясениях брались из общедоступного европейского сайта (https://www.emsc-csem.org/#2) где можно устанавливать параметры поиска землетрясений, в том числе и устанавливать величину землетрясения – магнитуду. Также в анализе использовался и камчатский сайт (http://www.emsd.ru/). Для текущего анализа нижняя граница магнитуды была выбрана 3. Время начала землетрясения принималось за начало отсчета – нулевая точка. Эта нулевая точка переносилась на полученный временной ряд данных по вариациям тепловых нейтронов, и от нее отсчитывалось 10 дней вперед после начала землетрясения и десять дней назад.

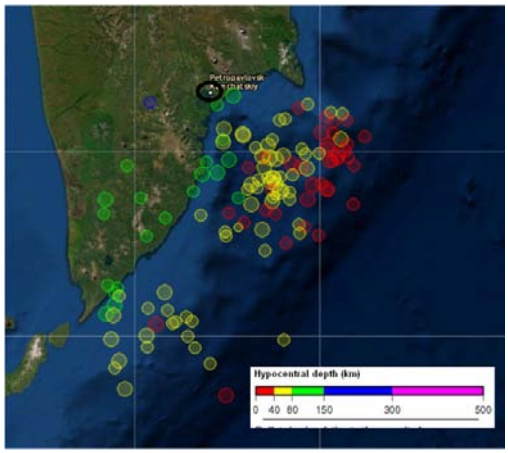


Рис. 3. Расположение очагов землетрясений для Камчатки. Круги на карте обозначают очаги землетрясения. Разные цвета обозначают разную глубину очага землетрясения. В черном круге указано местонахождение детекторов.

Установки регистрируют поток тепловых нейтронов с шагом в одну минуту, поэтому и нулевая точка берется с точностью до одной минуты. Так для каждого землетрясения формировался набор данных, который затем анализировался методом наложения эпох. Для Тибета было проанализировано 27 землетрясений, из которых для конечного анализа осталось 13, потому как много землетрясений было отсеяно ввиду различных причин: дальнее расстояние от установки, в экспериментальных данных отсутствовали данные. Для Камчатки было проанализировано значительно больше землетрясений, а именно 125, но после вышеупомянутой чистки данных, осталось 75. На рис. 4 представлены графики вариаций тепловых нейтронов относительно землетрясений для Тибета и Камчатки.

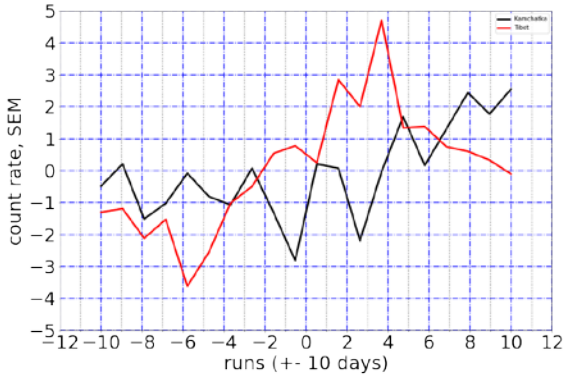


Рис. 4. Метод наложения эпох для камчатских данных и для тибетских. На графике представлены нейтроны. Черным цветом обозначены камчатские данные, красным – тибетские.

Все данные были поправлены на давление, нормированы, сглажены за сутки и переведены в ошибки среднего. По оси “x” отложены дни. Как можно видеть, для Тибетских данных наблюдается значительное увеличение темпа счета нейтронов, которое превышает 4 сигма. Это возрастание начинается от нулевой точки, который является началом землетрясения, и продолжается практически до четвертого дня после землетрясений. До этого видно, что до землетрясения присутствует провал в темпе счета. Если обратить внимание на камчатские результаты, то такого значительного увеличения не наблюдается, на 4 день после землетрясений. Более того, на 4 день приходится уменьшение в темпе счета нейтронов. Но, надо заметить, что тенденция увеличения темпа счета нейтронов, которая присутствует в тибетских данных после начала землетрясений, все же наблюдается, хотя и едва превышает 2 сигма. Если говорить о временном промежутке до начала землетрясения, то за два дня до начала землетрясения видно уменьшение темпа счета нейтронов. Таким образом, в целом картина наблюдается схожая для тибетских и камчатских данных. Как упоминалось выше, эн-детектор способен регистрировать и заряженную компоненту, которая возникает при распаде радона в воздухе. На рис.5 представлены графики вариаций заряженной компоненты относительно землетрясений для Тибета и Камчатки.

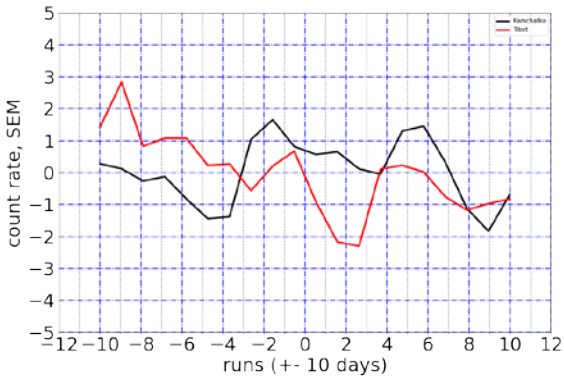


Рис. 5. Метод наложения эпох для камчатских данных и для тибетских. На графике представлена заряженная компонента. Черным цветом обозначены камчатские данные, красным – тибетские.

Из графика видно, что для заряженной компоненты можно выделить 4 временных промежутка: 1) начиная от отметки -10 и до -4, 2) от -4 до 0, 3) от 0 до 4 и 4) от 4 до 8. На каждом из промежутков наблюдается одинаковое поведение заряженной компоненты. Так, на первом промежутке наблюдается уменьшение темпа счета, на втором можно видеть возрастание, далее, в районе нуля и до отметки на оси “x”, равной 4, наблюдается снова уменьшение темпа счета, и на последнем промежутке снова в обоих случаях наблюдается возрастание темпа счета с последующим уменьшением.

Заключение

Из представленных результатов исследования можно сказать, что эффект влияния землетрясений на вариации потока тепловых нейтронов в одном случае выражен статистически обеспеченно, потому как темп счета к 4 дню после землетрясений превышает 4 сигма, а в другом наблюдается только тренд возрастания темпа счета после землетрясения, который не превышает 3 сигма. Это можно объяснить различными условиями расположения детекторов в Тибете и на Камчатке: на Камчатке детектор находится в подвале, а в Тибете детекторы находятся практически на улице (на балконах и на земле). Поведение заряженной компоненты качественно одинаково для разных геофизических условий. В целом, наблюдается одинаковая картина для разных геофизических условий, что может говорить о намечающемся подтверждении эффекта влияния землетрясений на вариации природного потока тепловых нейтронов. Хотя, далеко идущие выводы делать еще рано, потому как необходимо добавлять статистику, усовершенствовать методику анализа землетрясений с помощью представленного метода, а также добавлять дополнительные методы обработки экспериментальных данных. По мере накопления статистики будет осуществляться более строгий отбор землетрясений по расстоянию до эпицентра и его глубине. Предполагается также расширение установки.

Список литературы

1. *Алексеенко В. В., Гаврилюк Ю.М., Громушкин Д. М., Джаппуев Д.Д., Каджаев, А.У. Кузьминов В.В., Михайлов О.И., Стенькин Ю. В., Степанов В.И.* Связь вариаций потока тепловых нейтронов из земной коры с лунными периодами и сейсмической активностью // Физика земли. 2009. №8. С. 91–100.

2. *Стенькин Ю. В., Алексеенко В. В., Цаи Ж., Цяо Ж., Цюи Ш., Гуо К., Хе Х., Лиу Е., Мао С., Щеголев О. Б., Степанов В.И., Янин Я.В., Жао Ж.* Отклик ЭН-Детекторов установки PRIZMA-YBJ на землетрясения // Изв. РАН. Серия физич. 2019. Т 83. №5. С. 666–669.

3. *Стенькин Ю. В., Алексеенко В. В., Громушкин Д. М., Сулаков В.П., Щеголев О. Б.* Подземная физика и эффект влияния барометрического давления на подземный поток тепловых нейтронов // ЖЭТФ. 2017. Т. 151. С. 845–849.

УДК 550.344.43

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВО ВРЕМЯ ТРЕЩИННО-ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ В 2012-2013 гг.

Лемзиков М.В.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, lemzikov@kscnet.ru

В работе определены параметры механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений, произошедших в региональной трещиной зоне, примыкающей с юга к вулканам Плоский и Острый Толбачик, в которой было Трещинно-Толбачинское извержение (ТТИ-50) в 2012-2013 году. Использовался метод, основанный на полярностях первых вступлений *P*-волн. Механизмы очагов определялись по волновым формам вулкано-тектонических землетрясений, которые были зарегистрированы сетью радиотелеметрических станций, расположенных преимущественно в районе вулканов Ключевской группы. Для определения параметров механизмов очагов использовались данные максимального количества сейсмических точек наблюдений. Азимуты простираний главных нодальных плоскостей механизмов очагов согласуются с особенностями расположения эпицентров и разломов в этом районе.

Введение

Вулкан Плоский Толбачик с абсолютной высотой 3085 м является действующим. Вместе с потухшим вулканом Острый Толбачик (абс. высота 3682 м) расположены в юго-западной части вулканов Ключевской группы. С юга к вулканам Плоский и Острый Толбачики примыкает региональная трещинная зона, получившая название «Толбачинский дол» [2].

В постройке вулканов Ключевской группы пепловые и шлаковые слои сложно перемежаются с интрузивными телами и погребенными лавовыми потоками. Район Ключевской группы вулканов располагается в восточной части Центрально-Камчатской депрессии и в структурном плане представляют собой сводно-глыбовое поднятие плиоцен четвертичного возраста [3].

В течение многих лет региональная трещинная зона, примыкающая с юга к вулканам Плоский и Острый Толбачик и получившая название «Толбачинский дол», находилась в состоянии относительного покоя, хотя слабые вулканические землетрясения в этом районе сейсмологи регистрировали почти постоянно. Трещинно-Толбачинское извержения в региональной трещинной зоне происходили несколько раз. Первое началось 7 мая 1941 года и продолжалось почти неделю. Второе началось 6 июля 1975 года, получившее название Большое Трещинно-Толбачинское извержение и продолжалось 1.5 года. И третье Трещинно-Толбачинское извержение им. 50-летия Института Вулканологии и Сейсмологии (ТТИ-50) началось 27 ноября 2012 года и длилось почти год [2].

Разломы обеспечивают важную информацию о напряжениях в среде, в которой происходят землетрясения. Для сильных тектонических землетрясений (M>7.0) проекция очага на дневную поверхность может быть определена с применением данных широкополосной сейсмической сети, геодезических и геологических наблюдений. Небольшое количество землетрясений, зарегистрированных местными и региональными сейсмическими сетями произошедших в региональной трещинной зоне, примыкающей с юга к вулканам Плоский и Острый Толбачики, в которой было (ТТИ-50) в 2012-2013 годы, являются энергетически сильными. Эти сильные землетрясения, количество которых на несколько порядков меньше слабых, важны для характеристики существующего поля тектонических напряжений. Исследование механизмов очагов вулканических землетрясений позволяет изучить связь вулканического процесса с тектоникой региона.

Геофизические наблюдения на вулканах являются дорогостоящими и трудоемкими. Для определения механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений необходимо не менее пятнадцати точек регистрации, что возможно только в редких случаях. В то же время имеются сети региональных сейсмических станций, установленных на некоторых активных вулканах, что позволяет определять механизмы очагов вулкано-тектонических землетрясений.

В данной работе поставлена цель определить параметры механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений, с использованием максимального количества станций. И сопоставить результаты с геологическими данными и особенностями расположения эпицентров землетрясений в этом районе.

Исходные данные

В региональной трещинной зоне вулканов Плоский и Острый Толбачик за период 2012-2013 годы, произошло несколько сильных вулкано-тектонических землетрясений с $M \geq 3.0$ [*6*]. Волновые формы этих землетрясений выбирались из архива хранения цифровых сейсмограмм Камчатского Филиала Федерального Исследовательского Центра Единой Геофизической Службы КФ ФИЦ ЕГС РАН за период 2012-2013 годы и использовались для определения параметров механизмов очагов. Они относятся к I-му типу вулканических землетрясений по классификации П.И. Токарева [4].

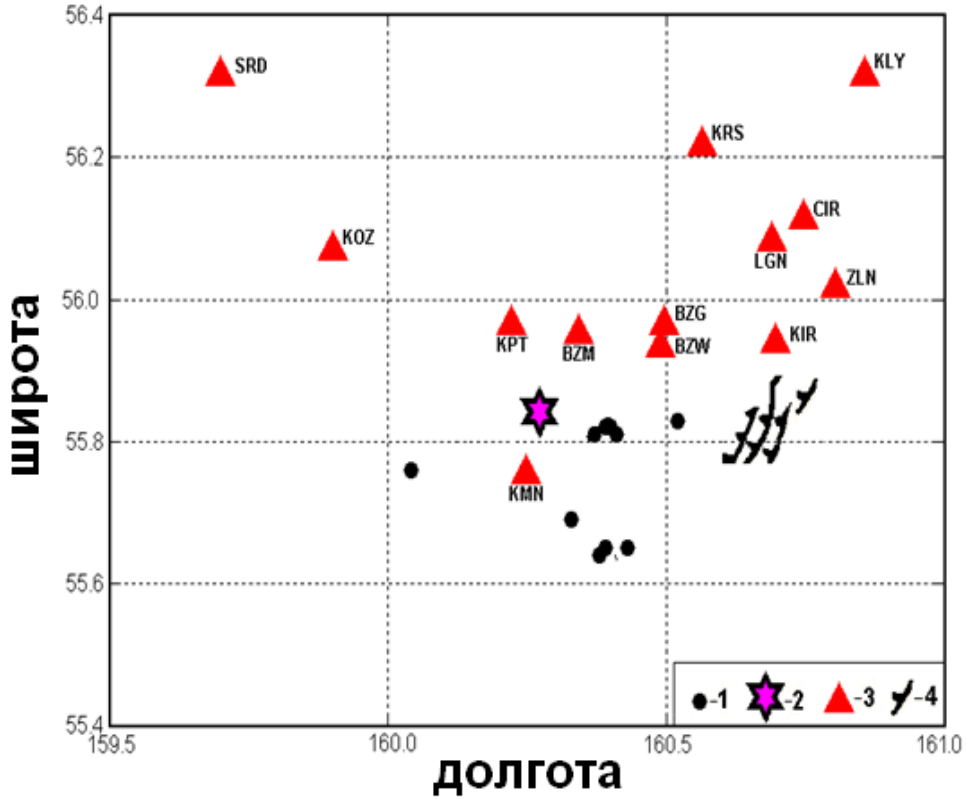


Рис. 1. Карта района исследования. 1 – эпицентры вулкано-тектонических землетрясений, произошедших в региональной трещинной зоне в 2012-2013 году; 2 – вершина вулкана Плоский Толбачик; 3 – радиотелеметрические сейсмические станции; 4 – разломы [3].

Выбирались волновые формы ВТ землетрясений с очагами на больших глубинах более 3 км под Толбачинским долом.

Важным фактором при выборе волновых форм ВТ землетрясений является отношение сигнал/шум. Они выбирались со значением этого отношения 2 и больше.

Для анализа ВТ землетрясений Трещино-Толбачинского извержения с магнитудой $M \geq 3.0$ использовались данные более 15-ти радиотелеметрических сейсмических станций, которые показаны на рис. 1. Сейсмические станции КФ ФИЦ ЕГС РАН предназначены в том числе, для слежения за активными вулканами Северной группы. При определении параметров механизмов очагов ВТ землетрясений Трещино-Толбачинского извержения с $M \geq 3.0$ использовались волновые формы всех станций, на которых они были хорошо зарегистрированы.

Регистрация землетрясений выполнена радиотелеметрическими сейсмическими станциями (КФ ФИЦ ЕГС РАН). (рис. 1) При определении параметров механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений использовались записи всех станций, на которых их волновые формы были зарегистрированы и четко видны. Перечислим кодировки и места их установки на Камчатке: BZM («Безымянный»-в.Безымянный), BZG («Безымянный-Грива»-в.Безымянный), BZW («Безымянный-Запад»-в.Безымянный), CIR («Цирк»- в.Ключевской), KLY («Ключи»-пос. Ключи), KMN («Каменистая»-в.Толбачик), KOZ («Козыревск»-пос.Козыревск), KPT («Копыто»-в.Толбачик), KRS («Крестовский»- в.Ключевской), LGN(«Логинов»-в.Ключевской), SRD («Срединный»-хребет Срединный, Камчатка), ZLN («Зеленая»- в.Безымянный).

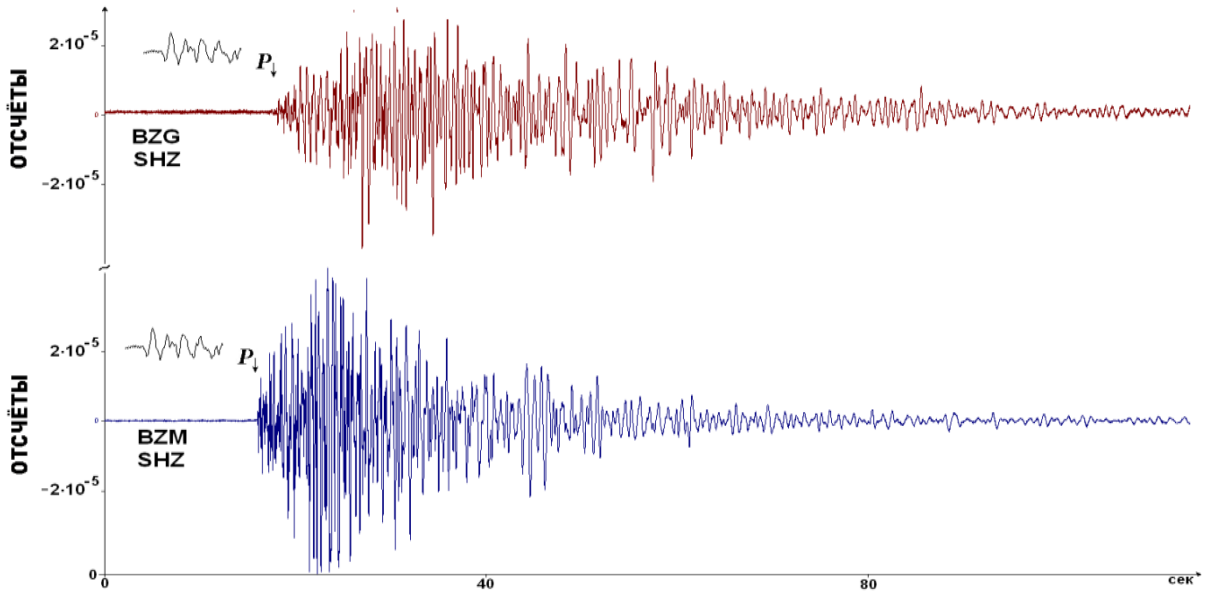


Рис. 2. Примеры волновых форм вулкано-тектонических землетрясений, произошедших на «Толбачинском долу», зарегистрированные на вертикальных (SHZ) сейсмических каналах станций BZW и BZM 9 сентября 2012 г. 10:37:47.1 (UTC).

Метод

Весь опыт инструментальных наблюдений над землетрясениями показывает, что независимо от глубины очага знаки первых вступлений *P*-волн проявляют квадрантное распределение возмущений сжатия и растяжения, распространяющихся из очага. Квадрантное распределение знаков первых вступлений сейсмических волн наблюдается при подавляющем большинстве тектонических землетрясений и свидетельствует о том, что землетрясения взрывного типа редки и разрядка энергии в деформированной среде происходит, главным образом, за счет сдвиговых напряжений. Это также характерно и для вулканических землетрясений I типа [5]. В то же время вулканические землетрясения II - IV типов [4] не имеют четких вступлений *P*- и *S*-волн, что затрудняет их использование для определения механизмов очага. Метод определения механизма очага землетрясения по поляризации первых вступлений сейсмических волн широко известен и много раз описан, начиная с [1].

Под механизмом очага землетрясения понимается ориентация в пространстве нодальных плоскостей и главных осей сжатия и растяжения. Для определения этих плоскостей используется сетка Вульфа, и со второй половины XX столетия для работы с ней применяются компьютерные программы. Широко известен комплекс программ под названием FPFIT, FPPLOT и др. [9], разработанный во второй половине XX века по идеям работ [1]. Алгоритмы, инструкции, описание и тексты этих программ доступны для специалистов на различных сайтах (например: http://www.usgs.gov/). Задача алгоритмов программ состоит в том, чтобы по набору исходных данных некоторого землетрясения, включающих знаки первых вступлений *P*-, *S*-, *SV*-, *SH*-волн, найти наиболее подходящее положение в пространстве нодальных плоскостей и одну из них принять в качестве решения, где плоскость ассоциируется с пространственным положением разлома. В сейсмологии в последнее время нашли широкое применение компьютерные технологии определения полного тензора сейсмического момента, использующие зарегистрированные в цифровом виде волновые формы [7]. Разработаны полуавтоматические системы сбора сейсмологической информации, систематизации и расчета механизмов очагов землетрясений. Имеются доступные для всех специалистов сайты (например: http://www.globalcmt.org/CMTsearch.hlml), на которых хранятся механизмы очагов землетрясений, определенные в оперативном режиме текущего времени. Однако эти сайты включают результаты только сильных землетрясений с $M > 5.5$.

Используемые нами вулкано-тектонические землетрясения являются очень сильными событиями с $M \geq 3.0$, для них был применен метод, основанный на определении поляризации первых вступлений *P*-волн (см. рис. 2). В настоящее время разработаны технологии, уточняющие процедуру определения механизмов очагов землетрясений с использованием первых вступлений сейсмических волн, которые учитывают возможные ошибки в определении местоположения землетрясения, принятой модели скоростной среды, наблюдениях полярностей и углов выхода сейсмических волн [8]. В данной работе использован алгоритм программы FPFIT вместе с некоторыми новейшими алгоритмами,

детализирующими и уточняющими нахождение параметров механизмов очагов землетрясений. На этой основе создан комплекс программ для нахождения и построения механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений.

Для определения механизма очага землетрясения необходимы: 1) знаки первых вступлений *P*-волн; 2) географические координаты станций и очага; 3) эпицентральные расстояния и азимуты из очага на станции; 4) углы выхода сейсмических волн на станциях. Все эти измерения влияют на точность определения механизма очага. Влияние их при количестве станций 15 и более может быть минимизировано. В работе использовались вулкано-тектонические землетрясения с сильной магнитудой. Для получения достоверного результата в работе определение поляризации *P*-волн выполнено на волновых формах множества станций зарегистрировавших вулканических землетрясений. Вычисления углов выхода сейсмических волн на станциях выполнялись с использованием скоростной модели среды, которая применяется на Камчатке для определения географических координат очагов землетрясений и включает слои выше уровня моря. Учет вертикальных и горизонтальных особенностей скоростной модели при конкретном положении очага землетрясения и станции выполнялся за счет разделения среды на мелкие горизонтальные блоки с конкретными значениями скоростей сейсмических волн.

Следует отметить, что и вторую нодальную плоскость, которая получается в результате вычислений, можно принять в качестве истинного положения разлома в пространстве. Теоретический расчет механизма очага можно проверить только сравнением его с геодезическими и геологическими исследованиями разлома на местности. Возможно также сравнение результата с известными разломами и с картой эпицентров роя землетрясений. Такие же контрольные проверки возможны и для вулканических землетрясений, на основе распределения их эпицентров.

Землетрясения чаще всего происходят на разломах. Геологический разлом характеризуется тремя основными компонентами: а) простиранием плоскости (strike), б) углом падения (dip), в) вектором подвижки при смещении (slip). Характер подвижки определяется её углом относительно простирания (rake). Если этот угол положительный, то это взброс; при отрицательном угле – сброс. Параметры механизмов очагов землетрясений ассоциируются с соответствующими компонентами разломов.

Результаты

Удачное расположение сейсмических станций на конусах, вблизи и в окрестностях активных вулканов Ключевской, Безымянный и Толбачик, позволило определить параметры механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений в региональной трещинной зоне, в которой было (ТТИ-50) в 2012-2013 годы. Следует отметить, что не все волновые формы вулкано-тектонических землетрясений подходят для определения параметром и построения механизма очага. На некоторых записях вулкано-тектонических землетрясений волновые формы едва видны на фоне помех. Поэтому использовались только такие записи вулкано-тектонических землетрясений, у которых волновые формы имеют четкие вступления *P*-волн на фоне помех. В результате, были получены параметры механизмов очагов нескольких вулкано-тектонических землетрясений, произошедших в региональной трещинной зоне: а) азимут простирания главной нодальной плоскости (strike); б) угол падения плоскости (dip); в) угол скольжения плоскости (rake). Вторую нодальную плоскость, которая получается в результате вычислений, можно то же принять за главную нодальную плоскость.

Теоретический расчет механизма очага можно проверить сравнением его с геологическими исследованиями разлома на местности. Возможно также сравнение результата с известными картами разломов и с картами расположения эпицентров землетрясений. Такие же контрольные проверки возможны и для вулканических землетрясений.

Особенности пространственного положения эпицентров землетрясений и разломов, так или иначе, характеризует механизмы их очагов. Этот факт также относится к пространственному положению разломов и эпицентров вулканических землетрясений.

Полученные в данной работе параметры механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений, произошедших в региональной трещинной зоне, сравнивались с особенностями расположения разломов и эпицентров в районе Северной группы вулканов [3]. Характерные примеры параметров механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений произошедших в региональной трещинной зоне, показаны в (табл. 1).

Землетрясения чаще всего происходят на разломах. Геологический разлом характеризуется тремя основными компонентами: а) азимутом простиранием плоскости (strike); б) углом падением (dip), и в) углом скольжения плоскости (rake). Последнее определяется углом относительно

простирания. Параметры механизмов очагов землетрясений ассоциируются с соответствующими компонентами разломов.

Таблица 1. Параметры механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений

№	Дата	Время	Координаты			$K_{S_{1,2}}^{\Phi 68}$ [6]	Механизм очага		
			Широта, гр. N	Долгота, гр. E	Глубина, км		Strike	Dip	Rake
1	2012.09.09	10:37:47.1	55.76	160.04	14.66	8.7	272	61	-144
2	2012.11.10	11:08:56.2	55.81	160.37	3.15	6.7	295	58	126
3	2012.11.27	00:59:46.3	55.81	160.41	0.54	6.6	282	62	-174
4	2012.11.27	02:06:59.3	55.82	160.39	2.91	7.0	267	51	-170
5	2012.11.30	15:06:54.2	55.65	160.43	0.14	7.8	299	51	-138
6	2012.11.30	18:56:13.7	55.64	160.38	0.20	7.0	260	87	-153
7	2012.12.01	00:37:26.6	55.82	160.40	3.06	7.0	249	47	-174
8	2012.12.03	07:40:01.7	55.65	160.39	7.69	7.2	290	62	-155
9	2013.02.15	04:59:32.8	55.83	160.52	19.79	8.5	187	46	-175
10	2013.09.27	16:11:08.9	55.69	160.33	11.94	8.2	243	63	148

Заключение

На примере (ТТИ-50) опробован метод определения механизмов очагов с использованием поляризации первых вступлений *P*-волн для сильных вулкано-тектонических землетрясений.

Получены параметры механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений, произошедших в региональной трещинной зоне во время Трещинно-Толбачинского извержения.

Азимут простирания главных нодальных плоскостей механизмов очагов вулкано-тектонических землетрясений в пространстве совпадает с расположением эпицентров вулканических землетрясений Северной группы и разломов в этом районе.

Список литературы

1. *Введенская А.В.* Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1956. № 3. С. 34–47.

2. *Гирина О.А.* Трещинное Толбачинское извержение имени 50-летия ИВиС ДВО РАН в 2012-2013 гг. // Всеобщее богатство человеческих познаний. Материалы XXX Крашенинниковских чтений. Петропавловск-Камчатский: Камчатская краевая научная библиотека им. С.П. Крашенинникова, 2013. С. 84–87.

3. *Иванов Б.В., Балеста С.Т.* Глубинное строение сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, 1976. 149 с.

4. *Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.

5. Зобин В.М. Динамика очага вулканических землетрясений. М.: Наука, 1979. 92 с.

6. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатский землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.

7. *Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H.* Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // Journal of Geophysical Research. 1981. V. 86. P. 2825–2852. https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825

8. *Hardebeck J.L., Shearer P.M.* A new method for determining first-motion focal mechanisms // Bulleten Seismolical Soc. America. 2002. V. 92. P. 2264–2276.

9. *Reasenberg P., Oppenheimer D.* FPFIT, FPPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions // U.S. Geological Survey Open-File Report. 1985. V 85. 109 p.

УДК 550.34

НИЗКОЧАСТОТНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ШУМ ЗЕМЛИ НА ГЛОБАЛЬНОМ И РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЯХ

Любушин А.А.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук,
г. Москва, e-mail: lyubushin@yandex.ru

Введение

Рассматривается возможность анализа непрерывных записей сейсмического шума на сетях широкополосных сейсмических датчиков в частотном диапазоне, формально выходящем за ограничения, заданные в технических паспортах к приборам.

Сети широкополосных сейсмических станций

С 1988 года в практике сейсмических наблюдений впервые появились станции, на которых стали производится непрерывные записи сейсмических колебаний. Это было связано с появлением уникального сейсмометра STS-1. На рис.1 представлен график ежесуточных чисел работоспособных сейсмических станций с регистрацией записей с шагом опроса 1 сек от 3-х глобальных сетей (229 станций): GSN: http://www.iris.edu/mda/_GSN; GEOSCOPE: http://www.iris.edu/mda/G; GEOFON: http://www.iris.edu/mda/GE . С 1997 года в Японии заработала сеть широкополосных станций F-net: https://www.fnet.bosai.go.jp/faq/?LANG=en для которой на рис. 1 также представлен график ежесуточного числа работающих станций. Кроме того, на том же рис.1 имеется график ежесуточных чисел работающих станций для сети КФ ГС РАН на Камчатке (21 станция с 2011 года).

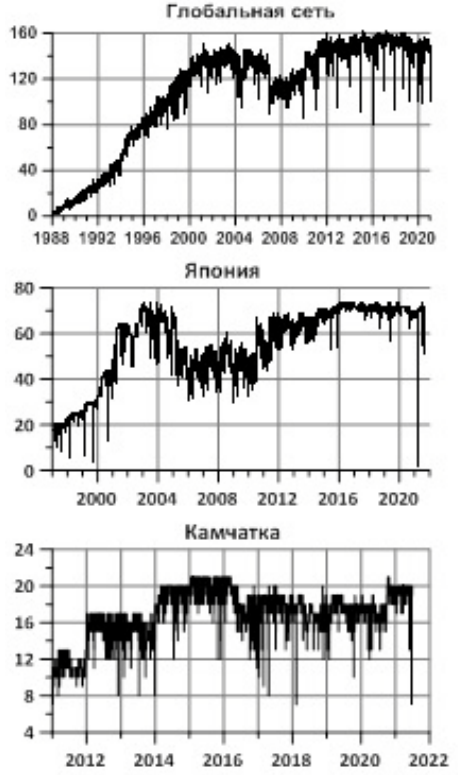


Рис.1. Графики ежесуточных чисел работающих станций для глобальной сети сейсмических наблюдений, для сети F-net в Японии и для сети из 21 станции на Камчатке.

Уже на начальном этапе анализа вновь получаемых данных было подмечено, что если оценить их спектр колебаний, то отчетливо видны спектральные пики, соответствующие собственным колебаниям Земли и даже лунно-солнечным приливам – см. рис. 2. Это обстоятельство наводит на мысль, что широкополосные сейсмические приборы на самом деле обладают недокументированными свойствами, позволяющими производить измерения в частотном диапазоне, который является «промежуточным» для геофизики, для периодов от 2 до 1000 минут. Термин «промежуточный» означает, что он уже не традиционно «сейсмический» и еще не традиционно «гравиметрический» или «наклономерный». Именно в силу своего «промежуточного» положения он является наименее изученным.

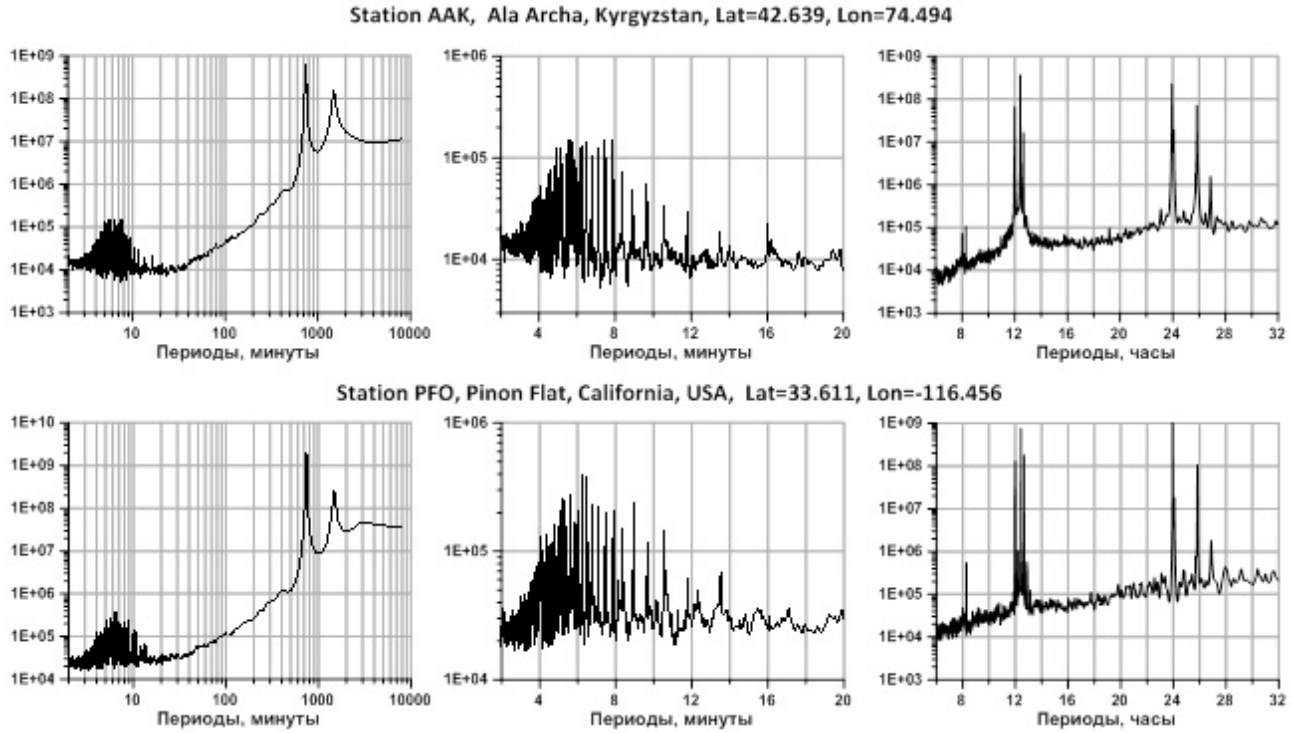


Рис.2. Оценки спектров мощности непрерывных записей вертикальных сейсмических колебаний на 2-х станциях (их идентификаторы и географические координаты указаны).

Для того, чтобы исследовать этот частотный диапазон, надо усреднить сейсмические записи и привести их к шагу по времени 1 минута. Оказалось, что переход в низкочастотную часть спектра резко повышает долю прогностической информации в записях. Именно анализ мульти-фрактальных свойств низкочастотного сейсмического шума позволил дать заблаговременный прогноз мега-землетрясения в Японии 11.03.2011 г. [1-4]. Обобщение этого опыта привело к созданию целого инструментария анализа сейсмического фона Земли, который детально изложен в работах [5-14], посвященных анализу свойств синхронизации низкочастотных сейсмических пульсаций планеты в связи с глобальным сейсмическим процессом и подготовкой сильных землетрясений в различных регионах Земли. В работах [15-18] разработанный программный аппарат был применен к анализу сейсмического фона Камчатки. В работах [19-24] с использованием мульти-фрактальных и энтропийных статистик низкочастотного сейсмического шума (глобального и на региональном уровне, в Японии и Калифорнии) была показана связь их трендов и свойств их синхронизации с неравномерностью вращения Земли

Заключение

Длительный опыт анализа низкочастотного сейсмического фона Земли, непрерывно регистрируемого на сетях широкополосных сейсмических станций, показал его перспективность для исследования динамики Земли, связи сейсмических полей с глобальными процессами, типа неравномерности вращения Земли, и для поиска качественно новых предвестников сильных землетрясений.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А18-118110890093-1.

Список литературы

1. *Любушин А.А.* Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм // Физика Земли. 2009. № 5. С. 15–28.

2. *Любушин А.А.* Статистики временных фрагментов низкочастотных микросейсм: их тренды и синхронизация // Физика Земли. 2010. № 6. С. 86–96.

3. *Любушин А.А.* Кластерный анализ свойств низкочастотного микросейсмического шума // Физика Земли. 2011. № 6. С. 26–34.

4. *Lyubushin A.* Multifractal Parameters of Low-Frequency Microseisms. In: Synchronization and Triggering: from Fracture to Earthquake Processes, GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences 1 / V. de Rubeis et al. (Eds.). Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag. 2010. Ch. 15. P. 253–272. http://dx.doi.org/10.1007%2F978-3-642-12300-9_15.

5. *Любушин А.А.* Анализ когерентности глобального сейсмического шума, 1997–2012 // Физика Земли. 2014. №3. С. 18–27.

6. *Любушин А.А.* Связь полей низкочастотных сейсмических шумов Японии и Калифорнии // Физика Земли. 2016. № 6. С. 28–38.

7. *Lyubushin A.A.* Seismic Catastrophe in Japan on March 11, 2011: Long-Term Prediction on the Basis of Low-Frequency Microseisms // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2011. V. 46. № 8. P. 904–921. https://doi.org/10.1134/S0001433811080056.

8. *Lyubushin A*. Prognostic properties of low-frequency seismic noise // Natural Science. 2012. 4. 659–666. https://doi.org/10.4236/ns.2012.428087.

9. *Lyubushin A.* How soon would the next mega-earthquake occur in Japan? // Natural Science. 2013. V. 5. № 8A1. P. 1–7. https://doi.org/10.4236/ns.2013.58A1001.

10. *Lyubushin A.A.* Dynamic estimate of seismic danger based on multifractal properties of low-frequency seismic noise // Natural Hazards. 2014. V. 70. Iss. 1. P. 471–483. http://dx.doi.org/10.1007%2Fs11069-013-0823-7.

11. *Lyubushin A.A.* Wavelet-based coherence measures of global seismic noise properties // J. Seismology. 2015. V. 19. №2. P. 329–340. https://doi.org/10.1007/s10950-014-9468-6.

12. *Lyubushin A.A.* Long-range coherence between seismic noise properties in Japan and California before and after Tohoku mega-earthquake // Acta Geodaetica et Geophysica. 2017. № 52. P. 467–478. https://doi.org/10.1007/s40328-016-0181-5.

13. *Lyubushin A.* Synchronization of Geophysical Fields Fluctuations. In: Complexity of Seismic Time Series: Measurement and Applications / T. Chelidze, L. Telesca, F. Vallianatos (Eds.). Oxford, Cambridge, Amsterdam: Elsevier. 2018. Ch. 6. P. 161–197. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813138-1.00006-7.

14. *Lyubushin A.A.* Cyclic Properties of Seismic Noise and the Problem of Predictability of the Strongest Earthquakes in Japanese Islands // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2018. V. 54. № 10. P. 1460–1469. https://doi.org/10.1134/S0001433818100067.

15. *Любушин А.А., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Таранова Л.Н.* О свойствах поля низкочастотных шумов,зарегистрированных на Камчатской сети широкополосных сейсмических станций // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2015. № 2. Вып. 26. С. 20–36. http://www.kscnet.ru/kraesc/2015/2015_26/art3.pdf .

16. *Касимова В.А., Копылова Г.Н., Любушин А.А.* Вариации параметров фонового сейсмического шума на стадиях подготовки сильных землетрясений в Камчатском регионе // Физика Земли. 2018. № 2. С. 269–283.

17. *Любушин А.А., Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К.* Связь мультифрактальных и энтропийных свойств сейсмического шума на Камчатке с неравномерностью вращения Земли // Физика Земли, 2021, № 2, с. 153–163. DOI: https://doi.org/10.31857/S0002333721020046.

18. *Копылова Г.Н., Любушин А.А., Таранова Л.Н.* Новая прогностическая технология анализа вариаций низкочастотного сейсмического шума (на примере районов Дальнего Востока России) // Российский сейсмологический журнал. - 2021. - Т. 3, № 1. С. 75–91. DOI: https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.05.

19. *Lyubushin, A.* Trends of Global Seismic Noise Properties in Connection to Irregularity of Earth's Rotation. Pure Appl. Geophys. 177, 621–636 (2020). https://doi.org/10.1007/s00024-019-02331-z.

20. *Lyubushin, A*. Connection of Seismic Noise Properties in Japan and California with Irregularity of Earth's Rotation. Pure Appl. Geophys. 177 (2020), 4677–4689. https://doi.org/10.1007/s00024-020-02526-9.

21. *Lyubushin A.* Global Seismic Noise Entropy // F rontiers in Earth Science, 8:611663. https://doi.org/10.3389/feart.2020.611663.

22. *Lyubushin A.A.* Seismic Noise Wavelet-Based Entropy in Southern California // Journal of Seismology, First online: 21 August 2020, 25:25–39 (2021), https://doi.org/10.1007/s10950-020-09950-3.

23. *Lyubushin A.* Low-Frequency Seismic Noise Properties in the Japanese Islands // Entropy 2021, 23, 474. https://doi.org/10.3390/e23040474.

24. *Lyubushin, A.* Global Seismic Noise Wavelet-based Measure of Nonstationarity // Pure and Applied Geophysics, 2021. https://doi.org/10.1007/s00024-021-02850-8.

УДК 550.34

АНТРОПОГЕННАЯ КОМПОНЕНТА СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА В ПЕТРОПАВЛОВСКЕ-КАМЧАТСКОМ В 2020 ГОДУ

Матвеенко Е.А., Чебров Д.В.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, van@emsd.ru

Введение

Петропавловск-Камчатский расположен на территории повышенной сейсмической опасности. Ежегодно в городе в среднем регистрируется в среднем 18 ощутимых землетрясений. В Камчатском крае работает 79 сейсмических станции, 17 из них расположены непосредственно на территории Петропавловска-Камчатского. Только эти 17 станций подергаются существенному антропогенному загрязнению. На остальных станциях Камчатки антропогенный шум выражен слабо или вообще не проявляется. Изучение антропогенного вклада в сейсмический шум, позволит оценить его влияние на работу сейсмической сети расположенной на территории города. Предпосылками к активизации этого направления, стала беспрецедентная ситуация связанная с ведением мер для борьбы с распространением COVID-19. На территории России с 4 по 30 апреля 2020 г. были установлены нерабочие дни, в связи с чем почти полностью прекратилась деятельность учреждений образовательной, сервисной, культурно-досуговой сфер, а также радикально снизилась интенсивность деятельности торговых учреждений и транспорта, общественного и личного. По мнению авторов и согласно результатам работ [3, 4 и мн.др.] сложившаяся ситуация должна была неминуемо повлиять на состав сейсмического шума и суточный ход его уровня.

Методика и входные данные

С целью повышения качества сейсмологических исследований в КФ ФИЦ ЕГС РАН с 2014 года функционирует автоматизированная система расчета спектральных характеристик шума сейсмических станций [1]. В основе работы системы лежит анализ функции плотности вероятности (probability density function – PDF) спектральной плотности мощности шума (power specrtal density – PSD) [1, 5, 6]. Доступ к результатам работы системы осуществляется через web-интерфейс ЕИС СД КФ ФИЦ ЕГС РАН (sdis.emsd.ru/info/instruments/seismopsdpdf.php) [2]. В ЕИС хранятся данные о PDF PSD станций с 2013 года, что позволяет построить типичную модель шума характеризующий многолетний период работы для каждой станции в диапазоне частот 0.02-5Гц с шагом в 1/8 октавы.

В исследовании используются записи с акселерометров станций: ADM, DAL, DCH, GK001, GK002, GK003, GK004, GK005, IVS, PET, PTG, SCH, SPZ, VST (подробная информация о приборах представлена на странице: sdis.emsd.ru/info/instruments/seismoinstruments.php).

В основе исследования лежит, предположение авторов, что в апреле 2020 года в "дневное время" антропогенный вклад в шум будет значительно ниже, чем в периоды до введения ограничений. Для снижения сезонных и суточных влияний на сейсмический шум не связанных с деятельностью человека, оценка антропогенного вклада проводилась, при сравнении с аналогичными периодами ("дневное время", месяц апрель) предыдущих лет. "Рабочие" и "выходные" дни анализировались отдельно. "Рабочими" днями выбраны дни с понедельника по четверг. Пятница исключена по причине "сокращенного" рабочего дня в государственных учреждениях Камчатского края. "Выходные" дни это суббота и воскресенье. Для разделения "дневного" и "ночного" времени исследованы суточные градиенты медианного значения спектра плотности мощности в диапазоне 1–5 Гц, за период с 2013 по 2021 гг. Нижняя граница по частоте соответствует работам [4, 7] в которых исследуется антропогенная составляющая шума, верхняя граница обусловлена ограничением существующим архивом данных PDF PSD.

Экстремумы на градиенте спектра плотности шума совпадают с началом утренней активности населения 07:30, связанной с началом рабочего дня, и временем окончания рабочего дня большинства предприятий в 17:00 (рис. 1). В дальнейших расчетах, под "дневным" временем подразумевается период между 7:30 и 17:00 часами, "ночное" время будет указывать на промежуток 00:30 по 04:00 часов, что соответствует минимальным значениям градиента по модулю.

Для всех исследуемых каналов станций произведен расчет средних значений спектральной плотности мощности за апрель 2013-2021 гг. для "дневного" и "ночного" времени в диапазонах 1–5 Гц.

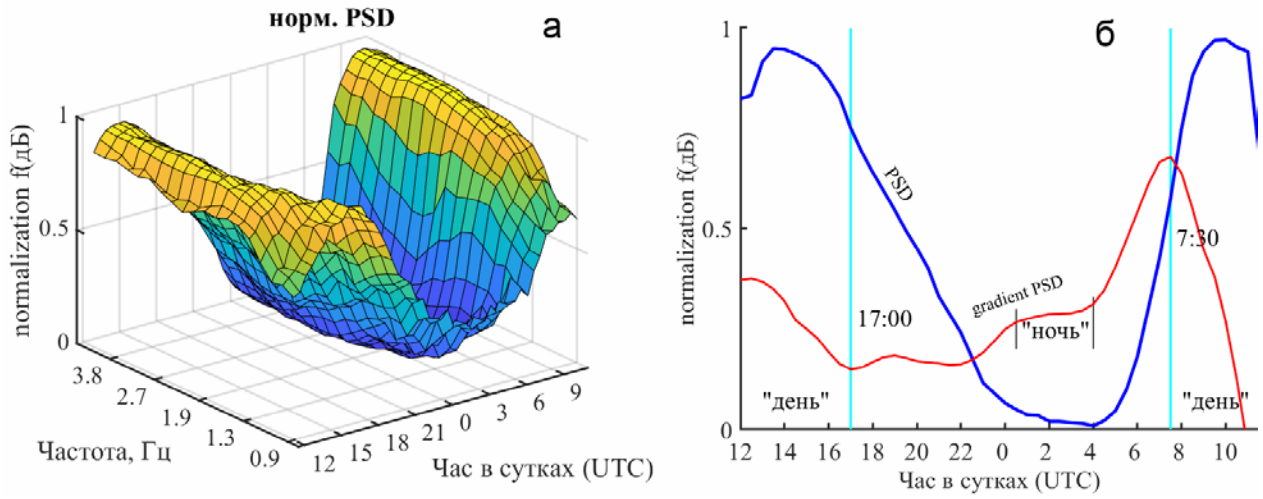


Рис. 1. Суточные вариации сейсмического шума, полученные путем усреднения спектров PSD каналов HN станций ADM, DAL, DCH, GK001, GK002, GK003, GK004, GK005, IVS, PET, PTG, SCH, SPZ, VST за период с 2013 по 2021 гг., нормированные на минимальное значение для каждой полосы частот (а). Суточные вариации сейсмического шума усредненные в диапазоне 1–5 Гц (б) (синяя линия), красная линия - градиент усредненных суточных вариаций в условных единицах.

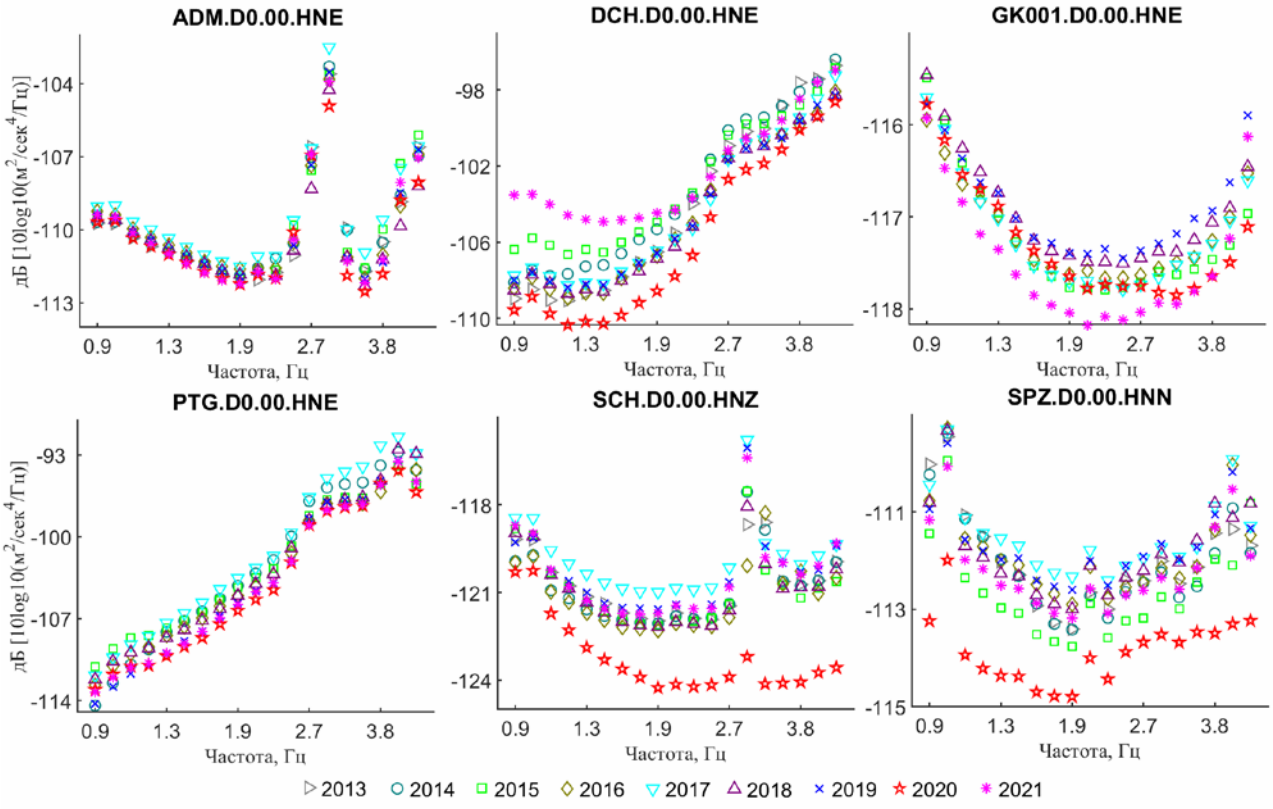


Рис. 2. Функция плотности вероятности спектральной плотности мощности сейсмического шума (PDF PSD) усредненная за "дневное" время и для "рабочих" дней в апреле указанных в легенде годов на HN каналах станций: ADM, SCH, DCH, GK001, PTG, SPZ.

Для большинства станций в апреле 2020 года в диапазоне 1–5 Гц характерен минимальный или очень близкий к минимальному уровень мощности шума, в сравнении с другими периодами расчетов (рис. 2, таблица 1).

Таблица 1. Спектральная плотность мощности (PSD) усредненная за "дневное время" "рабочих дней" в апреле по каждому году с 2013-2019 гг. и 2020 г. в диапазоне 1–5 Гц

PSD (дБ) \ канал	ADM, HNE	ADM, HNN	ADM, HNZ	DAL, HNE	DAL, HNN	DAL, HNZ	DCH, HNE	DCH, HNN	DCH, HNZ
макс$_{2013-2019}$	-109.375	-113.039	-117.115	-122.582	-119.742	-109.132	-102.985	-105.931	-106.271
средняя$_{2013-2019}$	-109.941	-113.894	-117.550	-123.527	-121.557	-109.701	-104.064	-107.002	-107.131
мин$_{2013-2019}$	-110.325	-114.611	-117.945	-124.239	-122.310	-109.994	-104.663	-107.646	-107.845
средняя$_{2020}$	**-110.390**	-114.581	-117.866	-123.602	-121.631	-109.846	**-105.876**	**-107.938**	**-108.244**
PSD (дБ) \ канал	GK001, HNE	GK001, HNN	GK001, HNZ	GK002, HNE	GK002, HNN	GK002, HNZ	GK003, HNE	GK003, HNN	GK003, HNZ
макс$_{2013-2019}$	-116.896	-116.999	-116.824	-113.208	-112.166	-114.278	-101.462	-102.583	-104.293
средняя$_{2013-2019}$	-117.094	-117.178	-117.113	-114.098	-113.147	-114.599	-101.880	-102.937	-104.658
мин$_{2013-2019}$	-117.229	-117.382	-117.294	-115.306	-114.220	-114.999	-102.118	-103.081	-105.082
средняя$_{2020}$	**-117.288**	**-117.346**	**-117.752**	**-115.367**	**-114.907**	**-115.437**	**-102.307**	**-103.310**	**-106.327**
PSD (дБ) \ канал	GK004, HNE	GK004, HNN	GK004, HNZ	GK005, HNE	GK005, HNN	GK005, HNZ	IVS, HNE	IVS, HNN	IVS, HNZ
макс$_{2013-2019}$	-108.373	-108.664	-109.572	-115.404	-115.582	-114.231	-107.360	-108.449	-110.148
средняя$_{2013-2019}$	-109.296	-109.703	-110.893	-115.986	-116.333	-115.022	-107.685	-109.130	-110.816
мин$_{2013-2019}$	-109.904	-110.318	-112.612	-116.578	-116.879	-115.604	-108.240	-109.621	-111.491
средняя$_{2020}$	-109.647	-110.249	-109.894	-115.926	-116.102	-115.005	**-108.269**	**-110.102**	**-111.853**
PSD (дБ) \ канал	PET, HNE	PET, HNN	PET, HNZ	PTG, HNE	PTG, HNN	PTG, HNZ	SCH, HNE	SCH, HNN	SCH, HNZ
макс$_{2013-2019}$	-119.395	-112.551	-116.584	-101.476	-102.727	-105.493	-118.104	-114.572	-119.841
средняя$_{2013-2019}$	-120.998	-116.793	-121.045	-102.761	-104.192	-107.194	-119.137	-114.872	-120.669
мин$_{2013-2019}$	-122.333	-118.925	-122.581	-103.855	-105.392	-108.372	-119.857	-115.291	-121.130
средняя$_{2020}$	-119.984	-113.674	-121.149	**-104.129**	**-105.771**	**-108.812**	**-121.332**	**-117.052**	**-123.246**
PSD (дБ) \ канал	SPZ, HNE	SPZ, HNN	SPZ, HNZ	VST, HNE	VST, HNN	VST, HNZ			
макс$_{2013-2019}$	-111.177	-111.471	-112.417	-115.789	-113.633	-117.547			
средняя$_{2013-2019}$	-111.923	-111.921	-112.624	-116.198	-114.262	-118.378			
мин$_{2013-2019}$	-112.729	-112.596	-112.865	-116.647	-115.202	-118.995			
средняя$_{2020}$	**-113.046**	**-113.845**	**-113.475**	**-116.876**	**-115.992**	**-118.576**			

С ростом частоты от 1 до 5 Гц наблюдается рост отклонения средней мощности шума в апреле 2020 года от средней мощности шума за все периоды (Рис. 3а). Для иллюстрации типичной зависимости проведен аналогичный расчет для 2019 года (Рис. 3б).

Использование в расчетах различных периодов: рабочие, выходные дни, дневное, ночное время, преимущественно сохраняет общий вид зависимостей, указывающих на снижение плотности сейсмического шума в апреле 2020 года.

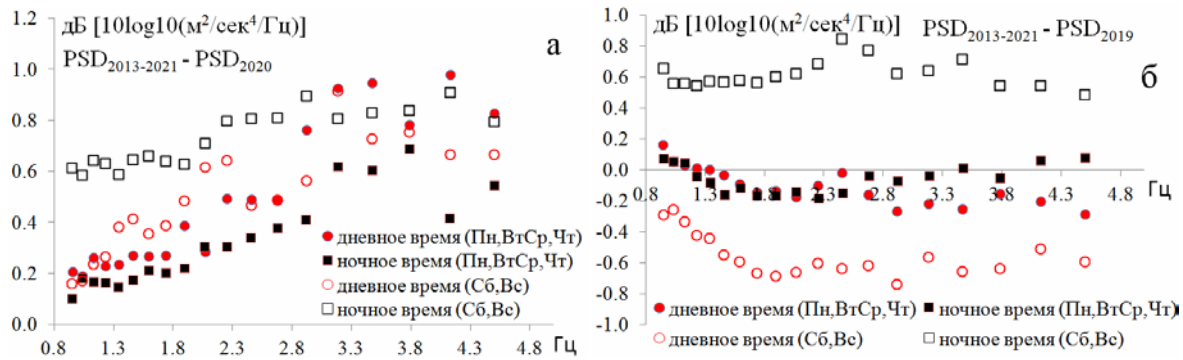


Рис. 3. График отклонения спектральной плотности мощности усредненных по всем исследуемым каналам за весь период расчетов (2013-2020 гг.) от средних значений за апрель: а) 2020 года; б) 2019 года.

С ростом частоты можно ожидать еще большое отклонение от среднего уровня шума, для проверки данного предположение, произведен расчет спектральной плотности мощности за апрели с 2018 по 2021 год в диапазоне частот 0.01-40Гц, с шагом по частотам в 1/16 октавы (рис. 4, рис. 5).

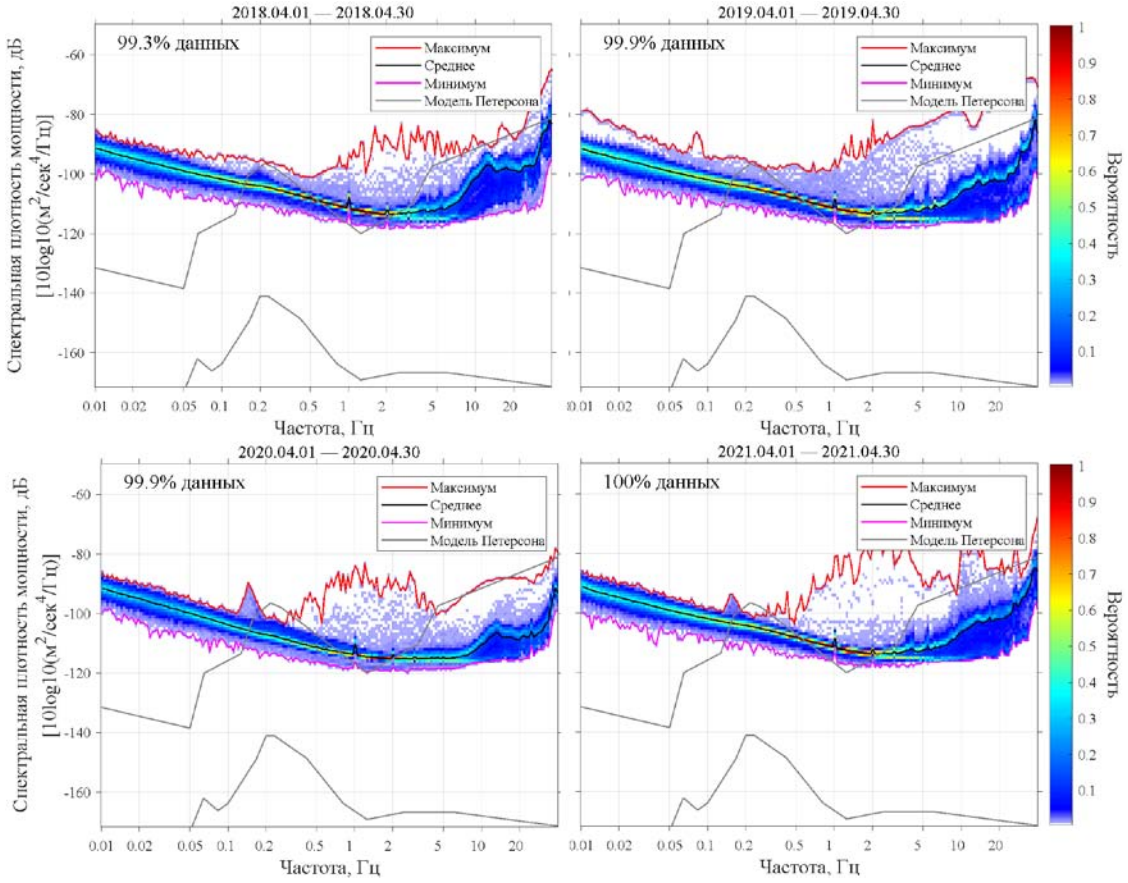


Рис. 4. Функция плотности вероятности спектральной плотности мощности сейсмического шума (PDF PSD) на канале HNN станции Звездный (SPZ) по данным за апрели 2018-2021 гг.

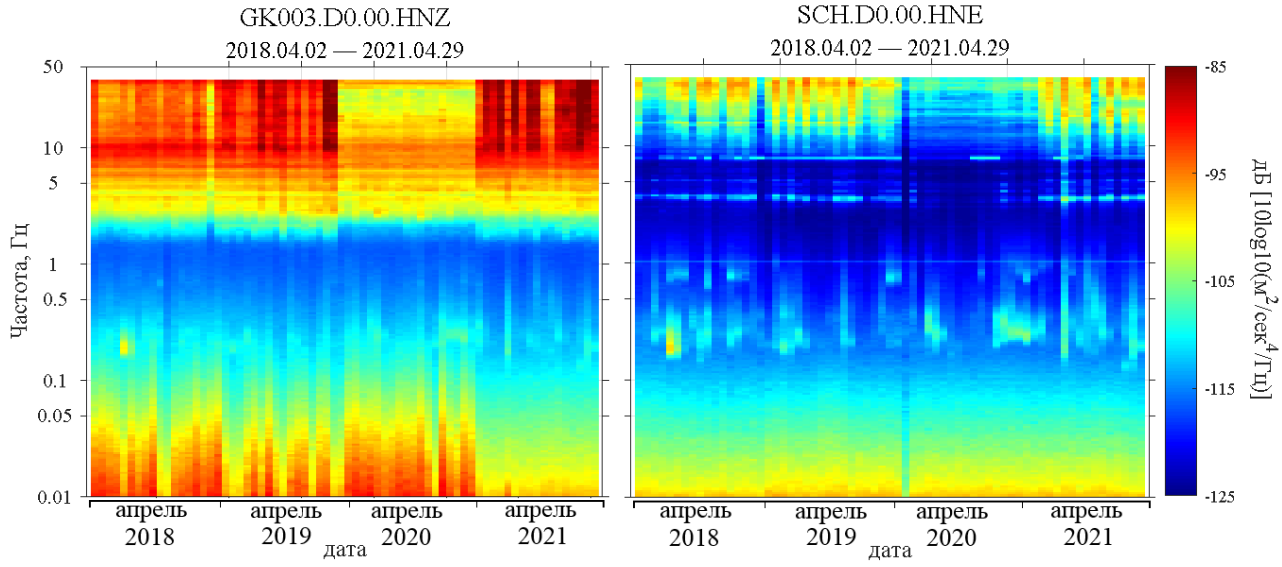


Рис. 5. Суточные вариации сейсмического шума на каналах HNZ станции GK003 и HNE станции SCH, полученные путем усреднения спектров PSD в течение апрелей с 2018 по 2021 год.

Для оценки изменения плотности мощности шума в зависимости от частоты во время апреля 2020 года и определение уровня этих изменений проведен расчет отклонения усредненных значений PSD по всем исследуемым станциям за период расчетов 2018-2021 года (Рис. 6а, б). На рисунке 6, аналогично рисунку 3, наблюдается снижение уровня шума с ростом частоты.

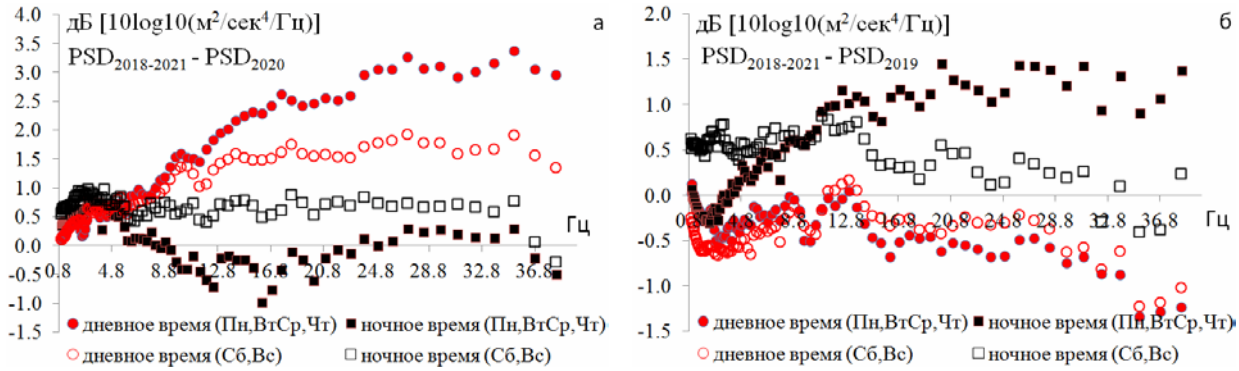


Рис. 6. График отклонения спектральной плотности мощности усредненных по всем исследуемым каналам за 2018-2021 гг. от средних значений за апрель: а) 2020 года; б) 2019 года.

Обсуждение результатов

Исполнение мер для борьбы с распространением COVID-19, оказало ощутимое влияние на спектральный уровень и состав сейсмического шума, регистрируемого на территории города Петропавловска-Камчатского в апреле 2020 года. Уровень изменение уровня шума, зависит от антропогенных факторов, влияющих на сейсмический шум вблизи сейсмических датчиков.

Снижение уровня мощности сейсмического шума ниже минимальных значений аналогичных периодов прошлых лет, зарегистрировано на станциях, установленных в школах, жилых домах (интернатах) или вблизи общественных и офисных зданий. Что согласуется с условиями мер принятых мер для борьбы с распространением COVID-19, дополнительные каникулы в школах и переход на удаленный режим работы в организациях. На станциях, установленных в (близи) административных зданиях, которых не затронули "меры", а также станции, удаленные от воздействия антропогенных факторов, уровень мощности сейсмического шума близок среднегодовым значениям. Далее проводится описание факторов возможно повлиявших на изменения в шуме в апреле 2020 года в "дневное" время "рабочих" дней.

Наибольшие снижение мощности шума зарегистрировано на станции SCH, установленной в здании школы. Школа, расположена на окраине южной части города и максимально (в сравнении с другими станциями города) удалена от промышленных и общественных зданий. Значительное снижение шума, указывает на то, что деятельность внутри школы являлась основным его источником. Также значительно снизился шум для станций GK003 и SPZ, установленных в школе и физкультурно-оздоровительном комплексе, оба здания находятся в жилых районах, где в непосредственной близости отсутствуют промышленные здания и дороги, используемые тяжелым (грузовым) транспортом. На станциях DCH, GK001, GK002 (жилой дом, школа, интернат) снижение мощности шума не такое значительное, как для выше описанных станций, что может быть обусловлено "территориальными" антропогенными шумами. Станция DCH расположена в жилом доме в непосредственной близости от дороги (10 метров) и трех больниц (50, 100, 150 метров), ближайшая больница работает круглосуточно. Станция GK002 установлена в здании Интерната, в 60 метрах от которого проходит центральная дорога города, используемая тяжелым (грузовым) транспортом. Станция GK001 имеет положение подобное станции GK003, но меньшее снижение шума может быть обусловлено иным режимом работы.

Минимальное снижение шума в "рабочее" время относительно среднегодовых значений получено для станций IVS, VST, PTG. Станции IVS и VST установлены в отдельно стоящих сооружениях, территориально первая располагается в жилом районе, вторая в промышленной зоне. В непосредственной близости от станции IVS, находится административное здание, в котором работают круглосуточные службы, т.е. режим работы частично не изменился. Слабое снижение шума на станции VST, может быть объяснено низкой антропогенной компонентой в регистрируемом шуме, обусловленной скальными грунтами и удаленностью от административных общественных зданий. Станция PTG расположена в жилом доме, в непосредственной близости отсутствуют общественные и административные здания.

Стоит отметить, что для станций, установленных в жилых домах (DCH, PTG) снижение мощности шума относительно средних значений за прошлые периоды в "ночное" время превышает аналогичные значения в "дневное" время.

Спектральная мощность шума, регистрируемая на станциях, установленных в зданиях организаций, отвечающих за здоровье и безопасность населения: краевая больница и МЧС (GK004,

GK005), близка к среднегодовым значениям. Станция DAL и PET также не проявили "чувствительности" к исследуемому периоду. Станция DAL, расположена на окраине небольшого поселка, рядом нет общественных зданий, антропогенное влияние на станцию, по-видимому, не значительное. Станция PET, расположена на склоне горы рядом с административным центром города, в радиусе 130 метров от станции есть несколько одноэтажных жилых домов. Ближайшие административные здания и многоквартирные дома располагаются в 130-200 метрах, также в 200 метрах проходит центральная городская дорога, соединяющая два района города (Советский и Ленинский). Вероятно, скальный грунт на котором расположена станция и относительная удаленность, значительно снижает антропогенный вклад, в сейсмический шум регистрируемый на станции.

Сильно непропорциональное "снижение" мощности шума относительно прошлых периодов демонстрирует станция ADM. Станция располагается в 250 метрах от станции PET, в здании краевой администрации. Для "дневного" времени рабочих дней уровень шума близок к минимальному, для "ночного" времени рабочих и выходных дней для канала HNN (направление Ю-С), отмечается значительное снижение шума в апреле 2020 года. Стоит отметить, что здание администрации расположено по длине с севера на юг и параллельно этому направлению вдоль здания в непосредственной близости проходит главная дорога города.

Заключение

Работа представляет поверхностный обзор изменения мощности сейсмического шума в период вынужденной изоляции населения. Предположение о влиянии особого режима работы организаций введенного на территории России с 4 по 30 апреля 2020 г., на состав сейсмического шума получило подтверждение. Проведен анализ изменения уровня спектральной плотности мощности шума по сравнению с типичными данными полученными за период многолетних наблюдений по каждой станции и по группе станций в целом.

Для дальнейшего исследования большой интерес вызывает частотный анализ антропогенных факторов, для установления связи конкретных человеческих действий (пешее движение, транспорт, работа инженерных сооружений и др.) проявившиеся или наоборот исчезнувшие в апреле 2020 г.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

Список литературы

1. *Чеброва А.Ю., Матвеенко Е.А.* Исследование вариаций сейсмического шума на станциях КФ ГС РАН в 2014 году. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Пятой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 27 сентября - 3 октября 2015 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Обнинск: ГС РАН, 2015. С. 111–116.

2. *Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеенко Е.А., Чебров Д.В.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. том 21. № 3. С. 66–91.

3. *Lecocq T, Hicks SP, Van Noten K, et al.* Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures // Science. 2020. V. 369. P. 1338–1343. https://doi.org/10.1126/science.abd2438.

4. *Kasper van Wijk1, Calum J. Chamberlain, Thomas Lecocq, Koen Van Noten.* Seismic monitoring of the Auckland Volcanic Field during New Zealand's COVID-19 lockdown // Solid Earth. 2021. V. 12. P. 363–373. https://doi.org/10.5194/se-12-363-2021.

5. *McNamara D. E. and Boaz R.I.* Seismic Noise Analysis System Using Power Spectral Density Probability Density Functions: A Stand-Alone Software Package // Open-File Report 2005-1438. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2006. 108 p.

6. *McNamara D. E., Hutt C. R., Gee L. S., et al.* Method to Establish Seismic Noise Baselines for Automated Station Assessment // Seismological Research Letters. 2009. V. 80. N. 4. P. 628–637. https://doi.org/10.1785/gssrl.80.4.628.

7. *Roy, K.S., Sharma, J., Kumar, S., Kumar, M.R.* Effect of coronavirus lockdowns on the ambient seismic noise levels in Gujarat, northwest India // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 1–13.

УДК 550.34

ПРИМЕНЕНИЕ ГОСТ 34511–2018 (МШИЗ-18) И ГОСТ Р 57546–2017 (ШСИ-17) В АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Митюшкина С.В., Ромашева Е.И., Матвеенко Е.А.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, mitik@emsd.ru

Введение

Оценка интенсивности ощутимых землетрясений, зарегистрированных КФ ФИЦ ЕГС РАН до 1 сентября 2017 г., осуществлялась специалистами по шкале сейсмической интенсивности MSK-64 [1]. С 1 сентября 2017 г. для оценки макросейсмической интенсивности введен впервые национальный стандарт РФ ГОСТ Р 57546–2017 – шкала сейсмической интенсивности ШСИ-17 [4]. Затем с 1 сентября 2019 г. в качестве национального стандарта РФ введен принятый 20 декабря 2018 г. межгосударственный стандарт ГОСТ 34511–2018 – макросейсмическая шкала интенсивности землетрясений МШИЗ-18 [2]. Обе шкалы в настоящее время являются действующими. Установленный в них порядок получения оценки интенсивности ощутимого землетрясения в баллах позволяет использовать шкалы в автоматической обработке макросейсмической информации, полученной через online-анкету КФ ФИЦ ЕГС РАН (http://www.emsd.ru/lsopool/poll.php) [3]. В работе представлено сравнение результатов автоматических оценок интенсивностей двух алгоритмов, используемых в шкалах ШСИ-17 и МШИЗ-18, по данным ощутимых землетрясений до 5 баллов.

Методика исследования

Для отладки работы алгоритмов оценки интенсивности по шкалам ШСИ-17 и МШИЗ-18 использовались 444 анкеты, поступившие в макросейсмическую базу данных (МБД) в большинстве своем от жителей г. Петропавловска-Камчатского. Анкеты представляют шесть ощутимых землетрясений с интенсивностью сотрясения в городе от 2–3 до 4–5 баллов. Выбор событий с такой интенсивностью в пункте был сделан не случайно. Землетрясения интенсивностью до 5 баллов часто происходят в Камчатском крае; для их исследования и автоматической оценки интенсивности в МБД достаточно данных двух приоритетных категорий-сенсоров «Люди» и «Предметы быта». В работе анкеты рассматривались без учета этажа, привязки к конкретному пункту или событию.

Применялись два способа вычисления интенсивности по средней оценке реакции классов r категорий-сенсоров «Люди» и «Предметы быта» – по интервалам $0.05 \le r_{л1} < 0.2$ – 2 балла, $0.2 \le r_{л1} < 0.7$ – 3 балла и т.д. и с помощью линейной интерполяции ($I(r) = I_i + (r-r_i)/(r_{i+1}-r_i)$; значения границ реакции берутся из таблиц приложений В, Г ГОСТ Р 57546–2017 и А, Б ГОСТ 34511–2018.

Чтобы сравнить результаты двух алгоритмов с оценкой специалиста (экспертной интенсивностью), все использованные анкеты были пересмотрены специалистом только по рассматриваемым выше двум категориям-сенсорам. Оценка проводилась с помощью таблиц приложений В, Г ГОСТ Р 57546–2017 и А, Б ГОСТ 34511–2018 без использования столбцов «Прочие признаки» и «Средняя оценка реакции».

Обсуждение результатов

В рамках работы для каждой анкеты было рассчитано 5 типов интенсивности: экспертная $I_{эк}$ и автоматические по шкалам ШСИ-17 и МШИЗ-18, полученные по интервалам ($I_{ШСИ-17}$ и $I_{МШИЗ-18}$) и с помощью линейной интерполяции ($I_{ШСИ-17*}$ и $I_{МШИЗ-18*}$). Обобщенные результаты представлены на рис. 1 и 2 (нулевые значения интенсивности $I_{МШИЗ-18}$ и $I_{МШИЗ-18*}$ на рисунках получены из-за нулевых весовых коэффициентов категорий-сенсоров «Люди» и «Предметы быта» (таблица 1 ГОСТ 34511–2018)). В таблицах 1 и 2 даны медианные значения и стандартные отклонения автоматических интенсивностей от экспертных оценок и автоматических интенсивностей между собой.

Таблица 1. Медиана ($\overline{\Delta}$) и стандартное отклонение (σ) разности автоматических интенсивностей $I_{МШИЗ-18}$, $I_{МШИЗ-18*}$, $I_{ШСИ-17}$, $I_{ШСИ-17*}$ с экспертной интенсивностью $I_{эк}$

$\Delta(I_{МШИЗ-18}-I_{эк})$		$\Delta(I_{МШИЗ-18*}-I_{эк})$		$\Delta(I_{ШСИ-17}-I_{эк})$		$\Delta(I_{ШСИ-17*}-I_{эк})$	
$\overline{\Delta}$	σ	$\overline{\Delta}$	σ	$\overline{\Delta}$	σ	$\overline{\Delta}$	σ
1.5	0.74	1.4	0.68	0.8	0.59	0.7	0.65

Таблица 2. Медиана ($\overline{\Delta}$) и стандартное отклонение (σ) между результатами автоматических интенсивностей по шкалам МШИЗ-18 и ШСИ-17

$\Delta(I_{МШИЗ\text{-}18}\text{-}I_{ШСИ\text{-}17})$		$\Delta(I_{МШИЗ\text{-}18*}\text{-}I_{ШСИ\text{-}17*})$		$\Delta(I_{МШИЗ\text{-}18}\text{-}I_{МШИЗ\text{-}18*})$		$\Delta(I_{ШСИ\text{-}17}\text{-}I_{ШСИ\text{-}17*})$	
$\overline{\Delta}$	σ	$\overline{\Delta}$	σ	$\overline{\Delta}$	σ	$\overline{\Delta}$	σ
0.6	0.57	0.7	0.55	0	0.21	0.1	0.21

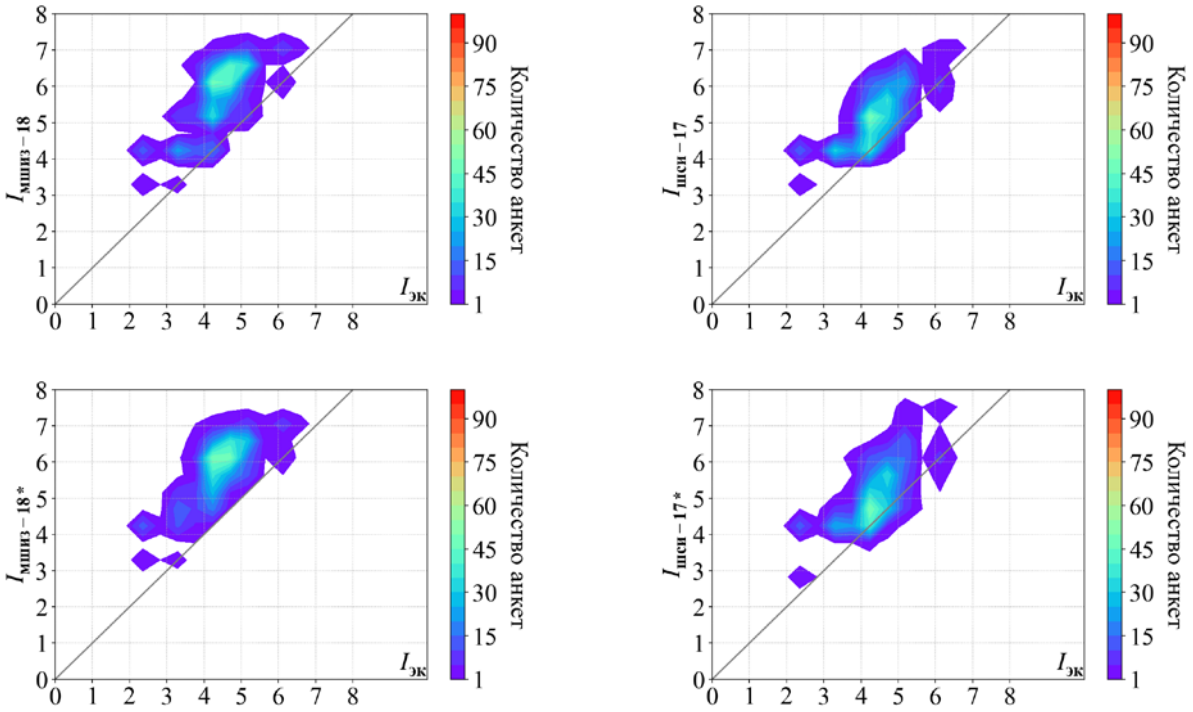


Рис. 1 Сравнение значений экспертных интенсивностей $I_{эк}$ с соответствующими автоматическими интенсивностями $I_{МШИЗ\text{-}18}$, $I_{МШИЗ\text{-}18*}$, $I_{ШСИ\text{-}17}$ и $I_{ШСИ\text{-}17*}$

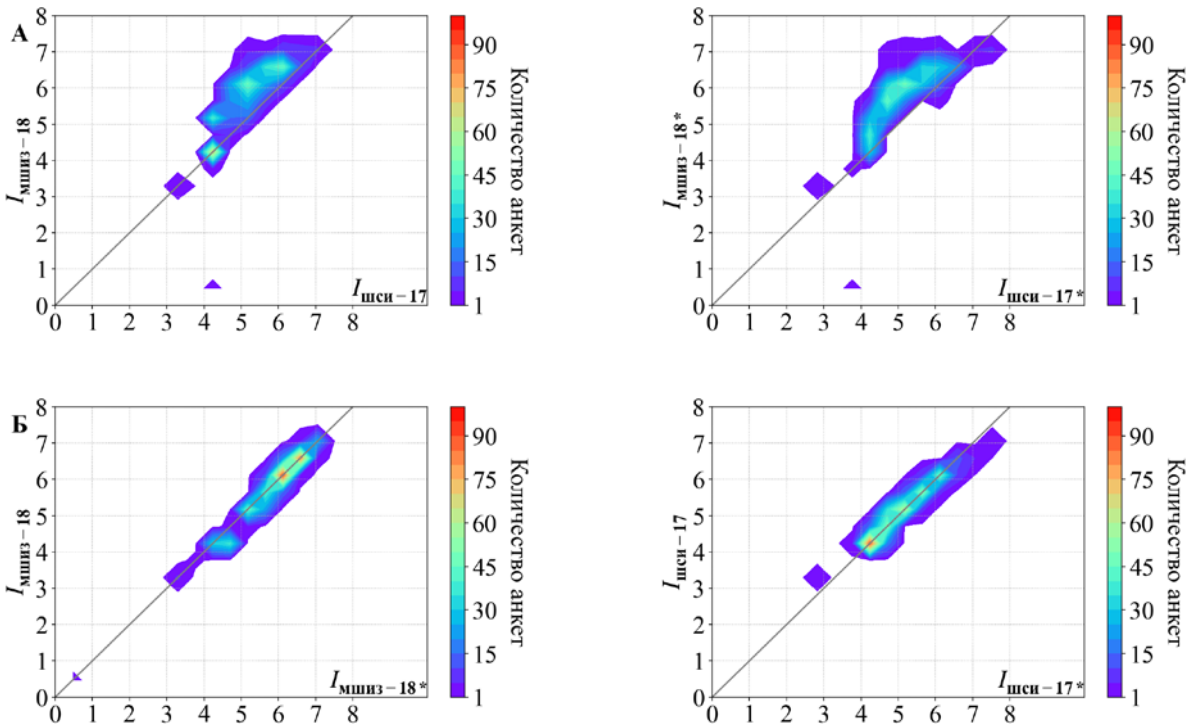


Рис. 2 (А) Сравнение результатов соответствующих автоматических интенсивностей по шкалам МШИЗ-18 и ШСИ-17 между собой (слева – определение по интервалам, справа со * – с помощью линейной интерполяции); (Б) сравнение результатов двух способов определения автоматической интенсивности по каждой из шкал

Значения экспертных интенсивностей $I_{эк}$ ниже соответствующих значений автоматических интенсивностей $I_{МШИЗ-18}$, $I_{МШИЗ-18*}$, $I_{ШСИ-17}$, $I_{ШСИ-17*}$ (рис. 1), что также согласуются с медианными значениями (таблица 1). При сравнении автоматических интенсивностей $I_{ШСИ-17}$ с $I_{МШИЗ-18}$ и $I_{ШСИ-17*}$ с $I_{МШИЗ-18*}$, полученных по шкалам МШИЗ-18 и ШСИ-17, значения выше по МШИЗ-18 (рис. 2А, таблица 2). Это может быть связано с различием в шкалах весовых коэффициентов для категорий-сенсоров «Люди» и «Предметы быта» и разными границами интервалов средней оценки реакции для одинаковых интенсивностей или некорректной реализацией алгоритма в программе. Сравнение автоматических интенсивностей $I_{МШИЗ-18}$ с $I_{МШИЗ-18*}$ и $I_{ШСИ-17}$ с $I_{ШСИ-17*}$, полученных по интервалам и с помощью линейной интерполяции, показывает, что различие значений соответствующих интенсивностей незначительно (рис. 2Б, таблица 2). Следовательно, в автоматической обработке анкетных данных можно использовать любой из способов; в дальнейшем основным способом расчета автоматической интенсивности для исследования и обработки землетрясений будет метод вычисления с помощью линейной интерполяции.

На основе представленных результатов важно:

• исследовать, как изменяются значения автоматических интенсивностей по отношению к соответствующим экспертным оценкам, определенным только по одной категории-сенсору «Люди» или «Предметы быта»;

• вычислить коэффициенты корреляции между экспертной оценкой интенсивности и автоматическими оценками по алгоритмам шкал МШИЗ-18 и ШСИ-17.

Заключение

Разработана программа на основе алгоритмов шкал МШИЗ-18 и ШСИ-17 только с использованием категорий-сенсоров «Люди» и «Предметы быта». Проведено сравнение результатов работы этой программы с экспертными оценками. С учетом шага экспертной оценки 0.5 балла и максимального стандартного отклонения в 0.7 балла, полученного при сравнении интенсивностей, можно сделать вывод об удовлетворительной работе разработанной программы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

Список литературы

1. Медведев С.В. (Москва), Шпонхойер В. (Иена), Карник В. (Прага). Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с.

2. Межгосударственный Стандарт ГОСТ 34511–2018. Землетрясения. Макросейсмическая шкала интенсивности. М.: Стандартинформ, 2019.

3. Митюшкина С.В., Токарев А.В., Раевская А.А., Чеброва А.Ю. Автоматическая обработка макросейсмической информации по камчатским землетрясениям на базе Интернет-опросника // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9–15 октября 2011 г. / Отв. В.Н. Чебров. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 376–380.

4. Национальный Стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 57546–2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. М.: Стандартинформ, 2017.

УДК 550.34

ИСТОРИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ВОПРОСЫ МОНИТОРИНГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИБАЙКАЛЬЯ И ЗАБАЙКАЛЬЯ

Папкова А.А., Гилева Н.А.

БФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Иркутск, Россия, alalp@inbox.ru

История сейсмических наблюдений

Байкальская рифтовая зона – это уникальный регион мира, который отличается высокой сейсмической активностью. Одним из примеров сильных землетрясений является Цаганское 12.01.1862 г. с эпицентром в северо-восточной части дельты р. Селенги. Интенсивность сотрясений в эпицентре достигала I_0=10 баллов. В результате землетрясения под воду ушла территория площадью около 230 км^2, образовался новый залив – Провал. Необходимость регулярных сейсмических наблюдений в Восточной Сибири стала ясна еще в конце 19 века. Александр Петрович Орлов, создатель первых каталогов землетрясений России, в 1868 году начинает деятельность по организации метеорологической службы и инструментальных наблюдений за землетрясениями в Иркутске. По его инициативе Постоянной центральной сейсмической комиссией Академии наук было принято решение об организации сейсмической станции при Иркутской обсерватории. Организацией сети сейсмических станций занимался Аркадий Викторович Вознесенский, директор Иркутской магнитно-метеорологической обсерватории. Станция «Иркутск», которая стала третьей в Российской империи и первой в Сибири, приступила к регулярным наблюдениям 2 декабря 1901 г. [1, 5].

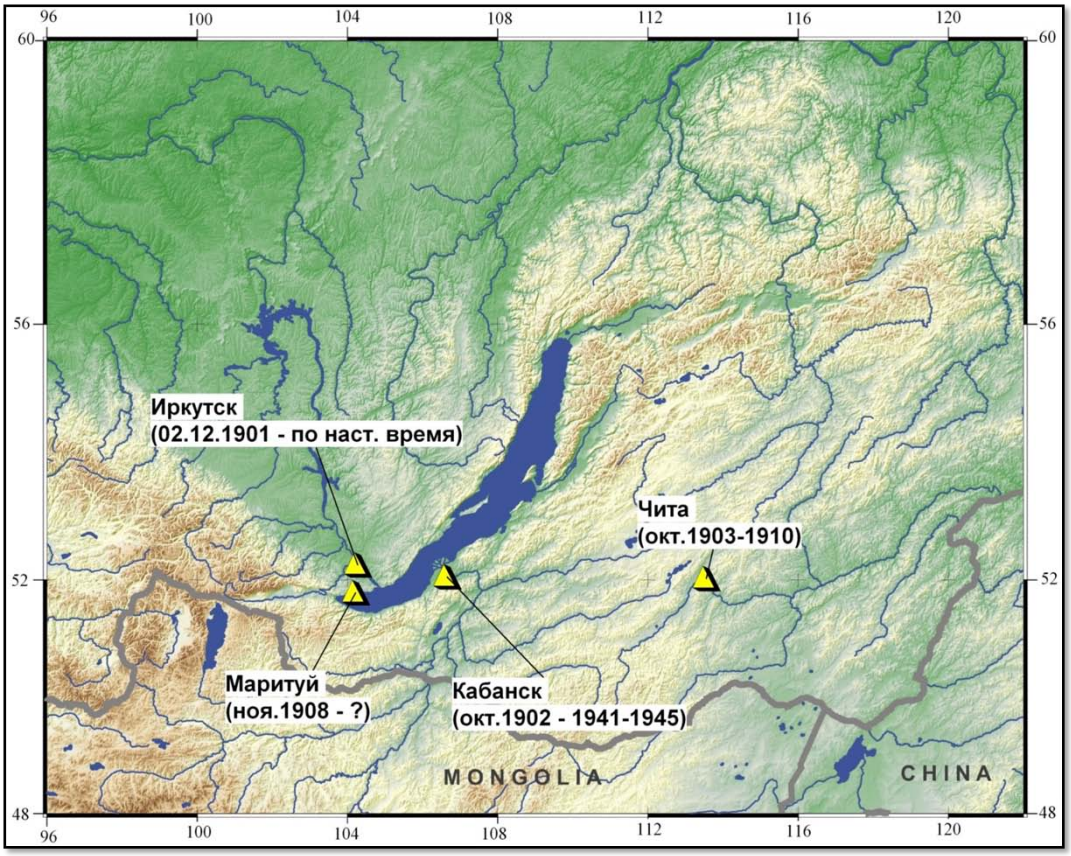


Рис. 1. Сейсмические станции в Прибайкалье начала XX века [3].

По инициативе А.В.Вознесенского в 1902 г. начали работать аналогичные станции в Кабанске, Красноярске, а в 1903 г. – в Чите. Центром сейсмометрических исследований в Сибири стала сейсмическая станция «Иркутск». С 1904 г. материалы наблюдений начали публиковаться в «Бюллетене Центральной сейсмической комиссии». Изначально сейсмическая регистрация велась приборами с механической регистрацией колебаний почвы - двумя маятниками Омори-Боша и одним маятником Мильна. Из-за несовершенства аппаратуры и методики наблюдений были значительные

погрешности при определении координат эпицентра и времени землетрясения. Точность регистрации улучшилась в 1911 году после оборудования сейсмостанции новыми сейсмографами с гальванометрической регистрацией, разработанными Борисом Борисовичем Голицыным. С помощью способа, разработанного им же, стало возможным определять координаты эпицентров землетрясений по наблюдениям одной станции [1].

Период революции 1917 г. и гражданской войны был особенно сложным для иркутской сейсмической станции. Лишь в 1923 г. усилиями профессора Торичана Павловича Кравеца работа сейсмической станции «Иркутск» была полностью восстановлена.

В 1926 -1963 гг. руководителем сейсмической станции «Иркутск» становится коллега Т.П. Кравеца Андрей Алексеевич Тресков. Основным направлением исследований А.А. Трескова были сейсмология и методы интерпретации сейсмометрических наблюдений. На первом этапе этих работ, относящихся к 30—40 годам XX века, он занимался интерпретацией наблюдений глубинных землетрясений и вопросами строения земной коры и мантии. Следует отметить разработанный им в 1947 г. телесейсмический способ определения мощности земной коры с использованием волн, отражённых от ее подошвы. Этот способ позволяет оценивать мощность не только земной коры, но и других, более глубоких внутримантийных границ в любых районах земного шара [5].

В 50-х годах произошли три сильнейших землетрясения Прибайкалья: Мондинское в 1950 г. (M=7.0), Муйское в 1957 г. (M=7.6) и Средне-Байкальское в 1959 г. (M=6.8). Эти события в значительной мере возродили интерес к изучению сейсмичности Прибайкалья. До этого момента постоянно действующей в регионе была единственная станция «Иркутск». В 1951 г. была вновь открыта сейсмическая станция «Кабанск», а затем, в 1952 г., открылась станция в Кяхте [3].

В 60-е годы регистрацию землетрясений осуществляли уже на 15-ти сейсмических станциях.

В 1979 г. на базе сети сейсмических станций Института земной коры была организована Байкальская опытно-методическая сейсмологическая экспедиция (ныне БФ ФИЦ ЕГС РАН). Основное направление работы — сейсмический мониторинг территории Восточной Сибири. В состав экспедиции входило 28 стационарных сейсмических станций, расположенных на территории Иркутской, Читинской областей и Республики Бурятия. Возглавил образованную Байкальскую экспедицию Олег Константинович Масальский, которой руководил до 2018 года.

Современный сейсмический мониторинг

В настоящее время БФ ФИЦ ЕГС РАН располагает сведениями о более чем 250 тыс. землетрясений, зарегистрированных в результате инструментальных наблюдений. Анализ и обобщение накопленных материалов позволили оценить реальную сейсмическую обстановку исследуемой территории. Основной целью создания системы сейсмологических наблюдений является последовательное снижение рисков чрезвычайных ситуаций, повышение защищённости критически важных объектов для обеспечения безопасной жизнедеятельности и устойчивого развития Байкальской зоны. Важно, чтобы система наблюдений отличалась надёжностью, быстротой реагирования и минимальной погрешностью получаемых данных.

В состав сети Байкальского филиала Геофизической службы РАН входит 25 сейсмических станций, оборудованных аппаратурой и сигнализацией на превышение установленного критерия по амплитуде регистрируемых колебаний. 12 сейсмостанций расположены на территории Республики Бурятия, 8 на территории Иркутской области и 5 – на территории Забайкальского края. 21 сейсмическая станция расположена в пределах Байкальской рифтовой зоны, где регистрируется максимальное количество землетрясений. 4 станции располагаются вне зоны, с их помощью уточняют координаты эпицентров внутри Байкальской сейсмической зоны [4].

Все станции сети цифровые и оборудованы как сейсмометрами с чувствительными каналами, которые дают возможность регистрировать скорости колебаний от 0,01-0,1 мкм/с до 100-1000 мкм/с, так и сейсмометрами с грубыми каналами, которые регистрируют ускорения до 100-250 см/с2 (возможность регистрации и обработки сильных землетрясений). В последние годы на 4 станциях БФ ФИЦ ЕГС РАН, в дополнение к цифровым сейсмическим станциям, установлены трехкомпонентные широкополосные высокочувствительные сейсмометры «Guralp CMG-3ESPCD».

Для автоматического получения цифровых сейсмических записей со станций сети в режиме реального времени используется программный комплекс «Send_Agent & Receive_Agent». Комплекс был создан специалистами БФ ФИЦ ЕГС РАН и используется с 2010 года. Использование комплекса позволило уменьшить время обработки сильных землетрясений и улучшить качество представляемых данных. Одна из функций комплекса — оперативный контроль состояния регистрирующей аппаратуры и качества материалов наблюдений.

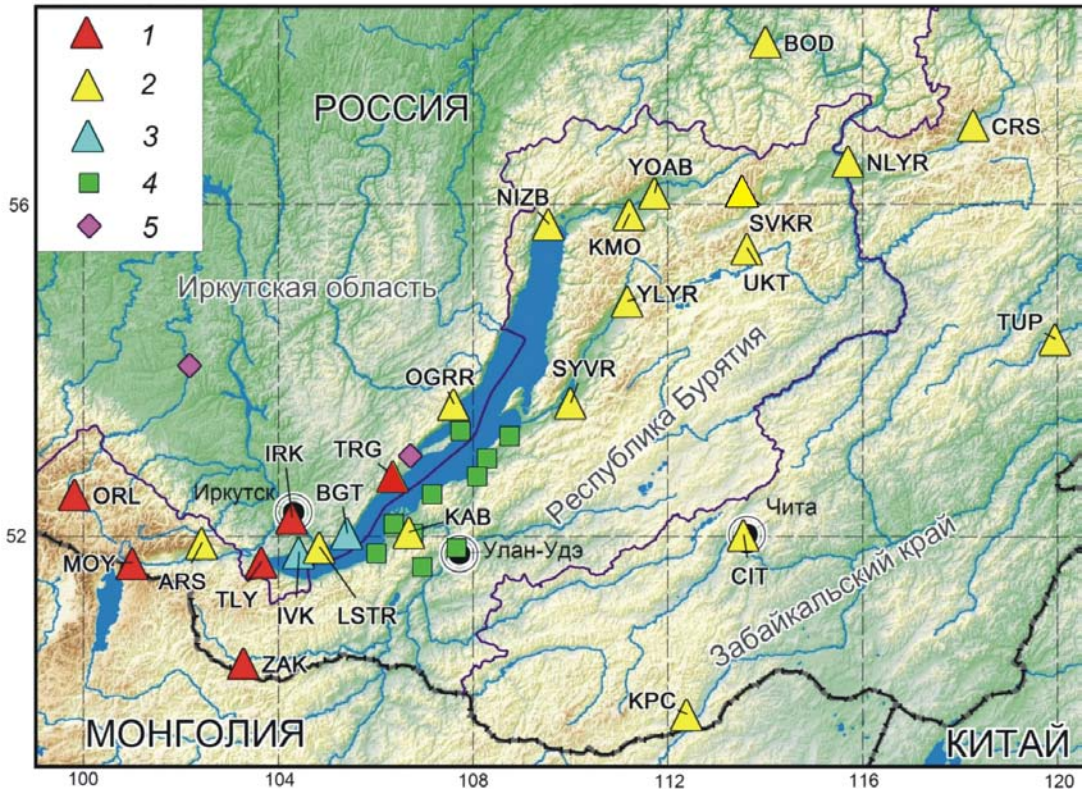


Рис. 2. Сеть сейсмических станций Прибайкалья и Забайкалья в 2020 г. 1, 2, 3 – сеть Байкальского филиала оснащена: 1 – короткопериодными (N, E, Z), широкополосными (N, E, Z) велосиметрами и акселерометрами (N, E, Z); 2 – короткопериодными (N, E, Z) велосиметрами и акселерометрами (N, E, Z); 3 – короткопериодными (N, E, Z) велосиметрами; 4 - сеть Бурятского филиала; 5 - временные станции, установленные совместно с ИЗК СО РАН.

С 1.01.2012 года в Центре сбора информации БФ ФИЦ ЕГС РАН внедрена программа автоматической обработки региональных землетрясений «AutoBykl». Более половины землетрясений Байкальской зоны с $K_P \geq 9.5$ обработаны данной программой до 5 минут с момента события. Разница между автоматической локализацией эпицентров и ручной обработкой составляет 3-5 км [7].

В 2020 году Центральной сейсмической станцией «Иркутск» в структуры МЧС были переданы 34 срочных донесения о сильных землетрясениях со средним временем подачи 15.8 мин. Продолжается тестирование и внедрение нового программного обеспечения.

Прикладной задачей сейсмического мониторинга является изучение локальной сейсмической активности. Цель проведения таких работ – получение достоверной информации о глубинах землетрясений, уточнение пространственной приуроченности землетрясений к тем или иным тектоническим структурам и анализ механизмов очагов землетрясений.

Примерами организации локального сейсмического мониторинга являются: 1) сеть из восьми временных цифровых сейсмических станций, установленная БФ ФИЦ ЕГС РАН совместно с ИФЗ РАН в первые дни после Култукского землетрясения 27.08.2008 г. (Mw=6.3, I0=8–9) на юге оз. Байкал; 2) временная сеть из шести сейсмостанций, развернутая при содействии сотрудников Восточно-Сибирской железной дороги в январе 2015 г., когда активизировался сейсмический процесс на территории Северо-Муйского района Байкальской рифтовой зоны (БРЗ); 3) через 19 часов после Быстринского землетрясения 21.09.2020 г. (Mw=5.5) на юго-западном фланге БРЗ совместно с ИЗК СО РАН были установленные семь станций; 4) две временные сейсмостанции (работающие по сегодняшний день) были выставлены на расстоянии менее 100 км от очага после Хубсугульского события 11.01.2021 г. (Mw=6.8) вблизи границы с Монголией.

Использование материалов наблюдений локальных сетей позволило увеличить число зарегистрированных землетрясений за счет слабых событий, а также улучшить точность их локализации. С момента главного толчка Култукского землетрясения до конца года было зарегистрировано около 1800 афтершоков с $K_P \geq 4$. Для Муяканской последовательности за полтора месяца действия локальной сети зарегистрировано более 14 тыс. землетрясений с K_P=3–6. Удалось установить, что гипоцентры большинства землетрясений Муяканской последовательности

располагаются на малых глубинах (h=4–10 км), при этом основным режимом сейсмотектонического деформирования земной коры являлось субгоризонтальное СЗ-ЮВ растяжение. Важный аспект проведенного исследования заключается в выявлении степени влияния данной активизации на сейсмическую безопасность Северомуйского тоннеля. Также оценены глубины афтершоков Хубсугульской последовательности в пределах 11–26 км [2, 6].

Заключение

В истории становления и развития сейсмической станции «Иркутск» большой вклад выдающихся сейсмологов своего времени. Ими были заложены основы и разработаны методы сейсмического мониторинга Прибайкалья и Забайкалья. В процессе работы современной сети сейсмических станций БФ ФИЦ ЕГС РАН продолжают разрабатываться и внедряться новые методы обработки данных, получаемых в результате сейсмологического мониторинга Байкальской рифтовой зоны. Обобщается информация о закономерностях сейсмического режима, механизмах очагов землетрясений, интенсивности сотрясений, проводится комплексный анализ очаговых зон сильных землетрясений. Полученные данные используются при уточнении сейсмической опасности территории, построении новых карт ОСР и ДСР, для прогнозных оценок параметров колебаний грунта при сильных землетрясениях [4]. Дальнейшее расширение сети станций сейсмологических наблюдений на территории Прибайкалья и Забайкалья, оснащение их новым современным оборудованием и средствами связи положительно скажется на детальности и результативности сейсмотектонического мониторинга территории региона.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках темы НИР АААА-А20-120060890034-7 госзадания № 075-00576-21ПР ФИЦ ЕГС РАН и поддержке РФФИ (проект № 20-05-00823).

Список литературы

1. *Голенецкий С.И.* Сейсмичность Прибайкалья - история ее изучения и некоторые итоги. В кн.: Сейсмичность и сейсмогеология Восточной Сибири. М.: Наука, 1977. С. 3–42.

2. *Гилёва Н.А., Масальский О.К., Кобелева Е.А.* Эпицентральная область Муяканской последовательности землетрясений (Бурятия) // Землетрясения России в 2015 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 103–107.

3. *Гилева Н.А., Масальский О.К., Мельникова В.И.* Развитие сейсмических наблюдений в Прибайкалье // Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием. 50 лет сейсмологического мониторинга Сибири. Новосибирск, 2013 г. С. 12–16.

4. *Кобелева Е.А., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А.* Отчет о результатах сейсмологических работ БФ ФИЦ ЕГС РАН за 2020 год. Иркутск, 2021 г. 95 с.

5. *Леви К.Г., Потапов В.А., Масальский О.К.* Развитие сейсмических наблюдений в Сибири // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 9. С. 1425–1427.

6. *Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И.* Култукское землетрясение 27 августа 2008 г. с Mw=6.3, I0=8–9 (Южный Байкал) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 386–407.

7. *Хритова М.А., Гилева Н.А.* Автоматическая обработка региональных землетрясений Прибайкалья и Забайкалья // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48. № 2. С. 15–27.

УДК 556.045

УДАЛЕННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ВАРИАЦИЯХ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ДАННЫМ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО»

Петухова С.М., Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Батухтин И.В.

Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской академии наук, г. Москва, sofiya.petukhova@gmail.com

Введение

Гидрогеологические отклики флюидонасыщенного коллектора описываются двумя возможными типами моделей: статической и динамической [8]. Модель статической деформации предполагает необратимые изменения свойств коллектора, вызванные распространением разрывов вдоль разлома, сопряженного с очагом землетрясения. Модели динамической деформации основаны на теории пороупругости [3]. К одному из факторов, влияющему на состояние флюидонасыщенных коллекторов, относится сейсмическое воздействие, связанное с землетрясениями, происходящими на разных эпицентральных расстояниях от пунктов наблюдений. В качестве индикатора изменения фильтрационных свойств коллекторов рассматриваются вариации уровней подземных вод и порового давления, вызванные прохождением сейсмических волн от разных типов источников – природных и техногенных [2].

Данные регистрации сейсмического воздействия на флюидонасыщенный коллектор могут быть использованы для определения пороупругих свойств с учетом объемной и девиаторной деформации. В данной статье представлены предварительные результаты расчета порового давления на основе пороупругой модели, представленной в работе [7]. Объектом исследований является водонасыщенный карбонатный коллектор, вскрытый в скважине, расположенной на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево»). Выделенные гидрогеологические эффекты в напорном водоносном горизонте использованы для сопоставления с теоретически рассчитанным поровым давлением по сейсмическим данным регистрации удаленных землетрясений.

Методика исследований

Прецизионный мониторинг уровня напорного водоносного горизонта проводится на территории ГФО ИДГ РАН «Михнево» с февраля 2008 г. Наблюдательная скважина глубиной 115 м оборудована погружным датчиком уровня LMP308i (производство Германия), установленным на 1 м ниже уровня воды [4]. Напорный водоносный горизонт вскрыт в интервале 92-115 м. Водовмещающие породы представлены известняком неравномерно трещиноватым с подчиненными прослоями глины и мергеля. За период наблюдений с 2008 по 2019 гг. отмечен общий тренд подъема уровня на 7 м. Минимальное положение уровня 71.9 м было зарегистрировано 01.04.2011 г., максимально высокое - 64.9 м 13.06.2018 г. Величина напора варьирует от 20.1 до 27.1 м.

Сейсмическая регистрация ведется широкополосными сейсмометрами STS-2 и CM-3-E с частотой опроса 100 Гц, установленными в шахте на глубине 20 м. При сопоставлении с гидрогеологическими данными частота дискретизации сейсмических записей приведена к 1 Гц. Максимальные значения амплитуд скорости смещения грунта (Vp-p) и уровня напорного горизонта определялись между последовательным максимумом и минимумом в скользящем окне длительностью 72 с и перекрытием 50% на сейсмограммах и диаграммах уровня соответственно при регистрации откликов на удаленные землетрясения.

По сейсмическим и гидрогеологическим данным за 3 часа до прихода волны на станцию и через 3 часа после рассчитывалось отношение модулей спектров скорости смещения грунта и колебаний уровня воды с целью удаления влияния локальных особенностей расположения станции. При последующем делении спектра уровня воды на спектр скорости грунта на определенных ранее частотах, соответствующих синхронизации пиковых значений, рассчитывался амплитудный фактор (χ), который является параметром отклика уровня воды в скважине на прохождение сейсмических волн от землетрясений [6]. Для определения пороупругих свойств водонасыщенного коллектора и оценки порового давления (Δp_f) использовано выражение, представленное в работе [7]:

$$\Delta p_f = B\,K_u \frac{1-2\nu_u}{1-\nu_u}\frac{v_R}{V_{R,L}} + N\,\frac{1}{2}\frac{v_T}{V_{R,L}}\,, \#(1)$$

где B – коэффициент Скемптона, K_u – недренированный модуль объемной упругости, ν_u – коэффициент Пуассона для недренированных условий, v_T и v_R – трансверсальная и радиальная скорости смещения грунта, N – коэффициент связи деформации сдвига, $V_{R,L}$ – $V_{R,\,L}$ – скорости волны Рэлея, Лява.

Поровое давление в условиях деформации представлено в виде суммы объемной и девиаторной деформации. Теоретическое давление рассчитывается с использованием данных сейсмической регистрации удаленных землетрясений и сравнивается с наблюдаемым (экспериментально полученным) давлением в напорном водоносном горизонте.

Обсуждение результатов

За период наблюдений 2010-2019 гг. на территории ГФО «Михнево» в напорном водоносном горизонте зарегистрированы гидрогеологические отклики с амплитудами от 2 до 41.5 мм на 21 землетрясение M_W 6.4-9.1, произошедшее на эпицентральных расстояниях от 1864 до 14826 км (рис. 1). В соответствии с ранее проведенной типизацией выделено три типа гидрогеологических откликов в напорном горизонте [1]. I тип проявляется в узком диапазоне частот в виде косейсмических вариаций уровня подземных вод, вызванных прохождением сейсмических волн от удаленных землетрясений при максимальной скорости смещения грунта (PGV) <1 мм/с и плотности сейсмической энергии (e) $<10^{-5}$ Дж/м^3. Исключение составил гидрогеологический отклик напорного горизонта на глубокофокусное землетрясение 24.05.2013 г. в Охотском море на эпицентральном расстоянии 6492 км и M_W 8, зарегистрированный при e ~$3.3\cdot10^{-4}$ Дж/м^3.

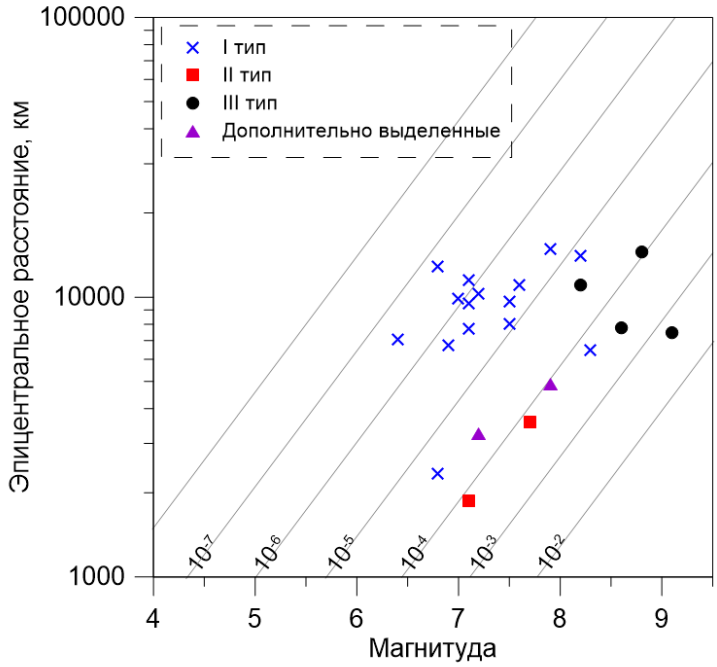


Рис. 1. Диаграмма регистрации гидрогеологических откликов напорного водоносного горизонта на удаленные землетрясения на территории ГФО «Михнево» (I-III типы гидрогеологических откликов, а также дополнительно выделенные – обозначены условными знаками, цифры на линиях – значения плотности сейсмической энергии, Дж/м^3).

II тип гидрогеологических эффектов прослежен в высоко- и низкочастотном диапазонах (в области периодов до 60 сек и более). III тип характеризуется наличием постсейсмических эффектов и отмечен в напорном водоносном горизонте при прохождении сейсмических волн от 4 землетрясений при PGV ≥ 1.8 мм/с и $M_W \geq 8.2$.

Реакция напорного горизонта на удаленные землетрясения, зарегистрированные на территории ГФО «Михнево», использована для оценки амплитудного фактора, который рассчитывается как отношение амплитудных спектров синхронизированных максимальных значений амплитуд уровня (мм) к скорости смещения грунта (мм/с) [5]. Амплитудный фактор был выделен для 5 землетрясений II и III типов (табл. 1).

Таблица 1. Основные параметры землетрясений, для которых определен амплитудный фактор и рассчитаны коэффициенты корреляции между экспериментально полученным и рассчитанным поровым давлением

№, Дата, Регион/Тип гидрогеологического отклика	**Глубина очага, км**	**Магнитуда M_w**	**Эпицентральное расстояние *r*, км**	**Плотность сейсмической энергии $e \cdot 10^{-4}$ Дж/м^3**	**Двойная амплитуда скорости смещения грунта *Vp-p*, мм/с**	**Двойная амплитуда уровня подземных вод, мм**	**Коэффициенты для расчета теоретического давления**				
							с учетом объемной и девиаторной деформации			**с учетом объемной деформации**	
							$B\,K_u\frac{1-2\nu_u}{1-\nu_u}$, ГПа	*N*, ГПа	Коэффициент корреляции R_1	$B\,K_u\frac{1-2\nu_u}{1-\nu_u}$, ГПа	Коэффициент корреляции R_2
1. Средиземноморско-Трансазиатский сейсмический пояс											
1) 2011-10-23 Турция/ II	15	7.1	1864	2.65	1.51	7.0	0.20	0.05	0.50	0.20	0.64
2) 2015-12-07 Таджикистан	33	7.2	3206	0.71	0.82	-	0.10	0.02	0.07	0.10	0.20
3) 2015-04-25 Непал	13	7.9	4783	2.17	0.66	-	0.30	0.06	0.06	0.20	0.12
2. Западно-Тихоокеанский сейсмический пояс											
4) 2011-03-11 Вост. побережье о.Хонсю/ III	20	9.1	7467	30.73	3.78	41.5	0.15	0.10	0.22	0.20	0.72
5) 2012-04-11 Зап. побережье Северной Суматры/III	25	8.6	7764	5.14	2.51	19.4	0.20	0.05	0.49	0.20	0.74
3. Восточно-Тихоокеанский сейсмический пояс											
6) 2017-09-08 Зап. побережье Чьяпас/ III	70	8.2	11024	0.47	2.46	8.0	0.20	0.04	0.33	0.20	0.36
7) 2010-02-27 Побережье Центр. Чили/III	23	8.8	14464	1.51	1.79	14.9	0.01	0.50	0.42	0.50	0.77

Применение подобного подхода к обработке данных позволило дополнительно проследить отклик напорного водоносного горизонта на два землетрясения, которые произошли в Непале 25.04.2015 г. и в Таджикистане 07.12.2015 г. (рис. 2).

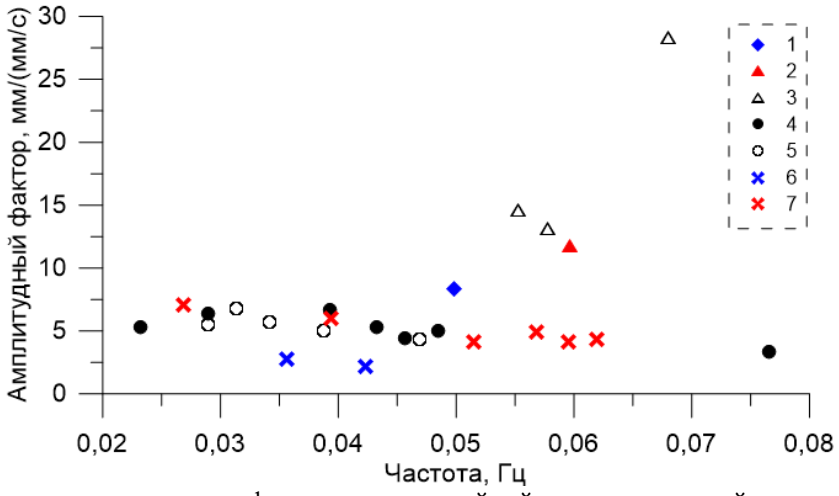


Рис. 2. Зависимость между амплитудным фактором и частотой сейсмического воздействия удаленных землетрясений (значения амплитудного фактора для землетрясений №№1-7 обозначены условными знаками).

Для 3 землетрясений с $M_W \geq 7.1$, приуроченных к Средиземноморско-Трансазиатскому сейсмическому поясу, значения амплитудного фактора изменяются от 8.3 до 14.6 мм/(мм/с). В

окрестностях резонансной частоты системы «пласт-скважина» 0.7 Гц установлено максимально высокое значение амплитудного фактора 28.3 мм/(мм/с).

Для 4 землетрясений с $M_W \geq 8.2$, произошедших в пределах Западно- и Восточно-Тихоокеанского поясов, амплитудный фактор является частотно-независимым. В диапазоне частот 0.029 и 0.046 Гц значения амплитудных факторов напорного горизонта от землетрясений вблизи побережья Хонсю 11.03.2011 г. и Суматра 11.04.2012 г. совпадают, что, вероятно, свидетельствует об однотипной динамике деформирования водонасыщенного коллектора. Минимальные значения амплитудного фактора 2.2 и 2.7 мм/(мм/с) определены в вариациях уровня напорного горизонта на частотах 0.036 и 0.042 Гц от землетрясения вблизи побережья Мексики 08.09.2017 г.

При сопоставлении нормированных амплитудных спектров, построенных по сейсмическим и гидрогеологическим данным до и после прихода сейсмических волн от перечисленных выше землетрясений, отмечено их различие. Экстремумы нормированных спектров напорного водоносного горизонта преимущественно смещены в область низких частот относительно максимальных значений, зарегистрированных по сейсмическим данным (рис. 3а). Подобие нормированных спектров скорости смещения грунта и уровня напорного горизонта отмечено в более узком диапазоне частот 0.03-0.05 Гц для среднефокусного землетрясения, произошедшего 08.09.2017 г. у западного побережья Чьяпас, Мексика (рис. 3б).

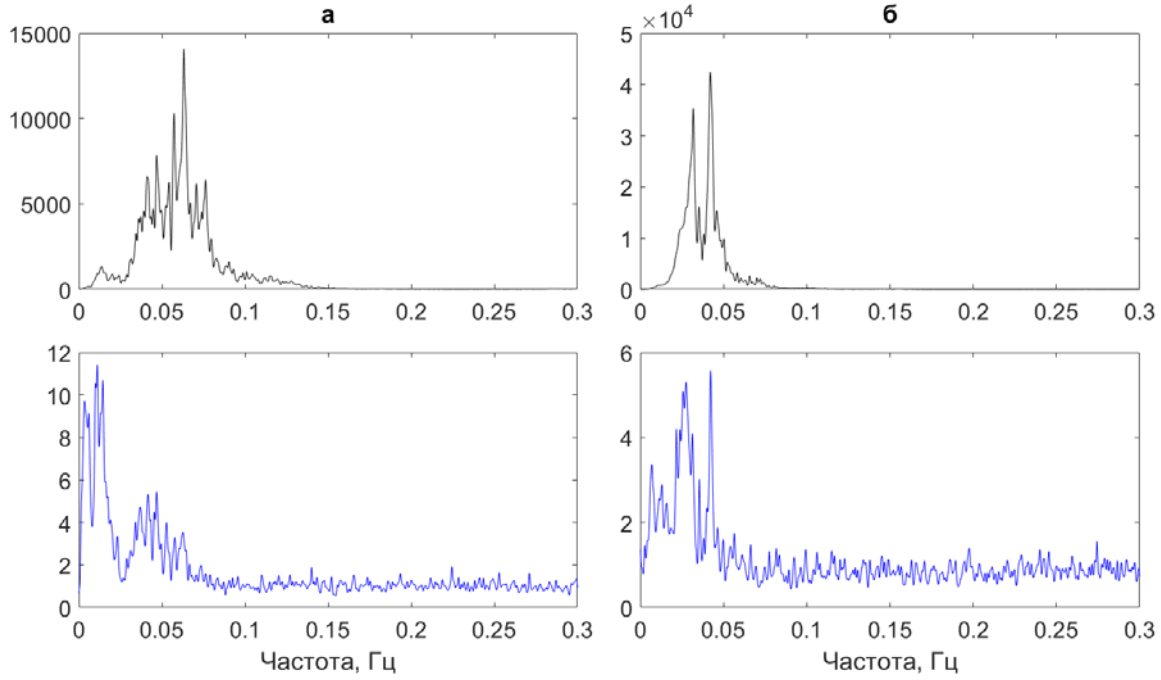


Рис. 3. Нормированные спектры скорости смещения грунта (верхний ряд) и уровня напорного водоносного горизонта (нижний ряд) для землетрясений, произошедших вблизи Северной Суматры 11.04.2012 г. M_W 8.6 (а) и в Мексике 08.09.2017 г. M_W 8.2 (б).

Для оценки параметров динамического деформирования водонасыщенного коллектора выполнен расчет по пороупругой модели в соответствии с методикой, представленной в работе [7]. Результаты предварительной оценки с учетом объемной и девиаторной деформации, а также с учетом только объемной деформации (с использованием вертикальной скорости грунта v_z) приведены в таблице 1. В ряде случаев при расчете порового давления применялась временная поправка Δt с целью выравнивания максимумов амплитуд экспериментально полученного и рассчитанного давления. Наиболее высокие коэффициенты корреляции между экспериментальными и рассчитанными волновыми формами 0.64-0.77 получены с учетом только объемной деформации водонасыщенного коллектора. В качестве примера на рисунке 4 приведены экспериментальная и теоретическая формы гидрогеологических сигналов с учетом только объемной, а также объемной и сдвиговой деформации при землетрясении 27.02.2010 г. вблизи побережья Центрального Чили.

Полученные данные соответствуют модели пороупругой реакции водонасыщенного коллектора на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений и согласуются с результатами, представленными в статье [7]. Подобный подход в дальнейшем планируется

использовать при анализе гидрогеологических откликов на сейсмические события, зарегистрированные в слабонапорном водоносном горизонте на территории ГФО «Михнево».

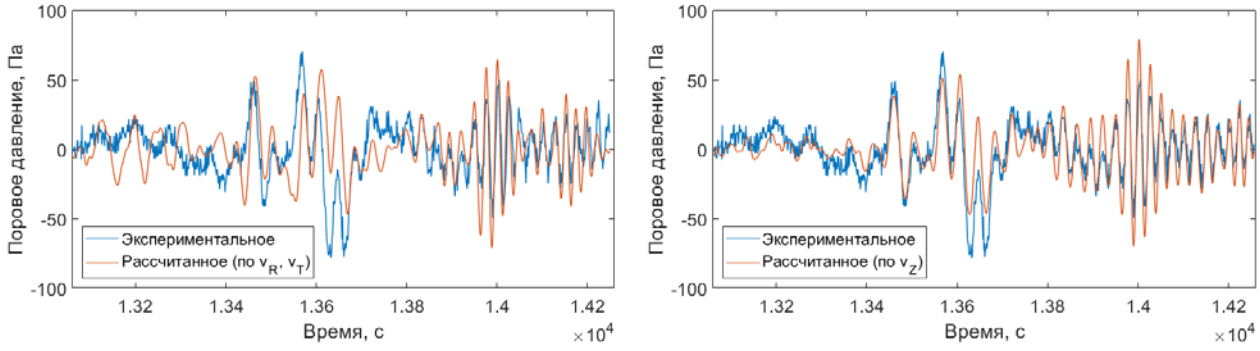


Рис. 4. Совмещенные диаграммы рассчитанной и экспериментальной форм гидрогеологических сигналов на прохождение сейсмических волн при землетрясении 27.02.2010 г. M_W 8.8 вблизи побережья Центрального Чили с учетом объемной и девиаторной деформации (а), объемной деформации (б).

Заключение

За многолетний период комплексного мониторинга, проводимого на территории ГФО «Михнево», сформирована единая база гидрогеологических, барометрических и сейсмических данных зарегистрированных землетрясений с M_W 6.4-9.1. Определены амплитудно-частотные характеристики гидрогеологических откликов, которые использованы при типизации выделенных гидрогеологических эффектов и отборе информативных данных для оценки пороупругих свойств водонасыщенного коллектора. Выполнен предварительный расчет порового давления по сейсмическим данным на основе модели пороупругости. Проведен корреляционный анализ теоретических форм гидрогеологических сигналов на прохождение сейсмических волн от 7 удаленных землетрясений с экспериментальной.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А17-117112350020-9) и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-05-00809 и № 20-35-90016.

Список литературы

1. *Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А.* Динамика деформирования водонасыщенного коллектора по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод // Динамические процессы в геосферах. Вып.10. М.: ИДГ РАН. 2018. С. 74–83.

2. *Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Батухтин И.В., Петухова С.М.* Реакция водонасыщенных коллекторов на динамическое воздействие (по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод) // Физика Земли. 2021. №. 5. С. 74–90. DOI: 10.31857/S0002333721050070

3. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. Петропавловск-Камчатский: ООО «Камчатпресс», 2019. 144с.

4. *Кочарян Г.Г., Горбунова Э.М., Копылова Г.Н., Павлов Д.В., Свинцов И.С.* Предварительные результаты прецизионных наблюдений за режимом подземных вод на территории геофизической обсерватории "Михнево". В сб. научн. тр. "Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы" ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2008. С. 52–62.

5. *Besedina A., Vinogradov E., Gorbunova E., Svintsov I.* Chilean Earthquakes: Aquifer Responses at the Russian Platform // Pure Appl. Geophys. 2016. V. 173. No 2. P. 321–330.

6. *Brodsky E.E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M.* A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes // J. Geophys. Res. Vol. 108. No. B8. 2390. 2003. P. 7-1-7-10. DOI: 10.1029/2002JB002321.

7. *Shalev E., Kurzon I., Doan M.-L., Lyakhovsky V.* Water-level oscillations caused by volumetric and deviatoric dynamic strains // Geophys. J. Int. (2016) 204. P. 841–851. DOI: 10.1093/gji/ggv483.

8. *Shi Z., Wang G., Wang C.-Y., Manga M., Liu C.* Comparison of hydrogeological responses to the Wenchuan and Lushan earthquakes // Earth. Planet. Sci. Let. 2014. V. 391. P. 193–200.

УДК 550.34

О ПРИРОДЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА, АНАЛИЗИРУЕМОГО В РАБОТАХ А.А. ЛЮБУШИНА С СОАВТОРАМИ

Салтыков В.А.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, e-mail: salt@emsd.ru

Введение

Многолетняя серия работ А.А. Любушина (с соавторами или единолично) по исследованию вариаций низкочастотного сейсмического шума хорошо известна в сейсмологическом сообществе, особенно по результатам, связываемым с прогнозом сильных землетрясений. Первые публикации, где представлен анализ таких сигналов, появились в 2005-2009 гг. [4-6, 9]. Публикации последних лет автора посвящены исследованию связи сейсмического шума с неравномерностью вращения Земли [8, 11]. Ряд статей ([1, 3, 7, 8]) посвящен анализу камчатских данных, что, безусловно, представляет особый интерес для камчатских исследователей, занимающихся проблемой прогноза сильных землетрясений.

Следует отметить, что разрабатываемый подход к анализу сейсмических сигналов в нетрадиционно низком диапазоне частот является уникальным опытом авторского коллектива, возглавляемого А.А. Любушиным, и результаты этой продолжительной работы стимулируют широкое применение такого подхода в сейсмологической практике вплоть до рутинной обработки. Именно по этой причине хотелось бы остановиться на кондиционности исходных данных с точки зрения метрологии.

Необоснованность использования несертифицированного частотного диапазона в сейсмологических исследованиях

Во всех работах А.А. Любушина с соавторами, связанных со статистическим анализом низкочастотного сейсмического шума, рассматриваются сигналы в частотном диапазоне существенно ниже заявленного в характеристиках используемых сейсмометров. В частности, речь идет о периодах от 2 до 1000 мин, в то время как нижняя частота для сейсмометра CMG-6TD – f = 0.033 Гц, что соответствует периоду T = 30 с. Отметим, что большинство исходных данных по Камчатке получено на станциях, оснащенных именно сейсмометрами CMG-6TD (12 станций из 21 используемых [1, 3, 7]). Авторы не утаивают эту проблему и пытаются как-то обосновать свой подход. К сожалению, их аргументация представляется недостаточно убедительной.

Прежде всего, бросается в глаза основной тезис: “*Здесь мы исходим из предположения, что аппаратурные ограничения по низкой частоте сигнала приводятся исключительно для корректного отображения движений грунта при отдельных землетрясениях. ... Следует заметить, что разработчиками ... аппаратуры не рассматривались задачи использования ... сейсмических записей в более широком диапазоне частот. ... Мы полагаем, что при решении задач геофизического мониторинга имеется принципиальная возможность более широкого применения ... аппаратуры, превышающая формальные ограничения на рабочую полосу частот*” [8].

И в соответствии с этими абсолютно небесспорными тезисами проводится весь последующий анализ. Интересно, что авторы не приводят ни одной ссылки на работы специалистов в области сейсмометрии. И тогда становится неясным, на каком основании базируются их “*исходим*” и “*полагаем*”. А ведь проблемой состава регистрируемого шума, включающего помимо природной компоненты также инструментальную, занимаются очень плотно, если судить по публикациям (Для примера, см. библиографический список к монографии [2]). И эта инструментальная компонента может быть вызвана множеством причин, начиная с температурных колебаний и прямого воздействия флуктуаций атмосферного давления, но не ограничиваясь ими. Причем, “*чем длиннее период сейсмического явления, который мы хотим адекватно фиксировать, тем больше влияние на приборы окружающей среды*” [2, с. 190]. И тогда возникает вопрос: а попадают ли отфильтрованные авторами низкочастотные компоненты зарегистрированных сигналов в динамический диапазон сейсмометра? В другой формулировке этот вопрос можно задать так: а является ли низкочастотный шум, анализируемый в статьях А.А. Любушина с соавторами, СЕЙСМИЧЕСКИМ?

Возникающие противоречия при рассмотрении выделяемого шума в качестве сейсмического сигнала

Авторы, очевидно, не игнорируют этот вопрос. Но и не делают никаких расчетных оценок, касающихся величины смещений, вызывающих выделенные низкочастотные сигналы[1]. Для обоснования своей позиции они выбирают косвенный подход – демонстрацию низкочастотных компонент, соответствующих собственным колебаниям Земли в спектрах мощности сигнала [8] (рис. 1). Комментарии этих графиков в статье минимальны и несодержательны: "*видно*" и хорошо.

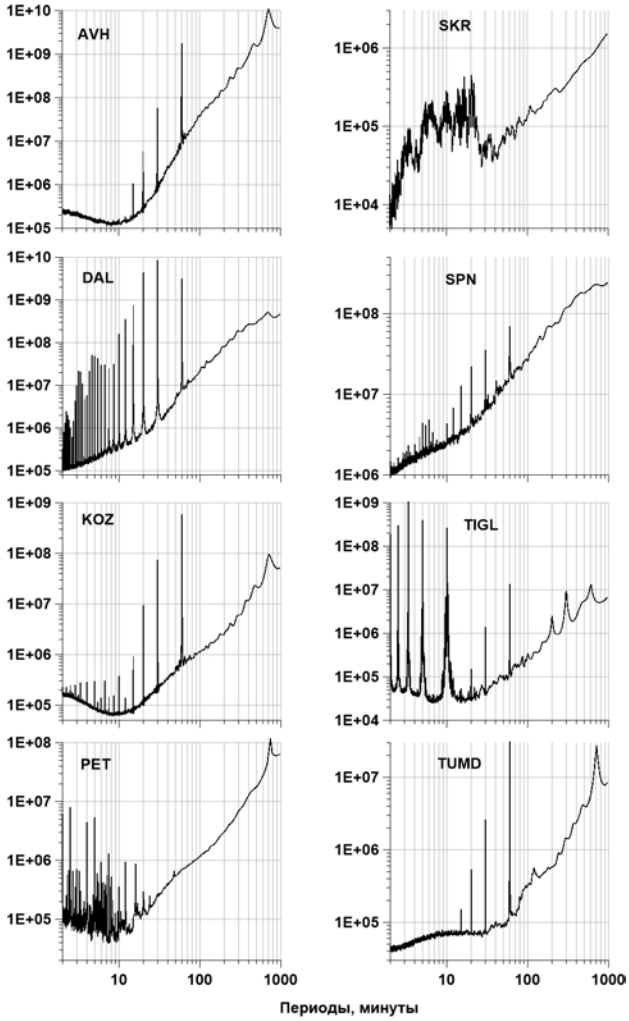


Рис. 1. Графики оценок спектров мощности сейсмических записей после перехода к шагу 136 по времени 1 минута для 8 станций сети в частотном диапазоне с периодами от 2 до 1000 минут. (Рис.2 из статьи [8]).

Предлагается посмотреть на эти графики под несколько другим углом. Прежде всего, заметим (авторы на это не указывают) что 7 из 8 приведенных графиков на рис. 1 соответствуют сейсмометрам CMG-6TD. График PET относится к сейсмометру STS-1 сейсмостанции Петропавловск, входящему в комплект оборудования IRIS, что уже говорит о многом касательно его помехозащищенности, хотя есть сведения [10] об ухудшении качества данных в процессе эксплуатации. Так вот эта, вероятно, лучшая из используемых станций не имеет в спектре максимума "*с периодом, близким к 60 минутам*" [8]. Да, на остальных графиках этот максимум присутствует в 6 случаях из 7, но его амплитуды при этом различаются на 2 порядка, что было бы вряд ли возможно при регистрации единого деформационного процесса, каким является основная сфероидальная мода ${}_0S_2$ собственных колебаний Земли с периодом 54 мин. Тем более это никак не объясняет отсутствие подобного максимума на двух станциях. По тем же причинам невозможно относиться к "*набору*

[1] Отметим, что медленные (суточные-полусуточные, то есть с периодом порядка 1000 мин., который входит в рабочий диапазон периодов в расчетах Любушина А.А. с соавторами) вариации температуры всего лишь в 0.01° вызовут электрический сигнал в сейсмометре такой же амплитуды, как смещения земной поверхности на несколько метров на той же частоте. Такие смещения не отмечены при GPS-наблюдениях. Оценка получена согласно спецификации сейсмометра CMG-6TD (www.guralp.com).

монохроматических гармоник" как к "*соответствующему различным модам собственных колебаний*" [8].

В дополнение можно обратить внимание на длины сейсмических волн, которые должны соответствовать используемому в рассматриваемых работах частотному диапазону. Даже для периода T = 10 мин. (не говоря уже о больших периодах) полученная длина волны в разы превышает апертуру наблюдательной сети. Это означает, что записи на всех сейсмостанциях должны быть практически идентичными, разумеется, в случае СЕЙСМИЧЕСКОГО сигнала. И как следствие – необходимость идентичности спектров, что не наблюдается на рис. 1.

Если вышеизложенная аргументация верна, то следует признать, что авторы не предоставили доказательств того, что анализируемый ими сигнал является СЕЙСМИЧЕСКИМ, а А.А. Любушин с соавторами работают с некондиционными с точки зрения сейсмометрии исходными данными.

В этом случае имеет смысл предположить, что **все** выявляемые авторами эффекты могут связываться не с сейсмическим шумом, отражающим деформированное состояние твердой среды, а с комплексным прямым воздействием окружающей среды (включая, возможно, в первую очередь атмосферу) на работу сейсмометра. Тогда на настоящем этапе рассматриваемых исследований логично было бы убрать "СЕЙСМИЧЕСКИЙ" из "низкочастотного СЕЙСМИЧЕСКОГО шума".

Заключение

На настоящий момент вопрос о возможности использования несертифицированного частотного диапазона сейсмических станций для анализа шума непонятной природы остается открытым. Но при этом следует признать НЕСЕЙСМИЧЕСКОЕ происхождение регистрируемого поля. Это ни в коей мере не делает бессмысленным разрабатываемое А.А. Любушиным с соавторами направление статистического анализа непрерывных потоков данных, которые являются результатом влияния множества факторов помимо эндогенных полей Земли.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21).

Список литературы

1. *Касимова В.А., Копылова Г.Н., Любушин, А.А.* Вариации параметров фонового сейсмического шума на стадиях подготовки сильных землетрясений в Камчатском регионе // Физика Земли. 2018. № 2. С. 81–95. DOI 10.7868/S0002333718020072.

2. *Кислов К.В., Гравиров В.В.* Исследование влияния окружающей среды на шум широкополосной сейсмической аппаратуры: Вычислительная сейсмология. Вып. 42. М.: КРАСАНД, 2013. 240 с.

3. *Копылова Г.Н., Любушин А.А., Таранова Л.Н.* Новая прогностическая технология анализа вариаций низкочастотного сейсмического шума (на примере районов Дальнего Востока России) // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 1. С. 75–91. DOI 10.35540/2686-7907.2021.1.05.

4. *Любушин А.А., Соболев Г.А.* Мультифрактальные меры синхронизации микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // Физика Земли. 2006. № 9. С. 18–28.

5. *Любушин А.А.* Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки // Физика Земли. 2008. № 4. С. 17–34.

6. *Любушин А.А.* Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм // Физика Земли. 2009. № 5. С. 15–28.

7. *Любушин А.А., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Таранова Л.Н.* О свойствах поля низкочастотных шумов, зарегистрированных на камчатской сети широкополосных сейсмических станций // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2015. № 2 (26). С. 20–36.

8. *Любушин А.А., Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К.* Связь мультифрактальных и энтропийных свойств сейсмического шума на Камчатке с неравномерностью вращения Земли // Физика Земли. 2021. № 2. С. 153–163. DOI 10.31857/S0002333721020046.

9. *Соболев, Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А.* Синхронизация микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // Физика Земли. 2005. № 8. С. 3–27.

10. https://www.iris.edu/hq/programs/gsn/quality

11. *Lyubushin A.* Connection of Seismic Noise Properties in Japan and California with Irregularity of Earth's Rotation // Pure and Applied Geophysics. 2020. V. 177. No 10. P. 4677–4689. DOI 10.1007/s00024-020-02526-9.

УДК 550.34

СЕЙСМИЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ СЕЙСМОСТАНЦИЙ

Тубанов Ц.А.[1,2], Санжиева Д.П.-Д.[1,2], Радзиминович Н.А.[1,3], Предеин П.А.[1,2], Цыдыпова Л.Р.[1,2]

[1]Бурятский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Улан-Удэ, ttsyren@gmail.com
[2]Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ,
[3]Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

Введение

Глубоководная впадина бассейна озера Байкал является наиболее сейсмоактивной в Байкальской рифтовой зоне. За последние 160 лет в центральной части Байкальского рифта произошло порядка двух десятков сильнейших землетрясений магнитудой 5 и выше, в т.ч. несколько катастрофических. Наиболее сильными землетрясениями, локализованными в районе дельты р. Селенги, являются максимальные по магнитуде Цаганское (12.01.1862 г.; *M*LH = 7.5) и Среднебайкальское (29.08.1959 г; *M*LH = 6.8) землетрясения [7]. В результате Цаганского землетрясения произошло опускание тектонического блока земной коры и образование залива Провал [9, 15]. Среднебайкальское землетрясение также сопровождалось тектоническими движениями отрицательного знака – опусканием дна оз. Байкал в эпицентральной зоне на 10–15 м [Солоненко, Тресков, 1960].

Начавшееся проведение в регионе вибросейсмических исследований в связи с развитием Южно-Байкальского геодинамического полигона [2] привело к уплотнению сети сейсмостанций в центральной части Байкальского рифта. Была создана локальная сеть, позволяющая совместить сейсмический мониторинг в пассивном (регистрация землетрясений) и активном (зондирование с управляемым вибрационным источником сейсмических волн) вариантах [13]. Нами излагаются некоторые результаты исследования сейсмичности Центрального Байкала, полученные по данным локальной сети сейсмостанций.

Сеть сейсмологических наблюдений

Сеть сейсмических станций, составляющих в настоящее время систему наблюдений Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН, создавалась в 1990-х гг. на базе стационаров Геологического института СО РАН. Первыми пунктами сбора сейсмологических данных были: сейсмостанция в г. Улан-Удэ на Верхней Березовке (код станции UUDB, начала работу в феврале 1996 г.), и позднее, сейсмостанции Хурамша (HRMR) и Максимиха (MXMB). С тех пор проводилось расширение сети сейсмостанций, в основном в окрестности оз. Байкал, что позволило детально изучить сейсмический режим на территории от Южного Байкала до полуострова Святой Нос (рис. 1). В 1998–1999 гг. к существующей сети наблюдения добавлялись точки наблюдений в северной части исследуемой территории, в Баргузинском заливе (Максимиха, Святой Нос, Монахово), и, после Южнобайкальского землетрясения 25.02.1999 года – на юге (Танхой, Бабушкин, Байкальский прибой, Большая речка). В первые годы работы регистрация осуществлялась с помощью цифровых 16-разрядных сейсмических станций «Альфа-Геон». Имеющаяся аппаратура позволяла регистрировать сейсмический сигнал в узком динамическом диапазоне, но значительным преимуществом являлось то, что регистрация осуществлялась в цифровом виде. К примеру, на станциях Байкальского филиала (тогда – Геофизической службы СО РАН) полный переход с аналоговой регистрации на цифровую произошел немного позднее. Первоначально сейсмостанции работали в триггерном режиме, использовалась система передачи данных по радиоканалу, что позволяло осуществлять мониторинг сейсмичности в режиме реального времени [12], но существенно ограничивалась представительность регистрации землетрясений. С 2004 года была проведена замена и усовершенствование аппаратуры на сейсмостанциях, установлены регистраторы «Байкал», что позволило перейти с триггерного режима регистрации на непрерывное наблюдение.

Опыт работы, начиная со времени открытия сейсмостанции в Улан-Удэ, показал необходимость интеграции образующихся пунктов в существующую сеть наблюдений. На сегодняшний день сейсмостанции Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН и Геологического института СО РАН структурно дополняют региональную сеть сейсмических станций Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН [3]. Локальная сеть наблюдений состоит из 11 цифровых сейсмических станций. На

большинстве станций установлены короткопериодные велосиметры СМ-3 и СМ-3КВ. Широкополосные сейсмометры Guralp CMG-40T (T_0=30 сек) размещены на четырех сейсмических станциях, на одной станции работает 120-секундный сенсор Nanometrics Trillium Compact.

Исследуемая территория охватывает сейсмоактивную область акватории оз. Байкал в пределах координат 106.1°–109.1° в. д. и 51.7°–53.7° с. ш., для которой составляется локальный каталог землетрясений (рис. 1).

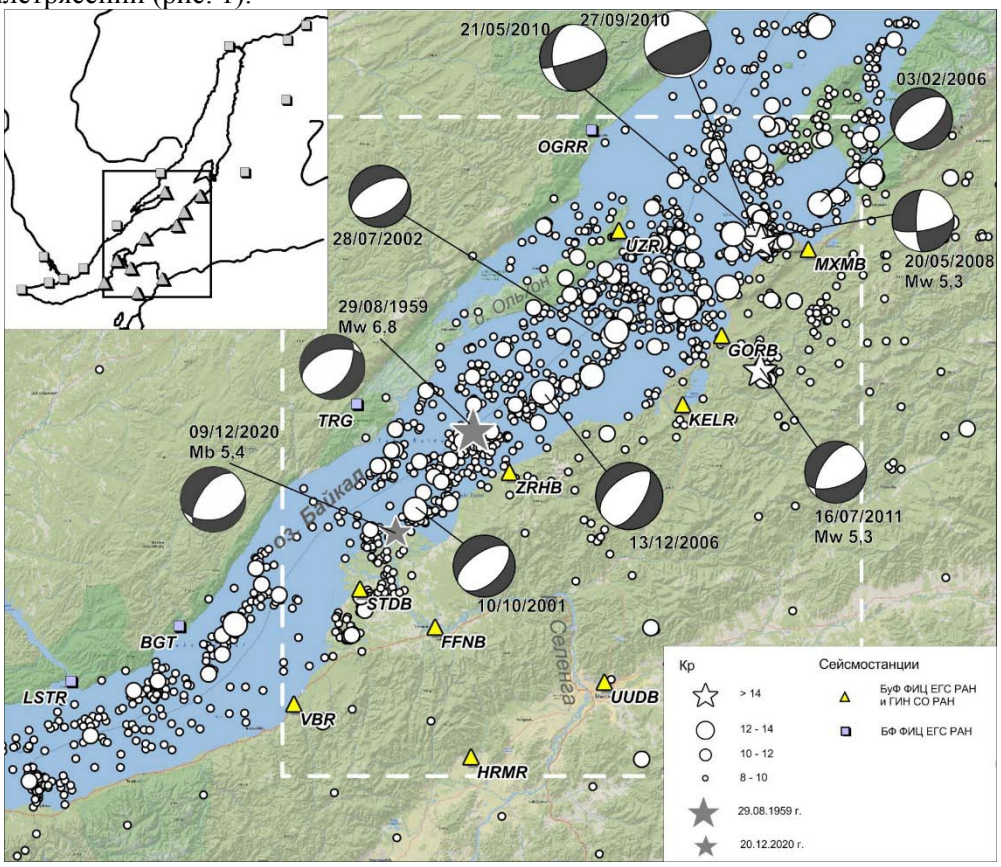


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений центральной части Байкальского рифта за 2001–2014 гг. Сейсмические станции Бурятского (код сети BUGSR) и Байкальского филиала (BAGSR) ФИЦ ЕГС РАН. Серыми звездочками обозначены Среднебайкальское (29 августа 1959), и Кударинское (9 декабря 2020) землетрясения.

Область пассивного мониторинга сейсмической активности выбрана с учетом расположения станций локальной, региональной сети и очаговых областей Центрального Байкала. Схема наблюдений локальной сети включает два уровня: автоматизированный пункт наблюдения, и центр обработки и хранения информации, находящийся в г. Улан-Удэ. Данные сейсмометрических наблюдений хранятся в виде бинарных файлов. Время синхронизировано с использованием системы GPS. Архивы с исходными сейсмограммами в едином формате (Байкал-5) передаются в Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН. Для составления локального каталога в сводной обработке кроме сейсмостанций локальной сети использованы данные шести сейсмостанций Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН, которые расположены на западном побережье оз. Байкал.

Сейсмичность центральной части Байкальского рифта

За период работы локальной сети наблюдений на территории от устья р. Селенга до Баргузинского залива (рис. 1, область ограничена белым пунктиром) произошло 11 землетрясений с $K_р \geq 12$. Сильнейшими из них были: Максимихинское землетрясение 20.05.2008 г. с $K_р$ = 14.3, Туркинское землетрясение 16.07.2011 г. с $K_р$ = 14.5. и произошедшее 09.12.2020 Кударинское землетрясение с $K_р$ = 14.2 (рис. 1).

В эпицентральной области Максимихинского землетрясения в первые пять суток зарегистрировано более 500 событий с $K_р \geq 5.6$ [1]. Далее, в 2010 году в этой же области произошло еще два землетрясения с $K_р$ = 12.2 (21.05.2010 г. и 27.09.2010 г.), оба этих землетрясения сопровождались афтершоковыми группами из более чем 30 землетрясений за 2 дня. Примечательно, что эта область продолжала сохранять значительную активность в течении нескольких лет.

16 июля 2011 г. на восточном борту озера, в хр. Улан-Бургасы произошло Туркинское землетрясение с $K_р$ =14.5. Это землетрясение также сопровождалось афтершоками, но менее многочисленными в сравнении с Максимихинским землетрясением (всего 80 землетрясений в первые сутки). Толчок сбросового типа произошел в результате подвижки по плоскости С–В простирания, поэтому можно предположить, что данная последовательность произошла под влиянием рифтового поля напряжений, которое распространилось и на близлежащее горное окружение впадины. В работе [6] показано, что различие в сценариях развития очаговых областей двух сильных землетрясений Среднего Байкала 2008 и 2011 гг. тесно связано с геолого-структурными особенностями районов их локализации.

Эпицентр основного толчка землетрясения в устье р. Селенга с магнитудой M_b = 5.4 приурочен к заливу Провал, образованного в результате катастрофического Цаганского землетрясения 1862 года. Землетрясение названо Кударинским по названию населенного пункта, где зафиксирована максимальная интенсивность сотрясений. Достаточно высокая плотность сейсмических станций в регионе позволила получить надежные оценки положения эпицентров и глубин очагов для основного толчка и афтершоков. Всего было зарегистрировано порядка 70 землетрясений, расположенных в пределах афтершоковой области, вытянутой в субширотном направлении. Наиболее сильный афтершок ($K_Р$ = 12.6) произошел западнее основного очага в первые сутки после главного толчка.

Анализ механизмов очагов сильных землетрясений Центрального Байкала за период 2001–2014 показал, что все они произошли под действием горизонтального растяжения, ось которого ориентирована СЗ–ЮВ. Реализация этого растяжения осуществляется за счет сбросового смещения преимущественно по плоскостям СВ–ЮЗ простирания. При землетрясениях в большинстве случаев наблюдается сбросовый морфолого-генетический тип подвижек по плоскостям С–В простирания, с углами падения 30–70° («байкальский» тип механизма очага). Именно такой тип фокального механизма был у Среднебайкальского землетрясения 1959 г. Как видно из рисунка 1, фокальные решения для всех землетрясений однотипны и представляют собой сбросы по плоскостям СВ простирания. На этом фоне выделяется район Максимихинского землетрясения, где в очагах как фоновых, так и афтершоковых событий появляются сдвиговые и даже взбросовые подвижки. При этом смещения происходят не только по плоскостям СВ–ЮЗ ориентации, но и активизируются разрывы меридионального и субширотного простираний, отсутствующих в известных схемах разломов. Полученные данные могут свидетельствовать о транстенсионном поле напряжений в локальном районе, примыкающем к восточному борту Центрального Байкала [8].

За период с 2001 по 2014 годы по данным локальной сети наблюдений зарегистрировано свыше 25 тысяч землетрясений различных энергетических классов. Это в основном слабые землетрясения с энергетическим классом $K_Р$ <8, которые составляют 89% от общего числа землетрясений. Карта землетрясений (рис. 2) достаточно наглядно демонстрирует локализованный характер сейсмичности. Очаги образуют обособленные в пространстве, достаточно тесные группы. На фоне общей линейной, ориентированной вдоль рифта, конфигурации эпицентрального поля, отчетливо выделяются участки без эпицентров – сейсмические бреши.

Исследуемая область нами была условно разделена на две зоны – «усть-селенгинскую» и «ольхоно-баргузинскую». Усть-селенгинская очаговая зона, охватывает территорию от устья р. Селенги до о. Ольхон. Сейсмическая активность в этой области пространственно тяготеет к юго-восточному борту рифтовой впадины, так что крупные разломы, ограничивающие северо-западный борт рифтовой впадины – Приморский и Морской, практически асейсмичны. С западной стороны оз. Байкал, сравнительно разреженная полоса очагов землетрясений, тянущаяся от Посольской банки, трассирует бортовые тектонические ступени Приольхонского грабена. В сухопутной дельте р. Селенги многочисленные эпицентры локализуются в области ортогонального сочленения Фофоновского и Дельтового разломов, являющихся крупнейшими дизъюнктивными структурами Селенгинской депрессии [15]. Далее, начиная от залива Провал, плотная полоса эпицентров (шириной 20–30 км), расширяясь, распространяется на северо-восток в пределах Селенгино-Чивыркуйского грабена [4], ограниченная с востока бортовыми разломами.

Ольхоно-баргузинская очаговая зона, которая расположена между о. Ольхон и устьем р. Баргузин, характеризуется «кластерным» характером рисунка эпицентрального поля. В целом расположение очагов землетрясений контролируется структурным ансамблем Селенгино-Чивыркуйского грабена в виде сочетания горстов, активных, остаточных тектонических ступеней и малых впадин [14]. Сейсмоактивизированная область достаточно четко разделяется несколько очаговых зон.

Характерной чертой сейсмичности является наличие групп, роев землетрясений (на рис. 2 красные кружки), крупные события сопровождаются достаточно многочисленными афтершоками. Группы (кластеры) землетрясений нами классифицированы по трем критериям. (1) По скорости протекания процесса: медленно и быстропротекающие кластеры, которые можно разделить по количеству землетрясений, произошедших за сутки (условно границей было выбрано 10 событий в день). Например, рой землетрясений R21 (рис. 2, врезка) относится к медленнопротекающим последовательностям– 74 землетрясения за 11 дней, в то время как афтершоковая группа A106 – быстропротекающая – 178 землетрясений за 15 дней (2). По количеству землетрясений в группе: дуплеты, триплеты и мультиплеты. (3) По энергии землетрясений – роевые совокупности землетрясений, в которых все землетрясения имеют примерно одинаковую энергию и афтершоковые группы, когда последовательность с убывающей энергией толчков следует после сильного землетрясения.

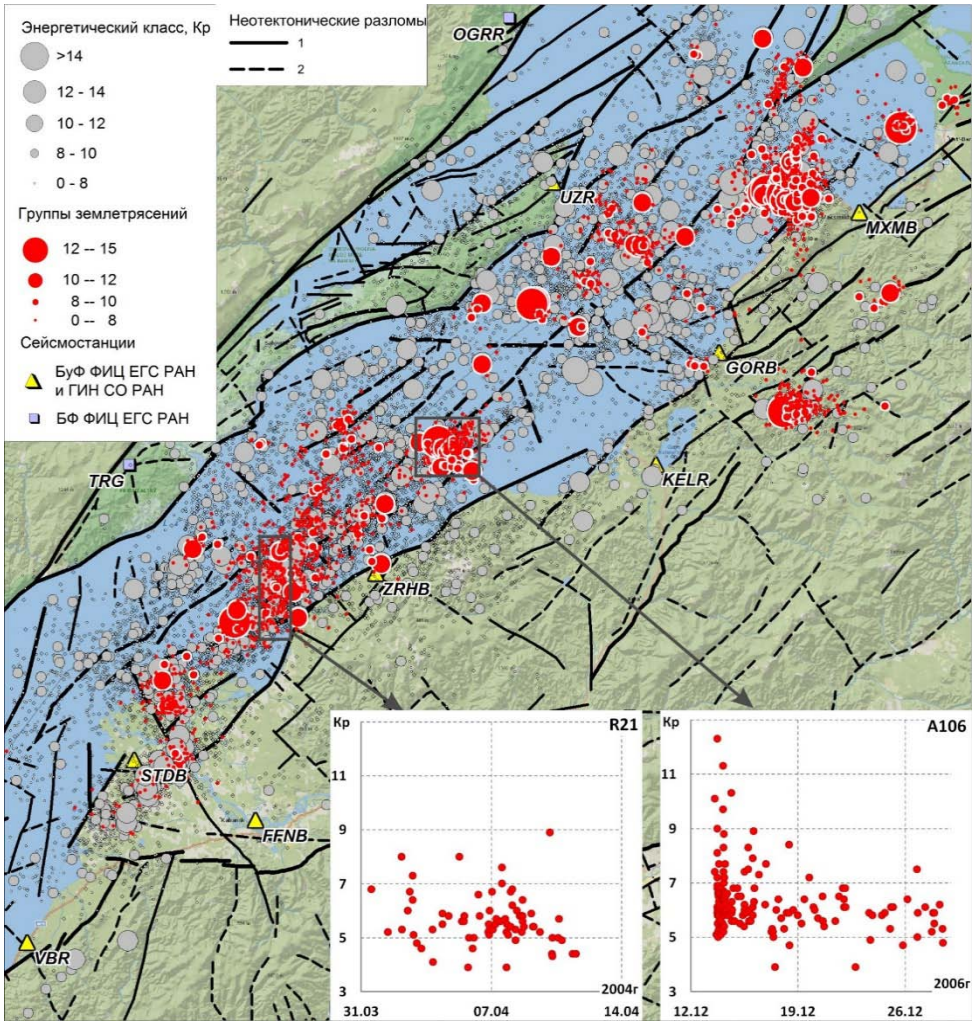


Рис. 2. Землетрясения по данным локальной сети наблюдения за 2001–2014 гг. Во врезках показаны примеры группирующихся землетрясений. 1 - выявленные, 2 - предполагаемые неотектонические разломы по [5].

Преобладание группирующихся (кластеризованных) землетрясений свидетельствуют о локализованном характере деформирования на уровне малоэнергетической сейсмичности. В течении периода наблюдений выявлена тесная корреляция общего количества зарегистрированных землетрясений с числом групп (кластеров) землетрясений. Эпизоды сильных землетрясений сопровождались значительным повышением годовых значений суммарной выделившейся энергии. В годы с умеренной сейсмической активностью среднее суммарное значение выделившейся энергии составляет порядка 10^{12} Дж. При возникновении достаточно сильных землетрясений годовое значение выделившейся сейсмической энергии увеличивается на несколько порядков. В тоже время сейсмические активизации не всегда сопровождались увеличением количества землетрясений. Например, в 2004–2007 годах было зарегистрировано большое количество землетрясений, при достаточно низком уровне выделившейся энергии (всего одно землетрясение с $K_p \geq 12$ в 2006 г.). Характерно, что в эти годы произошло наибольшее число кластеров событий.

Заключение

Разворачивание детальной уплотненной сети сейсмостанций в области Центрального Байкала позволило расширить энергетический диапазон регистрируемых землетрясений, увеличить представительность (в сторону меньших энергетических классов) определений механизмов землетрясений. Увеличение количества станций способствовало детализации глубинного распределения очагов землетрясений [11]. Полученные данные в значительной мере детализируют представления о характере сейсмичности, чем это было возможно ранее, когда в области Центрального Байкала действовали только сейсмостанции региональной сети наблюдений.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР “Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока” № АААА-А21-121011890033-1 и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Гилёва Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б., Середкина А.И.* Максимихинское землетрясение 20 мая 2008 г. с K_p = 14.3, M_w =5.3, I_0=7 (Центральный Байкал) // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 337–345.

2. *Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Дашевский Ю.А.* Стратегия прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1484–1496.

3. *Кобелева Е.А., Гилёва Н.А., Хамидулина О.А., Тубанов Ц.А.* Прибайкалье и Забайкалье. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России // Землетрясения России в 2018 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. С. 44–50.

4. *Леви К.Г., Бабушкин С.М., Бадардинов А.А., Буддо В.Ю., Ларкин Г.В., Мирошниченко А.И., Саньков В.А., Ружич В.В., Вонг Х.К., Дельво Д., Колман С.* Активная тектоника Байкала // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 10. С. 154–163.

5. *Лунина О.В*. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 3. С. 407–434.

6. *Мельникова В.И., Гилева Н.А., Имаев В.С., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А.* Особенности сейсмических активизаций Среднего Байкала в 2008 – 2011 годах // Доклады РАН. 2013. Том 453, № 6. С. 1–6.

7. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 536 с.

8. *Радзиминович Н.А., Мирошниченко А.И.* Усть-Баргузинская трансферная зона (Центральный Байкал): сейсмологические данные о транстенсионном поле напряжений земной коры // Доклады РАН. 2020. Т. 493. № 2. С. 78–82.

9. *Солоненко В.П., Хромовских В.С., Голенецкий С.И., Демьянович М.Г., Абалаков А.Д., Жилкин В.М., Мишарина Л.А., Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Кочетков В.М., Боровик Н.С., Зорин Ю.А., Павлов О.В., Зарубин Н.Е., Павленов В.А., Джурик В.И., Дреннов А.В.* Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья / Под ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1981. 168 с.

10. *Солоненко В.П., Тресков А.А.* Среднебайкальское землетрясение 29 августа 1959 года. Иркутск: Иркутское кн. изд-во, 1960. 36 с.

11. *Суворов В.Д., Тубанов Ц.А.* Распределение очагов близких землетрясений в земной коре под центральным Байкалом // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 8. С. 805–818.

12. *Татьков Г.И., Тубанов Ц.А.* Развитие сейсмического процесса и мониторинг в близреальном времени зоны Южно-Байкальского землетрясения 1999 года // Вестник Бурятского университета. 2004. Сер. 3. № 3. С. 35–46.

13. *Татьков Г.И., Тубанов Ц.А., Базаров А.Д., Толочко В.В., Ковалевский В.В., Брагинская Л.П., Григорюк А.П.* Вибросейсмические исследования литосферы Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий // Отечественная геология. 2013. № 3. С. 16–23.

14. *Уфимцев Г.Ф.* Сейсмичность и структура Байкальского рифта // Отечественная геология. 1994. №1. С. 44–49.

15. *Shchetnikov A.A., Radziminovich Ya.B., Vologina E.G., Ufimtsev G.F.* The formation of Proval Bay as an episode in the development of the Baikal rift basin: A case study // Geomorphology. 2012. V. 177–178. P. 1–16.

УДК 550.34

СОВРЕМЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ АРКТИЧЕСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЯКУТИИ

Туктаров Р.М.[1], Шибаев С.В.[1], Козьмин Б.М.[1,2], Куляндина А.С.[1], Гейслер В.[3], Плётц А.[3], Хаберланд К.[4], Крюгер Ф.[5], Баранов Б.В.[6], Цуканов Н.В.[6], Крылов А.А.[6]

[1]Якутский Филиал Федерального Исследовательского Центра «Единая Геофизическая служба РАН», г. Якутск, tuktarov.rust@mail.ru
[2]Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск
[3]Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, г. Бремерхафен
[4]Потсдамский центр имени Гельмгольца, г. Потсдам
[5]Институт наук о Земле Потсдамского университета, г. Потсдам
[6] Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Введение

Российско-германское научно-техническое сотрудничество, направленное на изучение Арктического и Дальневосточного регионов России более 20-ти лет успешно развивается в рамках соглашения о сотрудничестве в области морских и полярных исследований. Ярким примером такого сотрудничества служит научно-исследовательский проект «Сейсмичность и неотектоника Лаптевоморского региона» (СИОЛА), посвященный исследованию сейсмичности арктического побережья Якутии и сопряженных территорий.

Названный проект выполнялся коллективом сотрудников: Якутский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (ЯФ ФИЦ ЕГС РАН, Якутск, руководитель С. Шибаев), Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН, Москва, руководитель Н. Цуканов), Институт им. Альфреда Вегенера Центра полярных и морских исследований им. Гельмгольца (AWI, Бременхафен, руководитель В. Гейслер), Институт наук о Земле Потсдамского университета (Потсдам, руководитель Ф. Крюгер), Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (СО РАН Новосибирск, руководитель Дергач П.А.).

Проект просуществовал с 2015 по 2020 гг. На данный момент из-за пандемии Covid-19 проект заморожен. В 2022 г. планируется возобновление проекта.

Полевые исследования

Полевые исследования проводились ежегодно с 2015 по 2020 гг. В сентябре 2015 г. были проведены полевые работы по выбору мест для постановки сейсмостанций в районе поселка Тикси и дельты р. Лена. В 2016-2020 гг. работа велась непосредственно с сейсмической аппаратурой. Исследователи устанавливали по 25-32 станции в зависимости от поставленных задач. Работы велись в основном летом каждого года. Исследованиями были охвачены районы вдоль Оленекской и Быковской проток, вдоль основного русла р. Лена вверх по течению на расстояние в 140 км. Сеть из 13 станций была установлена к юго-востоку от поселка Тикси специально для регистрации локальных землетрясений в районе губы Буор-Хая. С 2018 г. была развернута дополнительная сеть станций на западном побережье губы Буор-Хая моря Лаптевых, а также на острове Муостах в губе Буор–Хая (рис. 1).

Конфигурация каждой станции включала рекордер DATA-CUBE, сейсмометр MARK L4 1Hz и элемент питания. Вся аппаратура погружалась в грунт на глубину 1 метр и, несмотря на суровый климат данного региона, была способна прослужить без обслуживания более года.

Сейсмичность Арктического побережья Якутии за 2016-2019 г.

Представленная сеть автоматических сейсмических станций позволила регистрировать события с энергетическим классом *К*р=3–11 (рис. 2). В настоящий момент обработано свыше 2000 событий за период 2016-2019 гг. (Таблица 1).

Сейсмичность данной территории можно охарактеризовать, разделив территорию условно на три участка:

1 участок – район губы Буор-Хая (море Лаптевых);
2 участок – район Быковской протоки;
3 участок – район Оленекской протоки.

Таблица 1. Арктические события за 2016-2019 гг.

***K*р<6**	***K*р=6-7.9**	***K*р=8-10**	***K*р>9**
1263	866	141	9

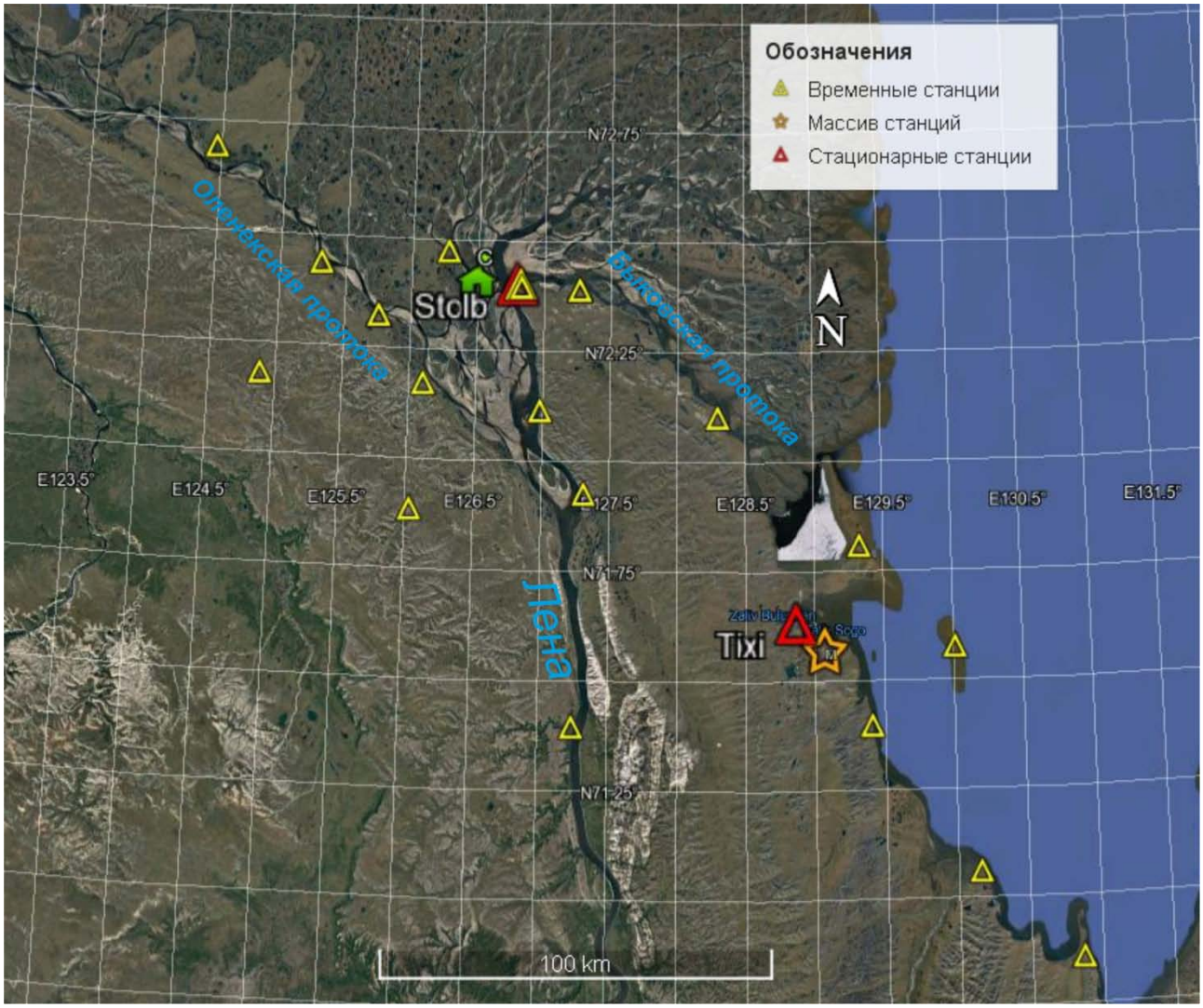


Рис. 1. Карта расположения временных и стационарных сейсмических станций на территории Арктического побережья моря Лаптевых за период 2016-2020 гг.

Район губы Буор-Хая характеризуется глубинными событиями. Большая часть очагов с энергией *K*р>7 фиксировались на глубинах 11-30 км. Это зона Усть-Ленского грабена и внутриплатформенных разломов и территориально относится к Хараулахской сейсмотектонической зоне [3]. Сильнейший толчок был зафиксирован с *K*р=10.5 2 декабря 2019 г. в 7-49 Гринвича (72.0615° N, 131.1697° E) на глубине 26 км в северной части губы Буор-Хая. После этого в течение 90 минут в пределах 20 км от данного землетрясения произошли еще 5 событий на глубинах 26-30 км с *K*р =6.8-8.3. Южнее пос. Тикси была зарегистрирована область повышенной, мелкой сейсмичности, которая возможно связана с сезонными процессами оттаивания-замерзания.

Район Быковской протоки характеризуется неглубокими очагами с меньшей энергией, средняя глубина очагов 4-20 км.

Сейсмичность Оленекской протоки представлена двумя перпендикулярно пересекающимися полосами эпицентров землетрясений. Первая полоса эпицентров проходит предположительно вдоль краевого шва Сибирской платформы, которая вытянута с запада на восток более чем на 300 км, шириной 80 км, проходящей вдоль проток р. Лена (Оленекская - Быковская), и расширяющейся в акватории губы Буор-Хая моя Лаптевых до 200-250 км в направлении юг-север. Вторая полоса эпицентров проходит в направлении юг-север протяженностью около 200 км. После пересечения данной полосы эпицентров с Оленекской протокой сейсмичность данной полосы расширяется в 2-3 раза (до 40 км). Вдоль данной полосы была построена предполагаемая линия разлома (рис. 3).

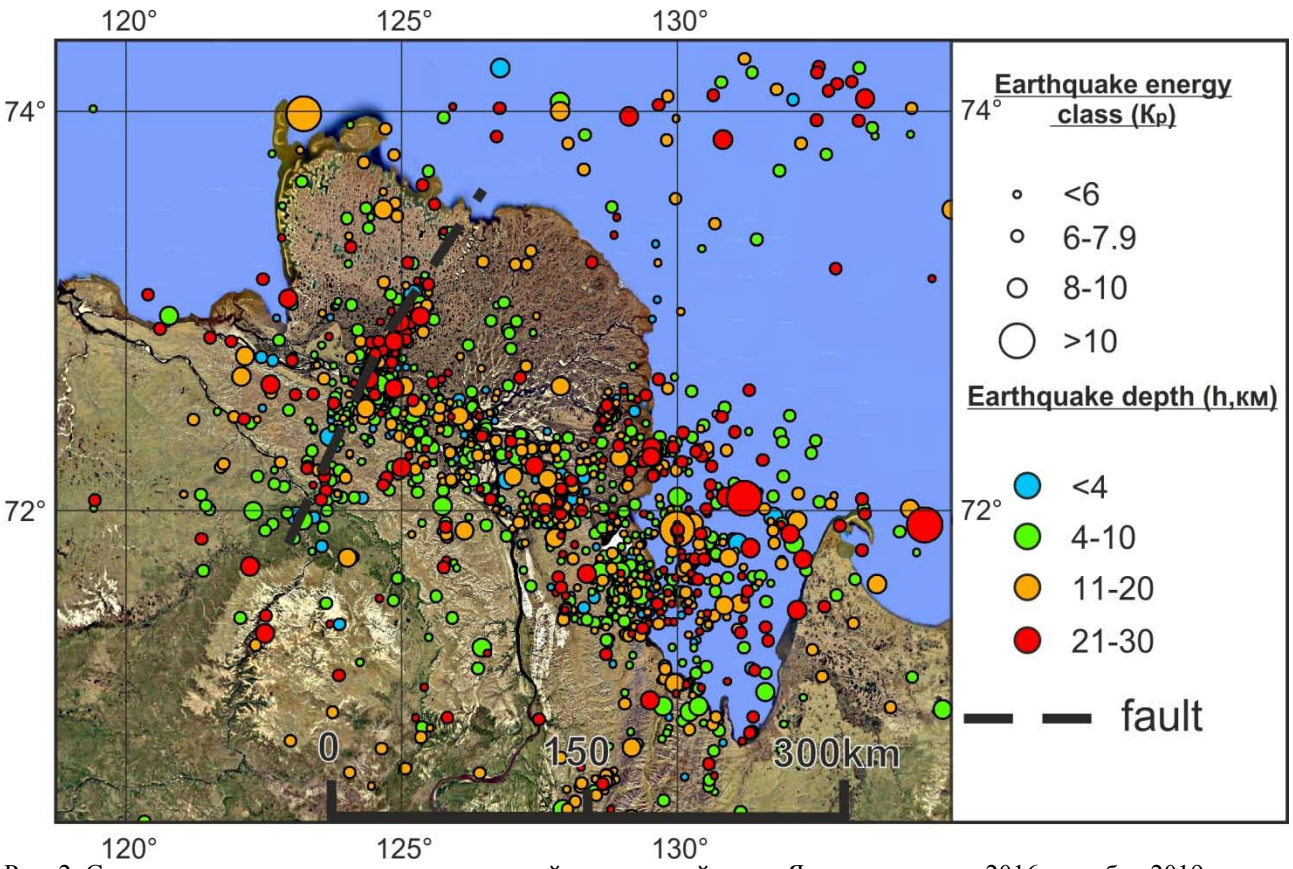


Рис. 2. Сводная карта эпицентров землетрясений арктической части Якутии за август 2016- декабрь 2019 г.

Предполагаемая линия разлома расположена в направлении юг-север, и она разделяет дельту реки Лена на две части. Западная часть дельты приподнята относительно левой. Это подтверждается спутниковыми снимками карт google, где можно наблюдать что в осенний период западная часть дельты промерзает быстрее, следовательно, она расположена несколько выше восточной части. Помимо этого приподнятость западной части относительно восточной подтверждается результатами анализа картографических материалов и расшифровки космических снимков. Существует закономерность в расположении проток дельты р. Лена и распределения стока воды по ним. В приустьевой части направление стока р. Лена резко меняется. Сток поворачивает к востоку по Трофимовской и к юго-востоку по Быковской протокам, принимая в последнем случае обратное направление основному стоку реки Лены. В западном сегменте дельты р. Лена по Булкурской протоке сток воды может осуществляться только в половодье. Оленекская протока, получающая руслоформирующий, но слабый, приток воды из Булкурской протоки находится в стадии отмирания. По центральной системе Туматских проток отмечаются русловые деформации, которые делают их непроходимыми для судов. Сток по Большой Трофимовской протоке сокращается и перераспределяется в Сардахскую протоку, которая частично подпитывает Быковскую протоку по мелким извилистым рукавам [1]. Таким образом, общий сток в дельте р. Лена концентрируется в восточных и юго-восточных протоках, что свидетельствует о топографическом уклоне поверхности дельты в направлении от субдолготной системы Туматских проток к востоку и юго-востоку [2]. Следовательно, существует вероятность того что идет активный геодинамический процесс в данной области.

Разлом берет свое начало с Берелехского поперечного поднятия, где была выражена мелкофокусная сейсмичность с *К*р <7.9 (рис. 3). По мере продвижения разлома на север сейсмичность резко становится более разнообразной как по выходу энергии, так и по глубинам. К примеру, на отрезке Б, очаги имели свойство распространяться на глубинах от 4 до 10 км в восточной части дельты и до 21-30 км в западной части. На данном отрезке уже фиксировались более мощные толчки с энергией *К*р=8-10.

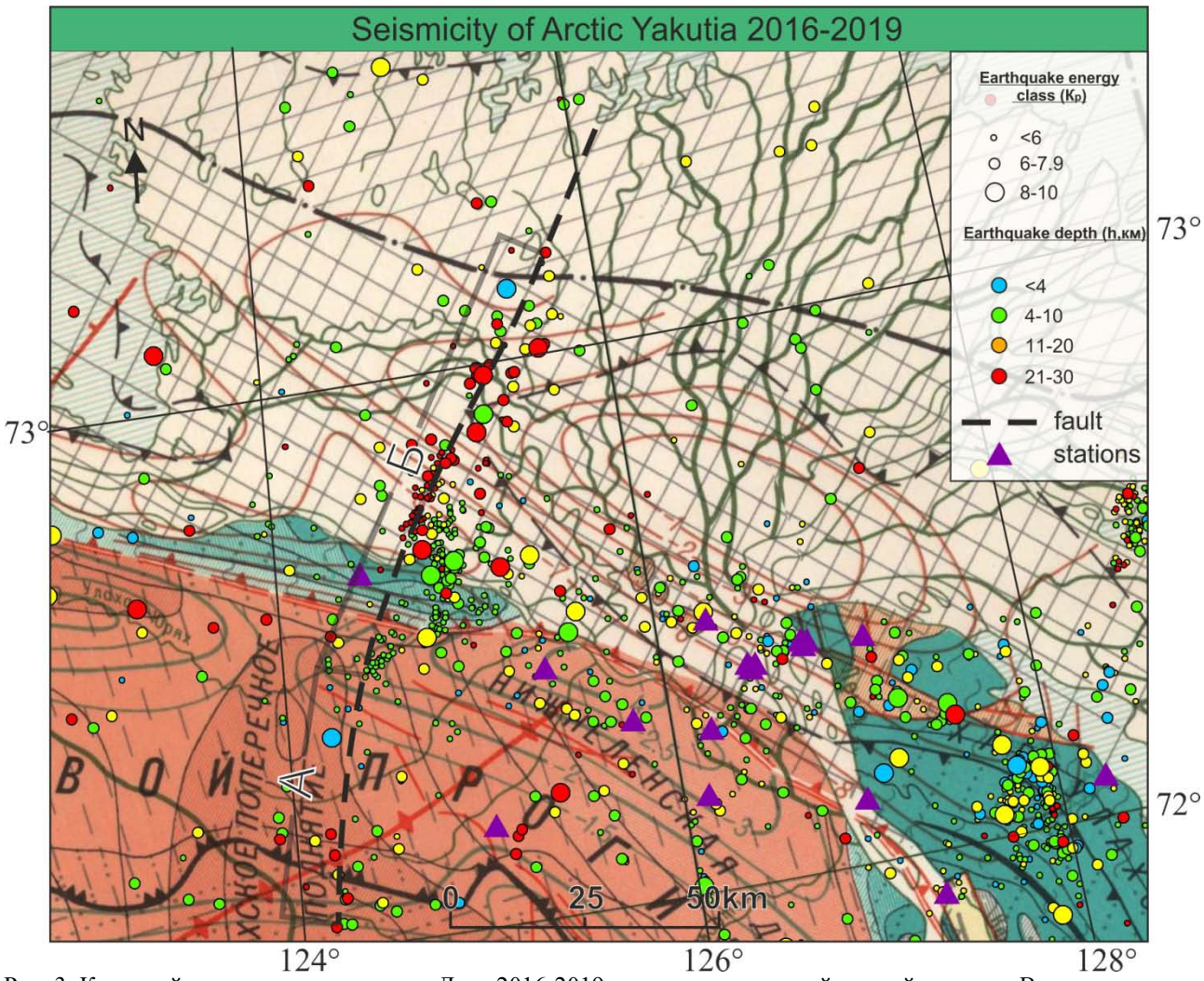


Рис. 3. Карта сейсмичности дельты реки Лена 2016-2019 гг. с предполагаемой линией разлома. В качестве основы использован фрагмент тектонической карты Якутской АССР.

В ходе анализа наборов данных за 2016-2019 стало ясно, что в сентябре, октябре и мае наблюдается колоссальный рост сейсмической активности из-за очень локальных явлений (рис. 4). Возможно, эти события связаны с процессами промерзания вечной мерзлоты (нарастанием ледяного клина). Так на температурных графиках станции станции дельты Лены (слева) и Тиксинского массива (справа) в отрезки времени сентябрь-октябрь, май происходили процессы замерзания-оттаивания (рис. 5). На диаграмме землетрясений в это время происходило максимальное число землетрясений с *К*р <6. Наиболее сейсмически активные отрезки времени – это ноябрь 2016 г. и октябрь 2019 г. В ноябре 2016 г. было зафиксировано множество толчков в районе Оленекской протоки, а в октябре 2019 г. было зарегистрировано большое количество событий в районе губы Буор-хая.

Заключение

Массив данных за 2020 г. в настоящее время обрабатывается специалистами ЯФ ФИЦ ЕГС РАН и каталог землетрясений будет пополнен свежими данными к концу текущего 2021 года. В среднем за каждую неделю мониторинга удавалось фиксировать 6 сейсмических событий с энергией *К*р >5.9. Всего за 2016-2019 гг. было зарегистрировано свыше 2000 арктических событий, из них 136 событий было зафиксировано на глубинах 0-4 км, 339 на глубинах 5-10, 259 на глубинах 11-20, 85 на глубинах 21-30. Причем сила толчков росла с глубиной.

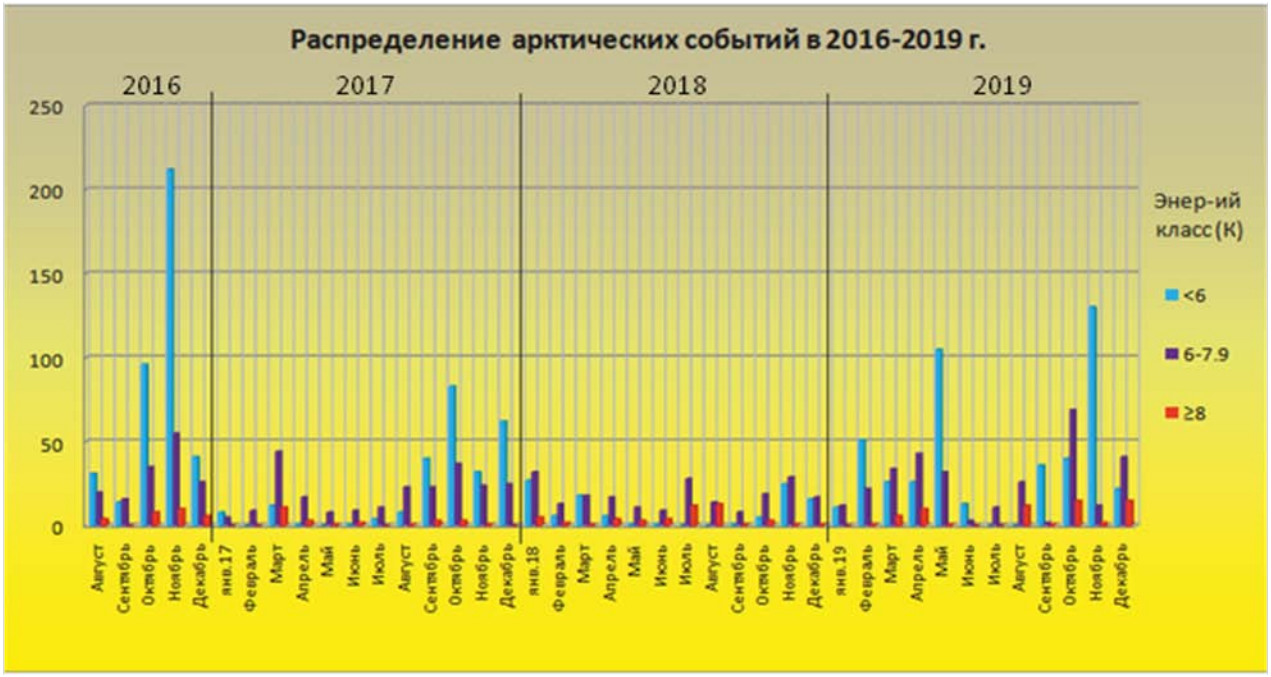


Рис. 4. Диаграмма распределения арктических событий по различным энергетическим классам за период август 2016 г - декабрь 2019 г.

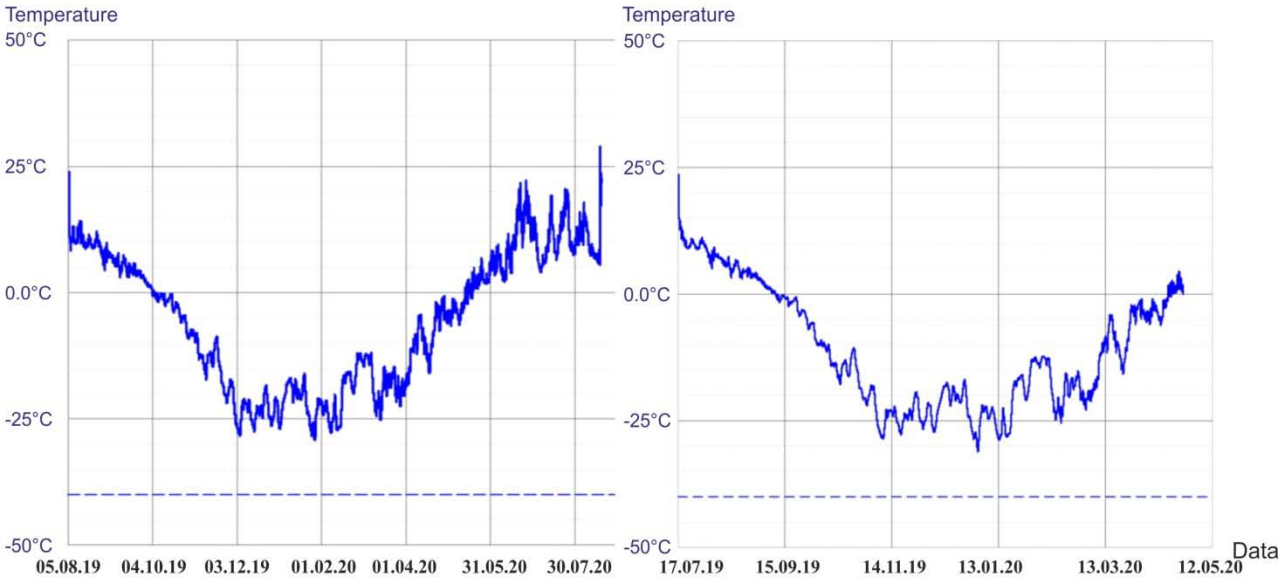


Рис. 5. Графики температурных режимов станции дельты Лены и Тиксинского массива.

Из чего следует, что данный район является сейсмически активным и сейсмический мониторинг в будущем необходимо будет усилить, т.к. изучаемая территория перспективна на обнаружение различного вида полезных ископаемых и это необходимо при оценке сейсмических рисков при возведении объектов инфраструктуры.

Список литературы

1. *Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г.* Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.

2. *Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С.* Динамика рельефа и сейсмотектоническая активизация новейших структур дельты р. Лена // Геотектоника. 2019. №5. С. 62–77.

3. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии. М.: ГЕОС, 2000. 227 с.

УДК 550.34

РАЗВИТИЕ КАМЧАТСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Чебров Д.В.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, Россия, danila@emsd.ru

Введение

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН ведет сейсмический и геофизический мониторинг Камчатки, данные которого представляют огромный интерес, прежде всего, для фундаментальной науки. Землетрясения и извержения вулканов, особенно сильнейшие, дают ключ к пониманию деталей внутреннего строения Земли и физическим процессам, происходящим в ее глубинах. Кроме того, эти явления несут огромную угрозу населению. Поэтому при проведении детального мониторинга уделяется особое внимание вопросам организации оперативного оповещения органов власти о происходящих опасных явлениях. В составе КФ ФИЦ ЕГС РАН функционируют подразделения, которые выполняют эту обязанность в рамках Службы срочных (сейсмических) донесений (ССД), Службы предупреждения о цунами (СПЦ), службы мониторинга вулканической активности. Кроме того, функционирует Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС), который регулярно формирует комплексные экспертные заключения о сейсмической обстановке на Камчатке [10].

В последние годы Камчатская система сейсмического мониторинга имела крайне ограниченные возможности для увеличения количества пунктов наблюдений. Поэтому основные усилия были направлены на развитие и модернизацию методов и средств организации наблюдений, сбора и обработки данных, а также на поддержание работоспособности существующих сейсмических станций. В результате были достигнуты ряд успехов по созданию информационного пространства, в которое сведены все процессы – от сбора данных и их обработки до представления результатов обработки и организации обмена данных с внешними потребителями. Глубокой модернизации была подвергнута система хранения сейсмических данных, обеспечен высокоскоростной доступ к архиву данных, развернуты высокопроизводительные вычислительные кластеры, все сейсмические станции сведены в единую корпоративную сеть. Разработаны новые алгоритмы и созданы программные средства для обработки данных. В результате модернизированы традиционные методики обработки, а кроме того, развиваются новые. В частности, проводится локация вулканических треморов для групп вулканов. Такие данные можно получить для районов, в достаточной мере обеспеченных наблюдениями.

Развитие Единой информационной системы сейсмологических данных позволило обеспечить доступ к результатам обработки, а также создать информационный шлюз, который обеспечивает автоматический и оперативный обмен данными с внешними пользователями. Продолжается разработка новых средств представления данных сейсмического мониторинга, в том числе в целях поддержки принятия управленческих решений.

Развитие единого информационного пространства среди прочего направлено на создание средств цифровизации и автоматизации формирования комплексных экспертных прогностических заключений (о возможных землетрясениях и извержениях вулканов) на основе частных прогнозов. В настоящее время практику прогнозирования землетрясений на Камчатке можно назвать наиболее развитой в нашей стране. Накопленный опыт работы и фактический архивный материал создает все предпосылки для развития этого направления.

В прошлые годы [11] была проведена работа по организации сопряжения Системы мониторинга КФ ФИЦ ЕГС РАН и Аппаратно-программного комплекса «Безопасный город» Камчатского края. Помимо решения технических вопросов обмена данными, решались методические проблемы адаптации результатов сейсмического и вулканического мониторинга для обеспечения формализованной оценки текущей ситуации. Это позволило создать хороший задел для полноценного вовлечения данных Системы мониторинга в Российскую единую систему предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС). На основании организованного информационного обмена планировалось развивать методы автоматизации процессов поддержки принятия решений по соответствующим рискам и угрозам.

Упомянутые выше работы поставили вопрос о расширении понятия «прогноза» как результата работы системы мониторинга. Традиционно сейсмологическое сообщество под «прогнозом» подразумевает непосредственно прогноз землетрясений. В данной же работе предлагается дополнительно обсудить прогноз последствий землетрясений, в том числе и оперативный, и привести примеры конкретных технологий, которые разрабатываются в КФ ФИЦ ЕГС РАН в настоящее время. Такие задачи, на первый взгляд, более приземленные, чем задача прогноза землетрясений и имеют более очевидные пути решения. В то же время, явная практическая направленность делает их не менее интересными.

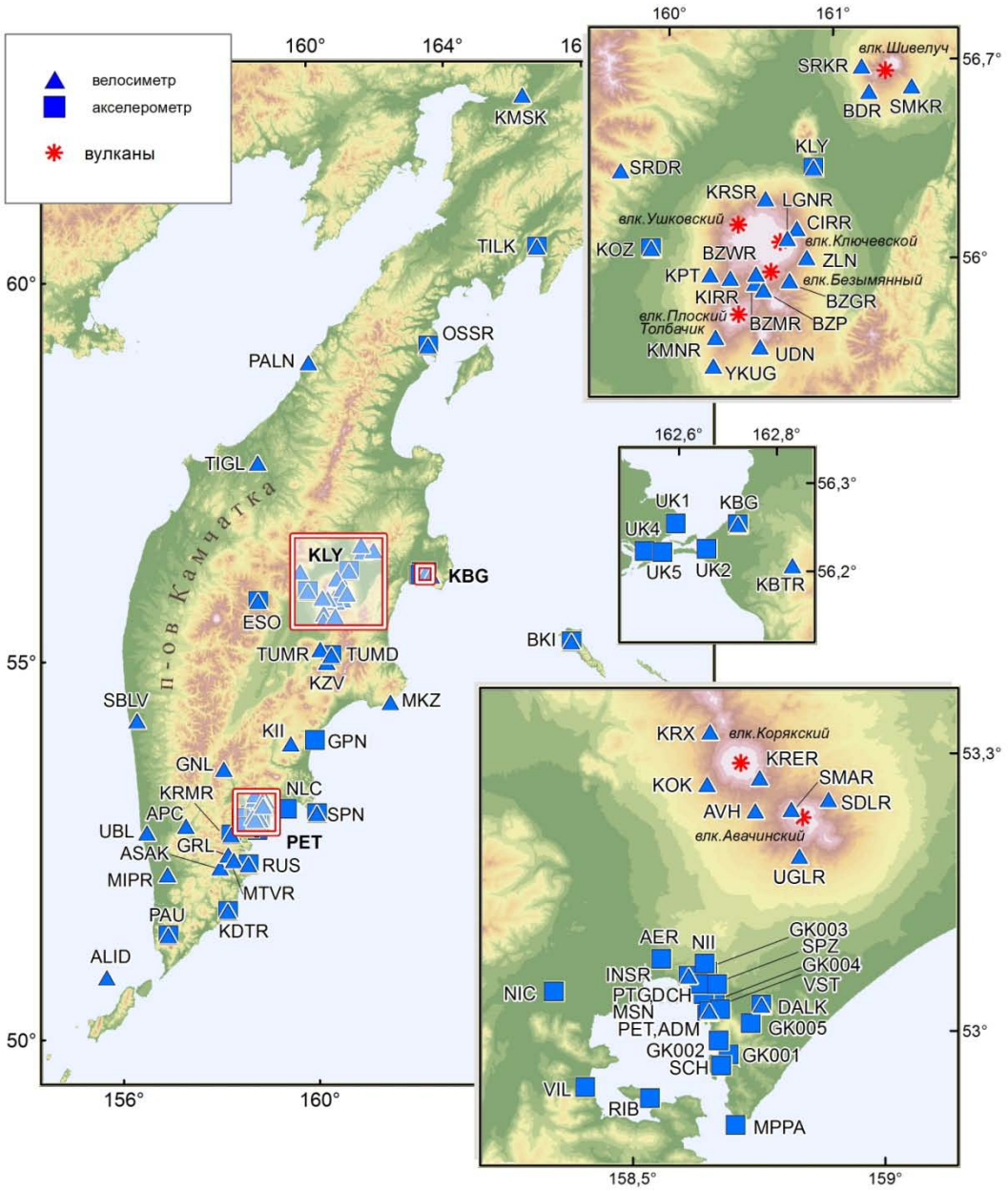


Рис. 1. Камчатская региональная сейсмическая сеть. Каналы BH и SH. Группа станций «Северо-Курильск» находится под оперативным управлением Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН.

Система комплексных сейсмических и геофизических наблюдений

Система наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН представляет собой специализированную систему сбора, хранения, передачи и обработки сейсмической и геофизической информации [9]. В 2021 году Система включает в себя:

- сеть сейсмических станций, состоящую из 81 пункта регистрации сейсмических сигналов, оснащенных каналами связи с передачей данных в реальном времени (рис. 1);
- сеть пунктов гидрогеохимических наблюдений: «Пиначево» – одна скважина и два поверхностных источника; «Морозная» – одна скважина; «Хлебозавод» – одна скважина; «Верхняя Паратунка» – три скважины;

- пункты наблюдений за вариациями уровня и физико-химических параметров подземных вод в скважинах (четыре скважины: Е-1, ЮЗ-5, Морозная-1, Морозная-2);
- сеть GNSS-наблюдений KamNet – 27 постоянных станций;
- сеть наклономеров;
- пункты регистрации подпочвенных газов (семь пунктов);
- пункты акустического мониторинга (пять пунктов);
- пункты электротеллурических наблюдений (пункт «Верхняя Паратунка» – четыре линии; пункт «Тундровый» – шесть линий; пункт «Шипунский» – три линии; КГО «Карымшина» – две линии);
- магнитометр-вариометр (три канала, частота 100 Гц) в составе комплексной геофизической обсерватории «Карымшина»;
- пункты регистрации сейсмических шумов (два пункта);
- комплексная геофизическая обсерватория «Карымшина»;
- пункты экспериментальных газодинамических наблюдений: «Карымшина» – две скважины (глубокая 1750 м скважина ГК-37 и поверхностная скважина 4 м) и «Паратунка» – одна скважина (50 м);
- пункты измерения градиента потенциала атмосферного электрического поля (четыре электростатических флюксметра);
- пункты видеонаблюдений за активными вулканами Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Авачинский, Корякский, Кизимен, Плоский Толбачик, Жупановский, Эбеко;
- систему сбора и обработки данных: информационно-обрабатывающий центр с коммуникационной системой сбора, хранения и обработки данных в реальном режиме времени и системой передачи оперативной информации.

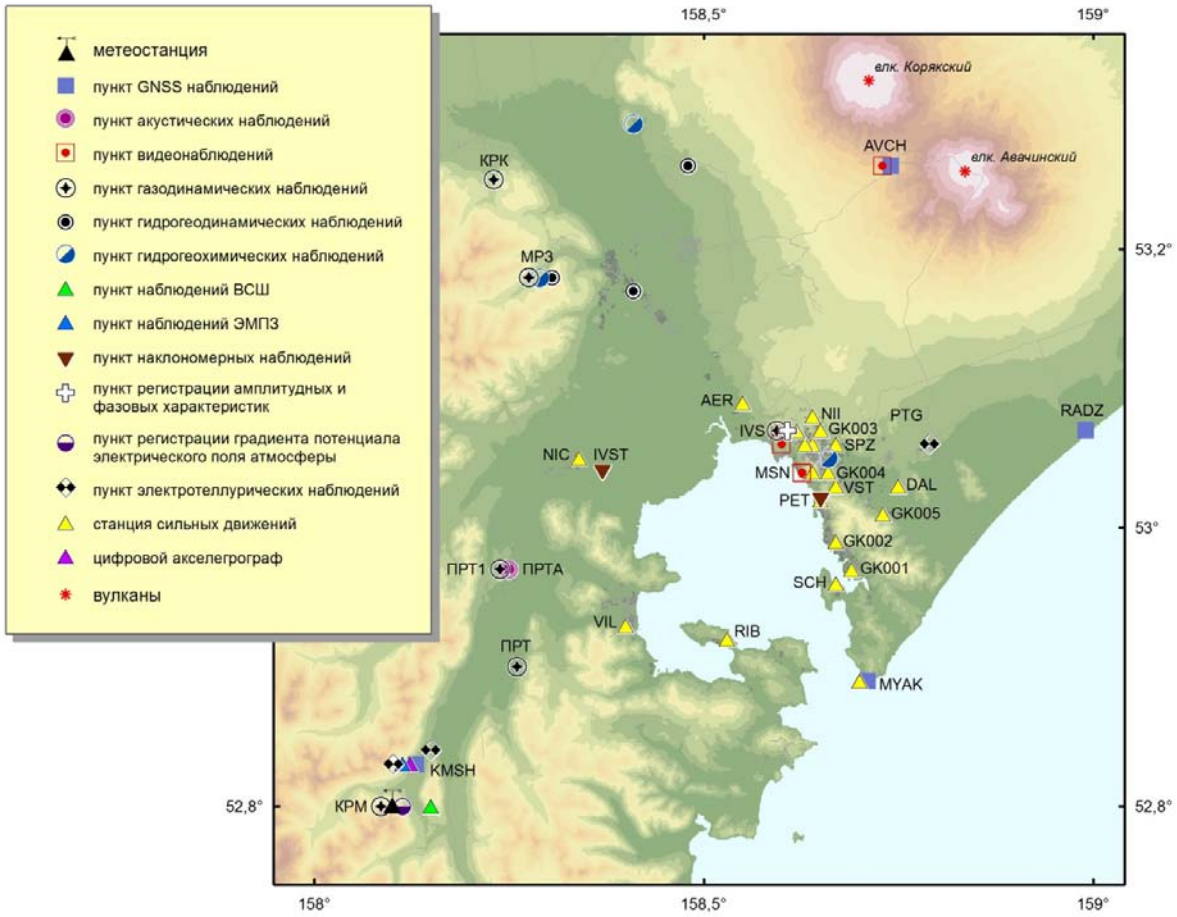


Рис. 2. Система комплексных сейсмических и геофизических наблюдений в районе Петропавловска-Камчатского – геодинамический полигон «Петропавловск».

Наиболее полно методически и организационно обеспечена сейсмологическая часть Системы наблюдений, поскольку на ее основе построены процессы Службы срочных (сейсмических) донесений, Службы предупреждения о цунами, Службы мониторинга вулканической активности. Сейсмические сети КФ ФИЦ ЕГС РАН обеспечивают [9]:

- надежную регистрацию сейсмических сигналов в широком частотном и динамическом диапазоне и идентификацию землетрясений на всей территории Камчатского края с прилегающими акваториями с $ML \geq 3.5$;
- уровень представительной регистрации для событий из Авачинского залива составляет $ML \geq 2.6$;
- уровень представительной регистрации для событий Авачинской группы вулканов – с $ML \geq 0.9$, для Ключевской группы вулканов – с $ML \geq 1.6$;
- возможность регистрации сейсмических воздействий от сильных землетрясений в 13 населенных пунктах Камчатского края. В непосредственной близости краевого центра – г. Петропавловска-Камчатского – расположено 22 пункта регистрации сильных движений, а всего на Камчатке – 41.

Несмотря на важность задач, связанных с безопасностью населения, основное предназначение системы сейсмологических наблюдений – создание информационной основы для научной работы [14]. Данные сейсмологических наблюдений и результаты их обработки являются основой комплексных исследований в области наук о Земле, в особенности работ по изучению сейсмической, вулканической и цунами-опасности, изучению внутреннего строения Земли, а также физики очага и сейсмического процесса.

Система геофизических наблюдений (рис. 2) преимущественно направлена на сбор данных для поисковых работ по широкому спектру исследований, включая поиск предвестников и поствестников землетрясений, а также построение прогнозных методик на основе долговременных наблюдений. При этом по ряду прогнозных методик в КФ ФИЦ ЕГС РАН регулярно и непрерывно выпускаются заключения и доводятся до КФ РЭС [4, 5, 7, 8].

Разработка методики моделирования сейсмического эффекта сценарных землетрясений

Классическая вероятностная схема оценки сейсмической опасности, лежащая в основе общего сейсмического районирования, дает общее представление о возможном сейсмическом воздействии, которое можно ожидать с определенной вероятностью в заданной локации.

Если же стоит задача оценить конкретные последствия землетрясения для жителей, зданий, сооружений и объектов инфрастуктуры, то обычно пользуются детерминистическим описанием, например, в виде набора «сценарных землетрясений». Обычно сценарные землетрясения выбираются по принципу «наихудшего сценария» и описывают максимально возможный сейсмический эффект. Подобная работа для г. Петропавловска-Камчатского была выполнена в работе [1], где получены оценки сейсмических воздействий в ряде опорных точек для шести сценарных очагов. Несмотря на то, что результаты этой работы конкретизируют параметры ожидаемых сотрясений, они не отвечают на наиболее острый вопрос, который возникает при среднесрочном планировании хозяйственной деятельности – какова ожидаемая интенсивность сейсмических воздействий на ближайшие годы? В частности, такой вопрос возникает в связи с проблемой сейсмоукрепления.

Значительная часть жилого фонда Петропавловска-Камчатского имеет дефицит проектной сейсмостойкости относительно зоны сейсмической интенсивности, к которой он относится согласно данных Общего сейсмического районирования. Единомоментное сейсмоукрепление всех (около 200) подобных строений невозможно как по причинам высокой стоимости подобных работ, так и по причинам нехватки строительных мощностей в регионе.

Таблица 1. Параметры очага сценарного землетрясения

Параметр	**Значение**
Магнитуда M_W	8.3
Координаты эпицентра (совпадает с центром площадки)	51.932° с. ш., 159.126° в. д.
Глубина гипоцентра	30 км
Длина площадки разрыва	218 км
Ширина площадки разрыва	73 км
Азимут простирания очага	220°
Угол падения плоскости разрыва по отношению к дневной поверхности	14°

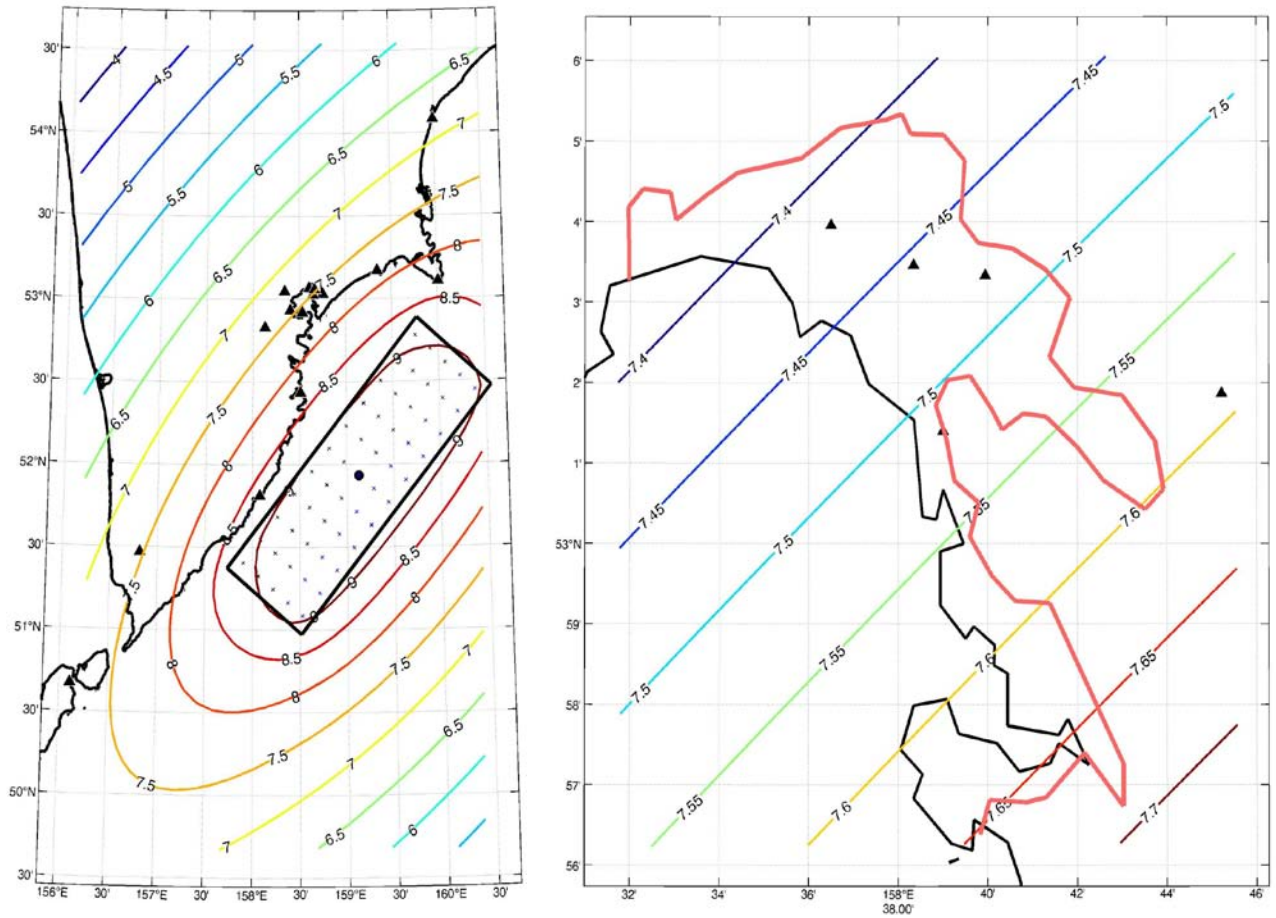


Рис. 3. Макросейсмическое поле очага сценарного землетрясения. Слева – обзорная карта; справа – детальный расчет для территории Петропавловска-Камчатского.
Черный прямоугольник – проекция модельной плоскости очага на дневную поверхность; темно-синий кружок – эпицентр землетрясения, совпадает с геометрическим центром площадки разрыва; косые крестики в пределах очага – центры моделируемых субочагов; черные треугольники – некоторые сейсмостанции сети КФ ФИЦ ЕГС РАН; розовая сплошная линия – граница застройки Петропавловска-Камчатского.

Таким образом, требуется определить наиболее вероятное сценарное землетрясения в заданном периоде, задать его параметры и рассчитать его эффект. Очевидно, эта задача вытекает из задачи прогноза землетрясений и нацелена на то, чтобы абстрактные (для органов исполнительной власти) параметры очага будущего землетрясения перевести в конкретные оценки последствий. Эти оценки, в свою очередь, позволяют проводить осознанное планирование как в части мероприятий по сейсмоукреплению, так и в части подготовки к ликвидации ЧС.

Мы следуем подходу [1], где используется модель сейсмического эффекта, основанная на представлениях о некогерентном протяженном очаге [2]. Предложена лишь некоторая модификация модели сейсмического эффекта для условий Камчатки, которая изложена в [13], связанная с выраженной анизотропией затухания для очагов, лежащих в Курило-Камчатской сейсмофокальной зоне. На этой основе рассчитан сейсмический эффект для события с $M_W = 8.3$ для среднего грунта, представляющий собой пологий надвиг, лежащий в тихоокеанской фокальной зоне (таблица 1, рис. 3).

Следует отметить, что на данном этапе формализованной методики, позволяющий оценить параметры очага сценарного землетрясения не существует и довольно велика «экспертная» составляющая. Чтобы понизить произвол в производстве оценок параметров очага землетрясения, должны быть разработаны формализованные правила оценки местоположения очага и его магнитуды с учетом заданного временного интервала. Очевидно, что основой оценки местоположения сценарного землетрясения должны быть такие сведения, как долгосрочный прогноз по методу Федотова, среднесрочные оценки по данным сейсмических затиший и прочие особенностей сейсмического режима. К сожалению, многочисленные имеющиеся методы прогноза по данным мониторинга различных геофизических полей в настоящее время не могут использоваться в качестве методов, уточняющих место. Это связано с тем, что фактически наблюдения ведутся в одной точке, и

все пункты наблюдений стянуты к Петропавловску-Камчатскому. Оценка магнитуды может быть сделана на основе данных о сейсмическом режиме и законах повторяемости сильнейших землетрясений в регионе.

В заключение раздела скажем несколько слов дальнейших необходимых шагах в данном направлении. Мы продемонстрировали расчет для очень детальной сетки на территории Петропавловска-Камчатского. Это позволяет получить конкретные оценки сейсмических воздействий для любого строения методом интерполяции, или же можно повторить расчет для нерегулярной сетки, узлами которой являются строения. Это совершенно не составит труда при условии подключения к соответствующей базе данных, или же создании таковой в качестве подсистемы ЕИС СД. В данном случае можно получить как оценку сейсмического эффекта для каждого здания, так и конвертировать его в ожидаемую степень повреждения и затем выразить его в терминах экономического ущерба и в количестве ожидаемых человеческих жертв. Добавим, что для того, чтобы обеспечить корректность всех этих оценок, должны быть введены поправки на грунтовые условия.

Детальная оценка интенсивности сейсмических сотрясений по инструментальным данным

Системы оперативного оповещения о сейсмических событиях функционируют во всех развитых странах мира, и особенную важность они имеют для сейсмоактивных регионов. Информация о параметрах очага землетрясения оперативно используется при планировании работ по ликвидации ЧС. В случае сильного землетрясения особую важность приобретает информация об интенсивности колебаний грунта на территории, попавшей под удар стихии. Наличие таких данных позволяет сравнительно просто превратить систему оповещения в систему прогнозирования последствий землетрясений. Такая система, в свою очередь, позволяет спланировать спасательные работы при разрушительных землетрясениях. В этом случае максимально детальные данные экономят время, а следовательно – повышают шансы на спасение людей, оказавшихся под завалами. В случае умеренных землетрясений – позволяют сэкономить трудовые и материальные затраты служб на обследование зданий и сооружений за счет детальной картины сейсмических воздействий. Классическая Служба срочных сейсмических донесений обеспечивает информацию лишь об основных параметрах землетрясения, которые требуют дополнительной интерпретации.

В целом, задача восстановления поля сотрясений по координатам и магнитуде землетрясения представляется тривиальной. Самое ее простое решение – это использование простейшего уравнения макросейсмического поля в представлении точечного источника. Эта технология хорошо работает для умеренных и удаленных землетрясений. В случае сильного землетрясения такой подход не будет давать состоятельных оценок, особенно в ближней зоне. Дальнейшее усложнение модели сейсмического эффекта идет по пути учета геометрических размеров очага и введение более сложных моделей затухания. Дополнительно в целях стабилизации решения в обработку вовлекаются инструментальные данные о движении грунта. Этот подход довольно хорошо работает в случае регулярной сети приборов.

Тем не менее, поле сотрясений, восстановленное по основным параметрам землетрясения, даже в случае комбинированного решения может содержать существенные неточности. Возможные невязки модельного поля по сравнению с реальным будут нарастать с ростом магнитуды землетрясения, особенно в случае оперативной оценки. Одна из очевидных причин этого – возможность нецентрального положения гипоцентра относительно очаговой зоны.

Ранее в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН был создан специальный автоматизированный сервис, позволяющий проводить оценку инструментальной сейсмической интенсивности по данным станций сильных движений в режиме, близком к реальному времени, и наглядно представлять полученные результаты [3]. Предполагалось, что дальнейшее развитие сервиса связано с созданием более плотных сетей приборов сильных движений и переводом процессов принятия решений и рассылки сообщений на автоматический режим.

В развитие этих идей в текущем году создан прототип системы оперативного мониторинга фактических сейсмических воздействий на здания и сооружения по инструментальным данным, в котором реализована полная технологическая цепочка обработки данных, включая обращения к базе данных зданий и сооружений, учет грунтовых условий и расчет условной степени повреждения здания. Работоспособность системы проверена как в реальном времени, так и в виде эмуляции на архивных данных. Подробно об этой системе рассказывается в работе [12] в настоящем сборнике.

Заключение

В настоящей работе кратко показано современное состояние Системы комплексного сейсмического и геофизического мониторинга и обрисован ряд перспективных направлений ее развития.

В последние годы фокус работ по развитию системы мониторинга был направлен на развитие и модернизацию методов обработки и представления данных. Помимо объемных технических и методических работ, позволивших увеличить устойчивость сейсмической сети и поднять эффективность ее эксплуатации, были выполнены научно-методические разработки, благодаря которым в службу вводятся новые методы интерпретации сейсмологических данных.

Целенаправленной модификации подверглась также модель взаимодействия системы мониторинга и РСЧС. Первые же работы по сопряжению системы мониторинга и АПК БГ высветили ряд вопросов, которые надо решить для того, чтобы полноценно интегрировать сейсмические и геофизические данные в подсистему поддержки принятия решений РСЧС. Организованный в прошлые годы информационный обмен практически не способствовал снижению экспертной поддержки передаваемых данных. Расширение информационного обмена данными нового типа, то есть явными прогнозными данными будет способствовать более эффективному использованию всего комплекса данных на стороне РСЧС.

Следует заметить, что классическая задача прогноза землетрясений до сих пор, несмотря на многолетние усилия, далека от решения. Поэтому следует признать, что в настоящее время довольно сложно обеспечить внешнего потребителя состоятельными и надежными прогнозными данными. Довольно быстрый прогресс здесь может быть достигнут за счет построения новых прогнозных методик на основе совместной обработки результатов мониторинга разнообразных геофизических полей. Также можно ожидать продвижения в изучении детального пространственно-временного распределения уровня сейсмичности, выделения зон затиший и активизаций. Однако в этом направлении науке предстоит пройти ещё долгий путь.

Что касается методик прогнозирования последствий землетрясений, в том числе оперативного прогнозирования, то здесь задача представляется гораздо менее масштабной. Уже существует работоспособный прототип системы оперативного прогнозирования последствий землетрясения – сейсмических воздействий и повреждения строений. Также разработан предварительный вариант методики оценки сейсмических воздействий прогнозируемого землетрясения. Оба этих направления пока проработаны недостаточно тщательно, авторам видны их недостатки и слабые места. Однако устранение каждого из этих недостатков представляет собой обозримую и решаемую научно-техническую задачу.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21 и целевой программы «Развитие») с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Гусев А.А., Л.С. Шумилина, К.Н. Акатова.* Об оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского на основе набора сценарных землетрясений // Электрон. науч.-информ. журнал "Вестник ОГГГГН РАН". М.: ОИФЗ РАН, 2005. №1 (23). URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2005/screp-2.pdf.

2. *Гусев А.А., Л.С. Шумилина.* Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. 1999, № 4-5. С. 29–40.

3. *Дрознин Д. В., Чебров Д. В., Дрознина С. Я., Ототюк Д. А.* Автоматизированная оценка интенсивности сейсмических сотрясений по инструментальным данным в режиме квазиреального времени и ее использование в рамках Службы срочных сейсмических донесений на Камчатке // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53. № 3. С.5–19. DOI: 10.21455/si2017.3-1.

4. *Копылова Г. Н.* Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. №6. С. 52–64.

5. *Салтыков В. А., Кугаенко Ю. А., Синицын В. И., Чебров В. Н.* 20 лет исследованию сейсмических шумов на Камчатке: от экспериментальных наблюдений к прогнозу землетрясений и моделированию // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. №1. Вып. 9. С. 37–50.

6. *Салтыков В. А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.

7. *Фирстов П. П., Макаров Е. О.* Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. №4. С. 58–80.

8. *Хаткевич Ю. М., Рябинин Г. В.* Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. №4. С. 34–42.

9. *Чебров В. Н., Дрознин Д. В., Кугаенко Ю. А., Левина В. И., Сенюков С. Л., Сергеев В. А., Шевченко Ю. В., Ящук В. В.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2013. №1. С. 18–40.

10. *Чебров В. Н., Салтыков В. А., Серафимова Ю. К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.

11. *Чебров Д. В.* Развитие системы комплексных сейсмологических и геофизических наблюдений на Камчатке и ее сопряжение с Аппаратно-программным комплексном «Безопасный город» Камчатского края // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. [Электронный ресурс]: Труды Седьмой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября –7 октября 2019 г. / Отв. ред. Д. В. Чебров. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 113–118. 1 электрон. отп. диск. ISBN 978–5–903258–40–6.

12. *Чебров Д. В., Дрознин Д. В., Матвеенко Е. А., Митюшкина С. В., Раевская А. А.* Прототип системы мониторинга фактических сейсмических воздействий на здания и сооружения Петропавловска-Камчатского по инструментальным данным // [Электронный ресурс]: Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 26 сентября–2 октября 2021 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 372–376.

13. *Чебров Д.В., Гусев А.А. Чебров В.Н.* Моделирование карты изосейст сильного землетрясения на Камчатке с учетом анизотропии затухания // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Девятой международной сейсмологической школы. Республика Армения, 8–12 сентября 2014 г. Обнинск, 2014. С. 340–344.

14. *Чеброва А. Ю., Чемарев А. С., Матвеенко Е. А., Чебров Д. В.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции //Геофизические исследования. 2020. Т. 21. №3. С. 66–91. https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5.

УДК 550.343.6

НОВАЯ ПАРАДИГМА КРАТКОСРОЧНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Чирков Е.Б.

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г.Москва, ye_chirkov@list.ru

Введение в проблематику

В данной работе предлагается новая парадигма краткосрочных предвестниковых исследований, для того чтобы лучше понять причины и цели её выдвижения, а также способ преодоления парадигмой недостатков выдвигаемых ранее подходов целесообразно рассмотреть текущеё состояние проблемы краткосрочного прогноза и историю его возникновения.

В настоящее время можно констатировать отсутствие научного консенсуса относительно принципиальной возможности краткосрочного прогноза землетрясений, потерю научного престижа направления и сокращение его финансирования, проявляющееся в частности в том, что масштабные проекты, связанные с поиском краткосрочных предвестников, практически отсутствуют. Сейсмологи, как представители науки, одной из целей которой является разработка метода прогноза землетрясений предпочитают не обсуждать эту тему, профильные организации по данному вопросу в основном безмолвствуют. Бросается в глаза контрастное разнообразие теорий и мнений по поводу краткосрочного прогноза, где наряду с работами отдельных энтузиастов, широко представлены теории прогноза и критика направления от учёных не занимающихся этой проблемой профессионально. Другими словами, текущую ситуацию можно охарактеризовать как серьёзный кризис в развитии данного направления, когда имеется неопределённость не только в выборе пути его дальнейшего развития, но и сомнения в целесообразности его развития в целом. Заметим, что всё это резко контрастирует с энтузиазмом, выделением значительных средств, интенсивной работой полигонов и ожиданием скорого качественного прорыва в краткосрочном прогнозе во второй половине прошлого века, и требует внимательного анализа.

Формализм структуры научных революций Томаса Куна

Чтобы лучше понять причины текущего состояния дел и существо предлагаемого в работе подхода целесообразно проанализировать более чем полувековую историю работ по краткосрочному прогнозу и новые предложения, как бы с высоты птичьего полета, с помощью подходящего данной ситуации формального подхода. Поскольку данное направление находится в состоянии кризиса, естественным является применение формализма, предложенного Томасом Куном [3]. Использование данного формализма для анализа ситуации с краткосрочным прогнозом землетрясений правомерно, поскольку согласно Куну, весь формализм данного подхода может применяться к ситуациям, затрагивающим и относительно небольшие части дерева научного знания и научного сообщества, поскольку из-за узкой специализации именно небольшие специализированные сообщества и развивают отдельные направления.

Дадим короткое содержательное введение в формализм Томаса Куна, поскольку будем активно использовать его в дальнейшем для описания истории направления и предлагаемой смены парадигмы. Согласно Куну [3] в каждом научном направлении периоды нормальной науки сменяются кризисами, которые в свою очередь сменяются научными революциями. Современные учебники маскируют и искажают этот процесс, излагая историю направлений с позиции постепенного роста знаний в рамках текущей парадигмы. Понятие парадигмы является центральным в формализме Куна, который понимает под этим понятием общее видение научным сообществом проблем направления и путей их решения. Кун указал, что используемые научным сообществом модели и представления могут быть не вполне осознаваемыми и для их принятия важно лишь наличие алгоритмов решения практических задач (по терминологии Т. Куна -головоломок) и признаваемая научным сообществом возможность их решения с помощью данных алгоритмов.

Именно наличие парадигмы определяет быстрый прогресс науки в нормальный период, поскольку фокусирует внимание и энергию научной общественности на практических задачах разрешимых в рамках данной парадигмы. Кун с большим уважением относится роли нормальных периодов развития науки и трактует его достаточно широко. Перефразируя Куна [3], при появлении парадигмы её понятия и законы являются нечеткими обозначениями и приобретают свой настоящий смысл только при решении практических задач. Поэтому по Куну, в отличие от представлений Карла

Поппера, никакие логические построения с понятиями парадигмы не могут её обосновать или опровергнуть в начальном этапе и только практика может со временем очертить область её возможного применения, что можно понимать как неизбежное следствие ограниченности человеческого разума и постепенности постижения им окружающего мира Это положение Куна блестяще иллюстрируется Имре Лакатосом [4] на примере реальной истории доказательств и опровержений теоремы Коши о соотношении числа вершин, сторон и граней правильных многогранников.

К кризису научного направления по Томасу Куну [3] приводит прежде всего невозможность решения новых практических задач в рамках данной парадигмы и в значительно меньшей степени накопление необъяснимых с её помощью артефактов. Состояние кризиса направления характеризуется наличием конкурирующих теорий, сомнений (как в старой парадигме, так и полученных с её помощью результатах), а также хаосом и застоем в научных исследованиях по данному направлению. При научных революциях происходит смена парадигмы, проявляющаяся в изменении общего взгляда на предмет исследования, в смене ценностных установок, введении новых терминов, методов, приоритетов и задач исследования.

Согласно Куну, парадигма никогда не отвергается, а всегда только заменяется на другую, причем новая парадигма принимается не всеми и не сразу, процесс этот медленный и тяжелый. Это можно понять с другой стороны, парадигма в некотором смысле является инструментарием для решения практических задач, а научные исследования не могут осуществляться без инструментария, которому учёные доверяют.

Резюмируя анализ работы [3] Томаса Куна можно заключить, что адекватность формализма Куна обосновывается значительным числом фактов и реальных ситуаций естественнонаучной истории цивилизации и данный формализм является надежным инструментом для анализа любой ситуации в области естественных наук.

История проблемы краткосрочного прогноза с помощью геофизических методов

Бурный старт предвестниковых исследований был обусловлен прогрессом в области электроники, давшим средства для проведения мониторинга. Однако сейсмология, находящаяся в фазе нормальной науки, несмотря на высокий уровень развития и аппаратурно- методического обеспечения была не готова идеологически и методически к руководству этими прогнозными исследованиями, поскольку данное направление лежало в стороне от основных задач сейсмологии изучения строения Земли и физики очага землетрясения.

Поэтому исследования по краткосрочному прогнозу развивались стихийно энтузиастами и идеологически выбранный подход к краткосрочному прогнозу бессознательно основывался на исторических данных, зафиксировавших наличие масштабных предвестников перед некоторыми землетрясениями, связанных с особенностями уникального геологического строения, что одновременно воспринималось как доказательство существования предвестниковых сигналов, обязательности их появления, их уникальной морфологии и большой амплитуды.

Утверждению этих представлений способствовало то, что источник предвестникового сигнала в очаге будущего землетрясения соответствовал простейшей модели, связывающей очаг и предвестник и подтверждался некоторыми современными явлениями типа выхода из строя межконтинентальных кабелей перед землетрясениями.

Имевшиеся наблюдения разнообразных предвестников и выявленные приблизительные зависимости амплитуды некоторых предвестников от магнитуды события и расстояния до будущего очага также поддерживали уверенность в правильности данных интуитивных представлений.

Вследствие всего этого обязательность наличия предвестникового сигнала воспринималось как данность, казалось, что достаточно расположить сеть пунктов измерения и можно будет выделить предвестниковые сигналы по их площадному проявлению и синхронности проявления электромагнитных сигналов и оценить место будущего землетрясения по затуханию амплитуды предвестников. Временная задержка между появлением сигнала и основным толчком должна быть небольшой, поскольку мы фиксируем первую фазу начавшегося процесса разрушения в будущем очаге, а его магнитуду можно будет оценить на основе уже имеющихся грубых эмпирических зависимостей.

Ряд косвенных признаков также убеждает нас в справедливости представления о неосознаваемой модели источника в очаге землетрясения. Сам факт бурного развития исследований по направлению во второй половине прошлого века по Куну [3] несмотря на отсутствие явной декларации парадигмы свидетельствует о её наличии.

Выбор направлений исследования тоже говорит о лежащей в основе модели источника предвестникового сигнала в очаге землетрясения (ориентированный на процессы в очаге поиск природы предвестников при разрушении образцов; обусловленное представлением о мощном сигнале вызванным уникальным процессом в очаге пренебрежение выделением сигнала из помех и использование амплитудных и морфологических критериев выделения предвестников, предполагающий распространение предвестникового сигнала из очага поиск зависимости амплитуды предвестника от магнитуды и расстояния до будущего очага). О неосознанной приверженности к модели мощного источника в очаге землетрясения указывает также то, что неизвестность природы предвестника не рассматривалась как препятствие проведению исследований, а вопросы о природе процесса приводящего к появлению краткосрочного предвестника и о механизме распространения предвестника от очага до пункта наблюдения даже не ставились.

Однако полученные экспериментальные данные вызвали удивление и показали, что в момент землетрясения, то есть во время максимальной динамики процессов в очаге, предвестники отсутствуют, да и проявляются они не всегда, мозаично и неодновременно, а их манифестация не имеет значительной амплитуды и ярких морфологических отличий. Как видно сам характер обманутых ожиданий относительно поведения предвестников убедительно свидетельствует о предполагаемой модели источника предвестникового сигнала в очаге землетрясения. Из-за неработоспособности критериев неосознаваемой парадигмы стало невозможным априорное выделение предвестников. По сути осталось лишь то, что предвестник предваряет землетрясение. Связать по свойствам или признакам предвестник и землетрясение для общего случая не получалось из-за того, что краткосрочные предвестники не выделялись из помех так как не были морфологически уникальны и амплитуды, часто наблюдались на расстоянии большем, чем позволяет теория И.П. Добровольского [1], время предсказания варьировалось и четкой зависимости амплитуды предвестника от магнитуды и расстояния до будущего очага не наблюдалось. Строго говоря, формально осталась лишь возможность апостериорно сопоставлять ряды землетрясений и интуитивно выделенных предвестников.

В завершение можно заключить, что кризисная ситуация в области краткосрочного прогноза возникла в результате несоответствия полученных экспериментальных данных полностью неосознаваемым представлениям об источнике предвестникового сигнала в очаге землетрясения и потери направляющей роли соответствующей парадигмы в решении практических задач краткосрочного прогноза, что проявлялось всё более рельефно по мере роста технических возможностей и увеличения объёма полученных экспериментальных данных.

Научная революция основанной на теории самоорганизованной критичности

В полном соответствии с теорией Томаса Куна [3] потеря направляющей роли парадигмы привела к её критическому рассмотрению, в результате которого была принята новая парадигма, основанная на теории самоорганизованной критичности (СОК). С точки зрения теории Куна эта научная революция не обладала ключевыми свойствами присущими новой парадигме. В теории новая парадигма должна лучше объяснять экспериментальные факты и предоставлять более широкие возможности по решению практических задач, парадигма на основе СОК не только не объясняла лучше экспериментальные факты, но и ряду их просто противоречила (постоянству квазилинейной картины мировой сейсмичности, её быстрому затуханию при удалении от континентальных окраин, зарегистрированным процессам подготовки землетрясений [5, 7, 6] успехам долгосрочно-среднесрочного прогноза, не создавая при этом никаких возможностей по решению практических задач краткосрочного прогноза. Обычно смена парадигмы не происходит до того, как сохраняется возможность решать практические задачи, здесь смена произошла в момент прогресса в реальном прогнозе у отдельных приверженцев старой парадигмы обладающих сильной интуицией [9]. По Куну смена парадигмы производится постепенно самим узкоспециализированным научным сообществом, здесь она была реализована внезапно не имеющей отношения к прогнозу группой ученых.

Отсутствие ключевых теоретических свойств у парадигмы основанной на СОК позволяют предположить её искусственную природу, что усугубленное отсутствием у её адептов значимых научных результатов [16] при наличии крупных провалов (сокрушительный провал полностью формализованного пятилетнего прогноза Epidemic-Type After-Shock Sequence (ETAS) для сейсмичности Японии [19, 20] и Италии [24]) в области краткосрочного прогноза более чем за двадцать лет господства данной парадигмы вызывает необходимость более внимательного рассмотрения данной проблемы.

Предварим это рассмотрение замечанием общего плана, отражающим наш взгляд на парадигму основанную на теории СОК.

Чем научное открытие как правило лежащее в основе новой парадигмы отличается от лоббирования интересов влиятельной социальной группы. Научное открытие - одна причина, множество следствий, замечаемых учеными всего мира, очевидность аргументов, быстрое принятие на вооружение научной общественностью. Лоббирование интересов- одно практическое следствие (в данном случае закрытие направления краткосрочного прогноза с помощью геофизических методов) в утверждении которого заинтересована одна или несколько влиятельных групп, весь спектр возможных причин, с преобладанием критики альтернативного направления [8] над обоснованием своего тезиса (невозможности краткосрочного прогноза) систематически продвигаемых определённой группой ученых, опора на единичные, специально отобранные экспериментальные результаты; сомнительные теории (СОК) физическая релевантность которых не доказана; обобщения и заключения, зачастую содержащие логические ошибки, замалчивания и передергивания, что в совокупности с неочевидностью и спорностью аргументации, вызывает неутихающие научные дискуссии [2, 8]. Таким образом при установлении научного факта для научной общественности наиболее очевидной становится причина явления, а при лоббировании направления – практическая цель этой деятельности.

В этом переходе на парадигму основанную на СОК сошлись интересы власть имущих, не желающих развития этого ресурсоемкого и дорогостоящего направления не имеющего четкой научной программы и не позволяющего в перспективе существенно сократить материальные потери при землетрясении; мощного коллектива сейсмологов, не желающими терять свою руководящую роль и финансирование предназначенное для этого направления и геофизиков ответственных за провал долгосрочного дорогостоящего эксперимента в Паркфильде, желающих обосновать его с помощью СОК. Благодаря усилиям этих групп к проблеме было привлечено внимание широкой научной общественности, внимание которой было сконцентрировано на не научности направления прогноза с помощью геофизических методов, субъективности отнесения наблюдаемых аномалий к предвестникам и неудачам прогнозных исследований. Для широкой научной общественности определяющими оказались пять факторов: вынос проблемы на уровень ведущих научных изданий, раскрученная средствами массовой информации теория СОК, авторитетное мнение многочисленного сообщества сейсмологов, ассоциируемого научным сообществом с прогнозной тематикой, акцентированные дорогостоящие неудачи (прогноза Тангшанского землетрясения, провала Паркфильдского эксперимента) и отсутствие у геофизиков- прогнозистов внятной и работоспособной научной программы.

СОК как теория обосновывающая невозможность прогноза была жизненно необходима для закрытия направления краткосрочного прогноза на основе геофизических методов, так как никаким количеством неудач прогноза нельзя доказать его принципиальную невозможность, поскольку необходимый для статистического заключения объём выборки стремится к бесконечности при стремлении величины эффекта к нулю.

СОК появилась через год после публикации группы VAN [23], ознаменовавшей начало нового этапа предвестниковых исследований в области краткосрочного прогноза. Уже во введении к своей амбициозной книге "How Nature Works" [10] Бак сообщает, что самым интересным следствием его теории является то, что катастрофа может произойти без причин и когда угодно. Далее он утверждает, что вся земная кора – это единая система, которая находится в критическом состоянии и что минимальные возмущения системы, находящейся в критическом состоянии могут привести к катастрофам любой величины. Позже добавляет, что нельзя предсказать отдельное землетрясение, можно предсказать только статистические характеристики процесса. Это было ровно то, что требовалось для закрытия направления краткосрочного прогноза с помощью геофизических методов.

История СОК применительно к проблематике прогноза, как и личность её автора Пера Бака также заслуживает упоминания.

Согласно его воспоминаниям [10], Пер Бак ничего не знавший о геофизике и землетрясениях услышал о законе Гутенберга- Рихтера впервые на конференции по фракталам в 1988 году от Яна Кагана, после этого послал две статьи по поводу землетрясений в «Science» и «Nature», был удивлен, когда их отклонили геофизики, вообще, по его мнению, не понявшие что речь идет об общей теории землетрясений. Бак посетовал, что в тоже время даже в «Nature» можно опубликовать любую мелочь, как бы незначительна она не была [10]. Предложенная в 1987 году СОК [11] была принята не сразу, по словам Бака к 1995 на эту тему было опубликовано около сотни статей, затем она была подозрительно быстро подхвачена научной общественностью и к 1996 году как сообщает Пер Бак во

введении к своей книге разными авторами было опубликовано на тему СОК более 2000 статей, и статья [11] стала наиболее цитируемой физической статьей [10].

Обычно теории предлагаются математиками после понимания физики явления в частных случаях на основе экспериментальных данных. Не будучи математиком Бак предположил существование и повсеместное распространение особой, неизвестной до него системы самой приводящей себя в критическое состояние и не имеющей управляющих параметров [10].

Будучи физиком Бак вёл себя нестандартно и для физика, считал, что внимание к деталям не позволяет за деревьями увидеть лес, и в соответствии с этим принципом предложил общую теорию одновременно для описания осыпания кучи песка, оползневых явлений, землетрясений, феномена жизни, теории эволюции, пульсаров, черных дыр, работы мозга и экономики, не являясь специалистом ни в одной из этих областей [10]. Математические модели он тоже понимал довольно широко и своеобразно: куча песка, связанные маятники и землетрясения у него описываются одной моделью и, по его мнению, достаточно изучить одну из этих проблем, чтобы понять все [10].

Независимо от степени строгости и красоты математической теории для возможности её применения к решению реальных задач требуется наличие физического обоснования её применимости, что прекрасно сознавал Бенуа Мандельброт создатель фрактального анализа долгое время пытавшийся установить чёткие границы применимости своего метода, в конце концов предложивший просто применять метод и оценивать достоверность результатов исходя из физического понимания проблемы. При доказательстве релевантности СОК сейсмотектоническим процессам постулируется сложность системы и возможность применения СОК на основе внешнего подобия, например, наличия фликкер-шума (в качестве причины которого, однако, СОК тоже не проходит [21]) и степенного распределения (Закон Гутенберга – Рихтера) которое как выяснилось в дальнейшем может быть обеспечено без СОК просто фрактальностью среды при наличии нагружения [15]. Были попытки доказать, что все фракталы в природе порождены СОК, но они тоже оказались неверными [25]. Здесь стоит заметить, что фрактального строения земной коры и наличия нагружения для особого состояния, называемого СОК отнюдь не достаточно, необходимы еще какие-то дополнительные условия, которые не удалось выявить [25], как и не удалось построить теорию СОК [15] и получить экспериментальные свидетельства существования этого состояния в природе [25]. Забавно и то, что, как показали исследования этого вопроса, из справедливости СОК вовсе не следует непрогнозируемость [22; 25]. Все эти нестыковки СОК неудивительны, поскольку она была предложена не на основе реальных экспериментов, а на основе мысленного представления о характере обрушения растущей кучи песка, [11], которое впоследствии не было подтверждено экспериментально [18; 26]. Таким образом, СОК не имеет статуса теории, физического основания и экспериментального подтверждения. Данная парадигма эвристически бесплодна, природу чего можно проиллюстрировать интерпретацией аномалии ЭМИ перед землетрясением в терминах математических метатеорий [14]. Очевидно, что завершение интерпретации не физикой возможного механизма явления, а декларацией внешнего сходства проявлений с той или иной особенностью СОК или теории перколяции ничего не дает нам для понимания проблемы.

Резюмируя всё это следует заключить, что «так природа не работает», СОК не теория, а особое состояние среды, существование которого в природе не доказано и поэтому СОК не может служить для обоснования невозможности краткосрочного прогноза с помощью геофизических методов.

Хотя никакое количество неудач краткосрочного прогноза не может обосновать его невозможность коротко отметим тенденциозность освещения двух наиболее часто приводимых неудач прогноза в качестве ещё одного свидетельства факта лоббирования сворачивания геофизических работ по краткосрочному прогнозу. Ожидание землетрясения в Паркфильде в определенный временной интервал не учитывало, что на время подготовки, связанное с временем накопления достаточного количества упругой энергии в данном участке земной коры, оказывают влияние разрядки накопленной энергии по соседним разломам. Вопрос отсутствия аномалии в Паркфильде перед землетрясением -вопрос интерпретации, поскольку зарегистрированное синхронное снижение уровня НДС на 10^{-8} на всех станциях перед землетрясением [12, 17] по теории ЛНТ является свидетельством одновременно попадания пунктов наблюдения не во внутреннюю часть консолидированной неоднородности и манифестации динамической фазы разрушения. Кстати, это одновременное снижение НДС на всех станциях говорит о том, что проявления СОК отсутствуют даже в непосредственной окрестности очага перед моментом землетрясения. При приведении в качестве примера катастрофического провала прогноза Тангшанского землетрясения (28 июля 1976 г., M=7.8) в результате которого погибло более 240 тысяч человек почему-то не упоминается, что

провал был вызван ошибкой администрации, а представители Циньлунского уезда на основании этой же информации о предвестниках провели своевременную эвакуацию 470 тысяч человек и не имели ни одной жертвы вследствие завалов и разрушений [13].

Завершая обзор «научной революции» основанной на СОК можно заключить, что по формальным и содержательным признакам это не научная революция, а лоббирование закрытия направления краткосрочного прогноза с помощью геофизических методов в интересах влиятельных социальных групп, поскольку характеризуется приведением для достижения этой цели всех мыслимых аргументов, оказывающихся при ближайшем рассмотрении несостоятельными [8].

Новая парадигма краткосрочных предвестниковых исследований

Таким образом «научная революция» основанная на СОК не помогла выйти из кризиса направления краткосрочного прогноза, вызванного несоответствием экспериментальных данных предполагаемой модели источника предвестникового сигнала в очаге будущего землетрясения, а только показала опасность использования формальных подходов не имеющих физического основания.

Есть ли выход из этой ситуации? Когда огромный массив экспериментальных данных по предвестниковым явлениям противоречит нашим модельным представлениям их справедливость вызывает обоснованные подозрения. В первую очередь проверке подлежат не факты, а наше их восприятие, приведшее к созданию модельных представлений. Модель источника предвестникового сигнала в очаге землетрясения является самой простой, но не единственной и унаследована из относительно небольшого числа отдельных исторических свидетельств за значительный период времени. При этом вне поля зрения оставалось то, что история не сохранила таких свидетельств о десятках и сотнях землетрясений не сопровождавшимися явлениями подобными описанным, которые имели место за это время исходя из гипотезы о стационарности сейсмотектонического процесса. Если отвлечься от удобного представления об универсальности процесса подготовки землетрясения и предположить его зависимость от тектонического строения региона, то можно допустить, что при наличии одного и того же процесса подготовки манифестация предвестниковых явлений может испытывать значительные вариации интенсивности в зависимости от конкретного тектонического строения. Наблюдаемые предвестниковые явления в этой связи можно грубо разделить на два класса: яркие амплитудные наблюдающиеся в благоприятной тектонической обстановке и связанные с её нелинейным и зачастую необратимым откликом на динамическую фазу процесса подготовки и практически незаметные малоамплитудные связанные с линейным повторяющимся откликом на динамическую фазу процесса подготовки и наблюдающиеся в любой тектонической обстановке при подготовке каждого землетрясения. Отождествление свойств этих двух классов, когда мощь ярких проявлений была распространена на все предвестниковые явления в соединении с наиболее простой моделью связи процесса в очаге и предвестника и привело к созданию модели источника предвестникового сигнала в очаге землетрясения, и отчасти обусловило недоумение по поводу уникальности и не повторяемости наблюдаемых предвестников. Функции этих классов для разработки методов краткосрочного прогноза различаются: яркие редко наблюдающиеся предвестники запечатленные в исторических хрониках и в качестве большинства зарегистрированных предвестников срабатывающие как правило один раз и не повторяющиеся являют нам доказательства наличия определенных динамических фаз процесса подготовки землетрясения, а малоамплитудные, реагирующие на эту динамическую фазу повсеместно и постоянно могут быть использованы для реального прогноза, но могут выделяться только с помощью высокочувствительных и помехозащищенных методов.

Однако, чтобы выбрать метод для регистрации малоамплитудного предвестника и разработать помехозащищенную методику выделения предвестникового сигнала нам необходимо знать его природу. Поскольку существование процесса подготовки, связанное с накоплением в коре упругой энергии под действием мантийной конвекции можно считать установленным фактом, также как выделение этой накопленной упругой энергии в акте землетрясения можно предположить, что предвестниковые явления имеют изначально механическую природу. В механическом плане именно трещиноватость среды дает наиболее сильные вариации её свойств при малых вариациях НДС. Заметим, что наиболее распространённые предвестники могут быть просто объяснены малыми вариациями НДС трещинноватой среды (аномалии в кажущемся сопротивлении, газовых эманациях и уровне воды -изменением емкости и проницаемости трещинного пространства; ЭМИ, акустическая эмиссия и сейсмоэлектрические сигналы (SES) вариацией излучения трещин, являющихся естественными концентраторами напряжений). Заметим, что зависимость величины эффекта от

расположения измерительной системы относительно трещин объясняет и факт наличия чувствительных точек в технологии профессора Варотсоса и мозаичность проявления предвестников, обусловленную неравномерным распределением трещин и вариацией уровня помех и отсутствие строгой зависимости амплитуды предвестника от магнитуды и расстояния до очага. Установленные предвестниковые проявления в кажущемся сопротивлении (КС), уровне воды и газовых эманациях жестко привязывают вызывающие их эффекты к локальным процессам. Поскольку сам факт существования этих предвестниковых явлений и соответственно вызывающих их локальных процессов можно считать установленным по огромному массиву ярких предвестниковых проявлений, то разумно предположить, что их распространение от очага до точки наблюдения осуществляется механическим путем. Бухтообразная форма краткосрочных предвестников, частое появление их на расстояниях, больших рассчитанных для долгосрочных предвестников на основе статической модели И.П. Добровольского [1] позволяет предположить волновое распространение предвестников. Наблюдаемая большая длительность бухт и значительные сдвиги во времени проявления в разных пунктах наблюдения могут быть объяснены малой скоростью распространения возмущений, отличающих распространение хорошо известных деформационных волн в Земле. Можно в качестве практической иллюстрации привести стопроцентную повторяемость появления деформационных волн на взрывах, зарегистрированных мной в более чем в десяти экспериментах в Тырнаузе. Возможность поглощения распространяющейся медленной волны разломами объясняет отсутствие предвестников с некоторых азимутов в наблюдениях профессора Варотсоса. Что же является причиной, порождающей медленную волну – по нашему мнению это известная из ЛНТ динамическая фаза, связанная с концентрацией трещин в области будущего разлома и разгрузкой внешней части консолидированной неоднородности.

Заметим, что учёт влияния такого широко распространённого свойства горной породы как трещинноватость позволяет не только описать предвестниковые явления, но и весь цикл тектонического землетрясения. Рыхлая из-за нарушенности разломами и трещинами кора должна предварительно консолидироваться, чтобы начать накапливать упругую энергию, ввиду малой скорости мантийных потоков эта консолидация занимает значительное время пропорциональное магнитуде готовящегося события и создает долгосрочные предвестники После формирования неоднородности согласно теории ЛНТ наступает фаза её динамического растрескивания, которая затем переходит в фазу концентрации трещин и напряжений в субплоскости будущего разлома, что создает медленную деформационную волну порождающую в пунктах наблюдения краткосрочные предвестники. После этого происходит главное событие и опционально афтершоковый процесс увеличивающие степень трещинноватости земной коры.

Почему эти простые представления выдвигаются в виде новой парадигмы? Формально потому, что они полностью удовлетворяют требованиям предъявляемым к парадигме Томасом Куном, то есть объясняют артефакты прошлой парадигмы, указывают новые путь и способ решения практических задач прогноза, допускают простую верификацию и фальсификацию сделанных предположений уже на современном уровне развития технологий.

Содержательно эти представления полностью переориентируют поиск предвестников с эффектов возникающих при разрушении образцов, на эффекты возникающие при малых линейных деформациях трещинноватой среды и исходя из наличия и влияния одного свойства среды - трещинноватости объясняют весь цикл тектонического землетрясения, природу и все феноменологические особенности наиболее популярных типов наблюденных предвестников; обеспечивают возможность разработки помехозащищенных технологий регистрации малоамплитудных предвестников и проверки их работоспособности при контроле деформаций среды любой природы. В рамках этих представлений вводится гипотеза о процессе, порождающем краткосрочный предвестник; даются признаки для априорного выделения краткосрочного предвестника как распространяющейся волны деформации, скорость которой по предварительным данным пропорциональна магнитуде события, а траектория определяет положение его очага. В связи с изменением подхода к прогнозу предлагаются новые понятия (яркие и малоамплитудные краткосрочные предвестники; вместо «времени предсказания» вводится имеющая физический смысл «длительность динамической фазы разрушения», равная сумме времени распространения до пункта наблюдения и времени предсказания) Некорректный термин «предсказание» заменяется на «обнаружение динамической фазы разрушения». Вводятся два генетических типа краткосрочных предвестников: связанные с разгрузкой внешней зоны консолидированной неоднородности, которые могут сопровождаться газовыми эманациями и снижением атмосферного давления и предвестники, связанные с распространением медленной деформационной волны соответственно).

Список литературы

1. *Добровольский И.П.* Теория подготовки тектонического землетрясения АН СССР. М.: ОИФЗ АН СССР, 1991. 224 с.

2. *Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А.* Краткосрочный прогноз землетрясений: реальность, научная перспектива или проект-фантом? // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 3. С. 3–12.

3. *Кун Т.* Структура научных революций. М.: АСТ, 2015. 320 с.

4. *Лакатос И.* Доказательства и опровержения. М.: Наука, 1967. 151с.

5. *Мячкин В.И.* Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978. 232 с.

6. *Родкин М.В.* О режиме сейсмической активизации в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С.74–79.

7. *Трапезников Ю.А., Волыхин А.М., Щелочков Г.Г., Зейгарник В.А., Брагин В.Д., Кошкин Н.А., Туровский П.С., Геллер Е.Л., Орленко Н.Н.* Основные результаты электромагнитных исследований по прогнозу землетрясений на полигонах ИВТАН // Прогноз землетрясений. 1989. № 11. С. 264–274.

8. *Чирков Е.Б.* Проблемы краткосрочного прогноза: формальный аспект // Наука и технологические разработки. 2020. Т. 99. № 3. С. 46–64. https://doi.org/10.21455/std2020.3-4.

9. *Aceves R.L., Park S.K., Strauss D.J.* Statistical evaluation of the VAN method using the historic earthquake catalog in Greece // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. N 11. P. 1425–1428.

10. *Bak P.* How Nature Works. New York: Springer-Verlag, 1996. 212 p.

11. *Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.* Self-Organized Criticality: An Explanation of 1/f Noise // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. N 4. P. 381–384.

12. *Bakun W.H., Aagaard B., Dost B., Ellsworth W.L., Hardebeck J.L., Harris R.A., Ji C., Johnston M.J.S., Langbein J., Lienkaemper J.J., Michael A.J., Murray J.R., Nadeau R.M., Reasenberg P.A., Reichle M.S., Roeloffs E.A., Shakal A., Simpson R.W., Waldhauser F.* Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake // Nature. 2005. V. 437. N 13. P. 969–974.

13. *Col J.M., Chu J.J.* Early Warning Success for the 1976 Tangshan Earthquake: A Best Practice Integrating Public Administration and Science // Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction / Eds. J. Zschau, A. Kuppers. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003. P. 479–481.

14. *Eftaxias K., Potirakis S.M., Contoyiannis Y.* Four-Stage Model of Earthquake Generation in Terms of Fracture Induced Electromagnetic Emissions: A Review // Complexity of Seismic Time Series Measurement and Application / Ed. by T. Chelidze, F. Vallianatos, L. Telesca. Elsevier. 2018. P. 438–503.

15. *Hergarten S.* Self-Organized Criticality in Earth Systems. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 272 p.

16. *Kagan Y.Y.* Worldwide earthquake forecasts // Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 2017. V. 31. P. 1273–1290. https://doi.org/10.1007/s00477-016-1268-9.

17. *Langbein J., Borcherdt R., Dreger D., Fletcher J., Hardebeck J., Hellweg M., Ji C., Johnston M.,Murray J., Nadeau R., Rymer M., Treiman J.A.* Preliminary report on the 28 September 2004 M 6.0 Parkfield, California earthquake // Seismol. Res. Lett. 2005. V. 76. N 1. P. 10–26. https://doi.org/10.1785/gssrl.76.1.10.

18. *Nagel S.R.* Instabilities in a sandpile // Rev. Mod. Phys. 1992. V. 64. N 1. P. 321–325.

19. *Nanjo K.Z.* Earthquake forecasts for the CSEP Japan experiment based on the RI algorithm // Earth Planets Space. 2011. V. 63. P. 261–274.

20. *Nanjo K.Z., Tsuruoka H., Yokoi S., Ogata Y., Falcone G., Hirata N., Ishigaki Y., Jordan T.H., Kasahara K., Obara K., Schorlemmer D., Shiomi K., Zhuang J.* Predictability study on the aftershock sequence following the 2011 Tohoku-Oki, Japan, earthquake: first results // Geophys. J. Int. 2012. V. 191. Iss. 2. P. 653–658. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05626.x.

21. *Pruessner G.* Self-Organised Criticality: Theory, Models and Characterisation. Cambridge: University Press, 2012. 494 p.

22. *Sornette, D.* Critical Phenomena in Natural Sciences. Chaos, Fractals, Self-organization and Disorder: Concepts and Tools. Springer, 2000. 434 p.

23. *Varotsos P., Alexopoulos K., Nomicos K. and Lazaridou M.* Earthquake prediction and electric signals // Nature. 1986. P. 120.

24. *Viti M., Cenni N., Babbucci D., Mantovani E.* Earthquake Predictions In Italy by Probabalistic approaches: Main Limitations // GNGTS. 2014. Sessione 2.1 001-502. V. 2. P. 98–104.

25. *Watkins N.W., Pruessner G., Chapman S.C., Crosby N.B., Jensen H.J.* 25 Years of Self-organized Criticality: Concepts and Controversies // Space Sci. Rev. 2016. V. 198. Iss. 1–4. P. 3–44. https://doi.org/10.1007/s11214-015-0155.

26. *Winslow N.* Introduction to Self-Organized Criticality & Earthquakes. University of Michigan, 1997. URL:http://www2.econ.iastate.edu/classes/econ308/tesfatsion/SandpileCA.Winslow97.htm (дата обращения: 07.12.2019 г.).

УДК 550.343.6

О ПРОБЛЕМАХ МОНИТОРИНГА SES НА УСТАНОВКЕ ПРОФЕССОРА ВАРОТСОСА

Чирков Е.Б.

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г.Москва, ye_chirkov@list.ru

Введение. История вопроса

Данная работа представляет собой практический пример применения новой парадигмы краткосрочных предвестниковых исследований в основании практического применения которой лежат три простых представления. Первое из которых заключается в том, что наиболее распространённые предвестники обусловлены малыми вариациями НДС трещиноватой среды (аномалии в кажущемся сопротивлении, газовых эманациях и уровне воды -изменением емкости и проницаемости трещинного пространства; ЭМИ, акустическая эмиссия и сейсмоэлектрические сигналы (SES) вариацией излучения трещин, являющихся естественными концентраторами напряжений). Второе - в том, что аномалии краткосрочных предвестников на значительном удалении от очага возникают вследствие распространения медленной волны деформации, порожденной известной из теории ЛНТ динамической фазой, связанной с концентрацией трещин в области будущего разлома и разгрузкой внешней части консолидированной неоднородности. Третье – в том, что краткосрочные предвестниковые явления делятся на два класса по возможности использования для целей краткосрочного прогноза. К первому относятся яркие, обладающие значительной амплитудой вызванные нелинейным, зачастую необратимым откликом среды на малую вариацию НДС, связанными с уникальными особенностями локального геологического строения, наблюдающиеся редко и не обладающие повторяемостью. Ко второму малоамплитудные, вызванные линейным откликом среды на малую вариацию НДС, наблюдающиеся всегда и практически повсеместно, не вызывающие необратимых явлений и обладающие повторяемостью. К ярким краткосрочным предвестниковым явлениям относятся все предвестники, зарегистрированные в исторических хрониках и большинство известных краткосрочных предвестников, поскольку для выделения малоамплитудных предвестников требуются чувствительные и помехозащищённые методики разработать которые возможно только на основе понимания природы краткосрочного предвестника и помех. Яркие редкие краткосрочные предвестники убедительно в силу накопленного значительного количества фактов их регистрации сообщают нам о существовании вариации НДС связанной с динамической фазой разрушения неоднородности, но не могут использоваться для практического прогноза из-за редкости возникновения и отсутствия повторяемости. Малоамплитудные предвестники могут использоваться для прогноза, но требуют аккуратной разработки техники и методики измерений и обработки, что может быть реализовано только на основе понимания природы сигнала и помех.

Мониторинг сейсмоэлектрических сигналов (SES) в силу ряда уникальных особенностей является одним из наиболее перспективных методов контроля малоамплитудных предвестников, связанных с распространением медленной волны деформации. Гениальная интуиция профессора Варотсоса специалиста по физике твердого тела позволила ему связать сейсмоэлектрические сигналы с процессом подготовки землетрясения и успешно использовать для их для практического прогноза на основе созданной им сети пунктов наблюдения в Греции. В девяностых я, благодаря М.Б Гохбергу, посетил Грецию, провел эталонировку наиболее чувствительной линии на станции Иоанина с помощью искусственного источника и просмотрел первичные материалы записей на вилле Глифада у профессора Варотсоса. В результате анализа всех этих данных, обсуждения их с профессором Варотсосом и сопоставлению их со своим опытом довольно быстро пришёл к твердому убеждению о реальности предвестниковых SES. Меня привлекла к этому направлению простота и небольшая стоимость развертывания сети наблюдений, широкое распространение SES и не имеющий мировых аналогов успешный опыт документированного реального прогноза группы профессора Варотсоса [9] и я начал собственное исследование, которое закончилось в 2004 году защитой кандидатской диссертации. К тому времени уже имелись статистическое обоснование предвестникового характера SES [6] и некоторые свидетельства связи SES с локальными вариациями НДС [8], в своей работе я подтвердил локальную природу SES, лоцировав реальные источники локальных сигналов при мониторинге афтершоковой последовательности Рача- Джавского землетрясения на основе одновременной регистрации их в двух близко-расположенных пунктах

наблюдения с помощью двух пар ортогональных измерительных диполей. В своей работе я также предложил полностью формализованную методики выделения этих сигналов с амплитудой, спускающейся до уровня шумов, разбиения их по источникам и локации, что было опубликовано в работе [7]. После защиты Б.В. Левин, который был моим научным руководителем предложил мне попробовать посотрудничать с Ю.А. Кугаенко по обработке данных в Карымшина полученных на установке профессора Варотсоса, это показалось мне интересным, поскольку на установке профессора Варотсоса в мире уже был получен довольно большой объём данных, что делало возможным получение информации о предвестниковых SES без дорогостоящих и длительных экспериментов. Я встретился с Ю.А.Кугаенко и мы договорились о сотрудничестве. Вскоре после этого О.А. Молчанов предложил мне некоторые из этих данных, и я решил попробовать применить к ним свои методики, результат был неожиданным, сигналов выделялось много, но разбить их по источникам и лоцировать не получалось, поэтому я был не уверен в достоверности выделенных сигналов. Это казалось парадоксом, поскольку я был уверен и в сигналах, которые наблюдал неоднократно в разных регионах и в своей технологии, проверенной с помощью искусственных источников, разрядность АЦП использованного в Каримшино чуть не вдвое превышала ту, которую я использовал в своих измерениях, но у меня было ощущение, что в результате применения алгоритмов получаю на выходе высокий уровень шума. Причина была в том, что для выделения сигналов я использовал синхронность скачка потенциала на независимых измерительных линиях, чтобы исключить влияние скачков потенциала на отдельных электродах, а здесь отдельных линий не было из-за измерений относительно общего электрода и я получал нужные мне данные вычитанием сигналов разных линий, что и было источником шума.

Ю.А. Кугаенко не раз спрашивала меня по поводу сотрудничества, а я отмалчивался: с одной стороны, ненадежными результатами в прогнозе можно просто похоронить перспективный метод; с другой стороны, я не знал, можно ли что-то с этим сделать и как; а с третьей- не хватало духу признаться привлекательной и харизматичной женщине в своей несостоятельности. По началу у меня возникла надежда, что может средства оптимизации Excel не справляются с данной задачей и я попробовал использовать профессиональный пакет What'sBest! но результата тоже не получил. Поскольку больше идей не было, как и денег на реализацию собственных наблюдений, я отложил эту задачу и вплотную занялся сейсмологической тематикой под руководством Н.В. Кондорской, что привело меня к расширению как видения геофизических проблем, так и используемого инструментария.

Возникшая проблема представляла собой яркий образец того, что представления исследователя о природе регистрируемых эффектов сильнейшим образом отражаются на методике эксперимента, в значительной мере определяют получаемый результат и убедительно свидетельствуют о том, что, не имея правильного представления о природе явления выделить малоамплитудные предвестниковые сигналы практически невозможно. Я пытался на установке Варотсоса помощью формализованной методики для сигналов чуть превышающих уровень шума получить надежный, внутренне согласованный результат который я уже получал его на своей установке и получал на выходе крайне зашумленную и не верифицируемую картину, поскольку установка профессора Варотсоса с длинными линиями и общими электродами была оптимизирована для регистрации сигналов удаленных источников, Поэтому несмотря на то, что я имел ясную картину того, что хочу зарегистрировать, разработка подходящей технологии обработки заняла значительное время. Дело в том, что для формализации технологии выделения SES и разделения их по источникам я принципиально не мог ограничиться уровнем сигналов выделяемых Варотсосом, поскольку для критерия выделения полезного сигнала из шума использовал тот факт, что SES создаваемые локальными источниками фиксированной геометрии имеют постоянные пространственные характеристики, а помехи нет и мне нужно было зарегистрировать значительной количество сигналов каждого источника чтобы выделить их из помех и разделить по источникам. Полагаю, что этот подход к выделению сигнала из помех является достаточно общим и может использоваться для выделения малоамплитудных сигналов активной природы (SES, акустика, ЭМИ).

Проблема с измерениями на установке профессора Варотсоса из-за своей простоты и практических перспектив возможного решения всё время оставалась в фокусе моего внимания. Идеи по поводу способа возможного решения проблем с выделением, кластеризацией и локацией SES пришли мне в районе 2010 года, вместе с пониманием необоснованности моих представлений о тесной связи, выделяемой мной характеристики (частоты SES) с вариацией НДС. Постепенно я разработал новую методику выделения и кластеризации сигналов по источникам, получил

повторяющиеся достаточно надежные результаты, правда пока не реализовал ещё надежную локацию.

Первоначально для чистоты эксперимента я хотел разработать полностью формализованную методику на имеющемся у меня наборе данных, затем проверить правильность своих представлений на общем массиве данных и в случае удачи предложить в качестве метода прогноза. Однако несколько обстоятельств подвигли меня к сворачиванию этой программы: затянувшийся процесс достижения результата (отчасти обусловленный большей чем ожидалось сложностью проблемы, отчасти ограниченностью личных возможностей, отчасти недостатком данных); некоторый прогресс в общем понимании проблемы краткосрочного прогноза, отраженный в двух других представленных мной на конференцию статьях; ожидание крупного землетрясения в районе Петропавловска Камчатского; и надежда, что уже на данном уровне развития метод может быть использован для краткосрочного прогноза, по крайней мере в сочетании с другими методами.

Преимущества и ограничения мониторинга SES с целью контроля вариаций НДС

Мониторинг SES при данной методике реализации кроме экономической эффективности обладает одновременно двумя преимуществами особенно важными для мониторинга малоамплитудных предвестников, а именно высокими чувствительностью помехозащищенностью.

Высокая чувствительность с одной стороны обеспечивается выделением сигналов, едва превышающих уровень шума, а с другой стороны с тем, что согласно лабораторным экспериментам, вариации потенциалов в образце при нагружении начинаются раньше, чем стокилогерцовая акустика.

Высокая помехозащищенность определяется тем, что контролируемый массив горной породы постоянно по разным причинам подвергается вариациям НДС и локальные источники постоянно излучают малые по амплитуде сигналы, пространственные характеристики которых (например отношения компонент, полученное на разных измерительных линиях) не зависят от амплитуды сигнала, большое количество сигналов излучаемых каждым заметным локальным источником позволяет надежно выделить их из помех (внезапные начала магнитных бурь и сигналы, вызванные сменой нагрузки у электровозов на железной дороге), которые не отличаются такой массовостью и постоянством пространственных характеристик.

Крутой фронт SES снижает требования к измерительным электродам, облегчает выделение сигналов, снижая вероятность наложения сигналов, облегчает разделение сигналов по источникам, которое крайне важно поскольку локальные источники обладают сильно различающейся чувствительностью к вариации НДС.

Заметим, что каждый источник излучает практически постоянно, при увеличении НДС изменяются характеристики излучения, в частности, увеличивается средняя амплитуда и частота излучаемых сигналов. Еще одним существенным преимуществом данной технологии является высокая информативность, связанная с тем то, что информация собирается сразу с некоторой площадки размером по крайней мере в несколько десятков метров, при этом мы получаем качественное представление о ходе вариации НДС в разных участках этой площадки, а иногда и для разных компонент тензора напряжений.

К сожалению, при этом мы не можем сравнить абсолютные величины напряжений в разных точках площадки между собой, потому что характеристики излучения зависят от параметров локальных источников и пока не известна характеристика излучения источника наиболее тесно связанная с вариацией НДС. Сейчас, пока не реализована надежная локация мы не можем также определить положения и направления отдельных источников. Однако, по моим представлениям это вопрос времени и может быть реализовано при наличии длинного ряда наблюдений.

Представления о природе SES и их связи с процессом подготовки землетрясения

В период защиты диссертации из-за широкой распространённости источников сигналов, которые я лично наблюдал в совершенно разной обстановке в разных регионах (Грузия, Тырнауз, Греция Тенерифе, Нарофоминск) мне стало очевидно, что они связаны с какими-то распространёнными особенностями строения среды, представляющими собой концентраторы локальных напряжений. Первоначально я представлял это в качестве контактов жестких блоков породы, являющихся концентраторами напряжений из-за малой площади реальных контактов в условиях внешнего нагружения, однако полученный в обсерватории Каримшина материал опроверг это представление. Наличие длинного ряда наблюдений с большим числом сигналов в сочетании с эффективной технологией разделения сигнала по источникам позволило выделить большое число источников сигналов (как кластеров сигналов с одинаковой геометрией).

Все выделенные кластеры оказались парными, то есть кластеру сигнала положительной полярности обязательно соответствовал кластер отрицательной полярности, расположенный рядом с ним. В качестве первого варианта было предположение, что отрицательный фронт - это выключение положительного сигнала, тогда разумно было бы ожидать чередования положительных и отрицательных фронтов и амплитуда отрицательного фронта (или сумма амплитуд последовательности отрицательных фронтов) должна была бы быть равной или меньшей положительного. В действительности такой картины не наблюдалось, ни в плане чередования, ни в плане устойчивого превышения амплитуды сигналов одной полярности. Вторая проверяемая модель была моделью одного источника, дающего положительный или отрицательный импульс в зависимости от характера изменения НДС (растяжение-сжатие). В этом случае можно было бы ожидать довольно длинных интервалов, в которых преобладают сигналы одного знака из-за того, что НДС массива не может меняться быстро и хаотически, но в зарегистрированных данных такой особенности явно не наблюдалось. Поэтому была принята модель двух рядом расположенных кластеров, аппроксимируемых дипольными источниками и реагирующих на одно и то же изменение НДС сигналами разной полярности.

Таким образом, каждый источник был представлен двумя близко расположенными противоположно ориентированными диполями с близкой мощностью и сходной динамикой на длинных временных интервалах, но относительно независимой на интервалах в десятки минут. Два близко расположенных источника противоположной ориентации не могут возникать случайно во всех случаях, должна существовать структура их порождающая. Выявленная структура источника в виде двух диполей, иногда не скомпенсированных, привела к модели трещины, как наиболее вероятной структуры неоднородности. Действительно, постоянное присутствие двух связанных противоположно ориентированных дипольных источников сигнала, известность того, что трещина является концентратором напряжений (коэффициент концентрации напряжений пропорционален отношению длины к ширине трещины и может достигать нескольких десятков [2]) и излучателем электрических импульсов [5], а также того, что наибольшая концентрация напряжений достигается вблизи концов трещины - всё это с достаточной степенью определенности указывает на то, что сигналы каждого из пары диполей связаны с излучением областей в окрестности двух концов трещины. Дополнительным подтверждением этого являлось то, что динамика пар кластеров, оцениваемая по количеству сигналов в сутки, была качественно идентичной (что свидетельствует о общем внешнем воздействии), а на интервале в час и менее существенно различалась (что говорит о отличии реакции разных источников на внешнее воздействие).

На основе анализа данных мониторинга на Камчатке мы рассмотрели три модели связи предвестника с готовящимся землетрясением (П. Варотсоса, И.П. Добровольского [1] и модель, основанную на распространении предвестника со скоростью тектонических волн [3, 4]). При этом времена предполагаемых предвестников оказались в соответствии с интервалом времени появления предвестника по профессору Варотсосу. Выбор набора землетрясений, для которых величина предвестника в точке наблюдения может быть зарегистрирована согласно теории И.П. Добровольского [1], оказался в первом приближении адекватным, а общая картина аномалий более всего соответствовала модели с распространением предвестника со скоростью тектонических волн [3, 4]. Времена предвестников и соотношения амплитуд аномалий не совпали с теорией Добровольского, это неудивительно для оценки времени предвестника, поскольку длительность краткосрочной стадии в теории И.П.Добровольского [1] определялась эмпирическими зависимостями, полученными разными методами, без учета расстояния от точки наблюдения до будущего очага. Что касается амплитуды предвестника, то в теории И.П. Добровольского она рассчитывается для долгосрочного предвестника на основе решения статической задачи и отклоненения в амплитуде для динамического краткосрочного предвестника также можно понять.

О пути использования SES для краткосрочного прогноза землетрясения

Довольно длинный отрезок ряда наблюдений в обсерватории Каримшина, любезно предоставленный мне покойным О.А. Молчановым после доработки методики позволил выделить значительное число сигналов и разделить их по источникам. При анализе данных выявилась существенно разная интенсивность излучения источников и необходимость формализовать выделение аномалии для каждого выделенного источника чтобы завершить полную формализацию всей технологии обработки и получить возможность выделения предвестниковых аномалий у источников обладающих существенно различной интенсивностью. В качестве подходящей технологии для решения этой задачи была выбрана оценка вида и параметров статистического

распределения параметров излучения каждого выделенного источника сигналов. Сначала были проанализированы распределения амплитуд и интервалов между импульсами для восьми грубо выделенных источников, каждый из которых излучил не менее сорока тысяч сигналов. Для этих источников для полной активности и активностей положительных и отрицательных импульсов отдельно были оценены законы распределения амплитуды импульсов и интервалов между импульсами, при этом сопоставлялось качество аппроксимации для более чем двадцати разных непрерывных законов распределения. При этом было получено что для всех 24 групп импульсов наиболее адекватными оказались два трех-параметровых распределения: Log-Logistic для амплитуд и Dagum для интервалов между импульсами, причем разброс параметров обоих распределений для всех 24 групп импульсов оказался небольшим На втором этапе мы решили проверить достоверность полученного результата на 16 хорошо выделенных источниках сигнала, каждый из которых излучил не менее 6 тысяч импульсов и получили в качестве наиболее адекватных те же законы распределения для амплитуды и интервала между импульсами с меньшим разбросом параметров между источниками, что подтвердило правильность выбранных законов распределения. На третьем этапе для этих источников была проведена оценка смешанных характеристик излучения (A/T, A^2/T, A^2/T^2, A/T^2) Все эти смешанные характеристики источников наиболее адекватно описывались с помощью одного трехпараметрового распределения Burr.

Результаты анализа параметров распределений косвенно подтвердили, что сигналы каждого из пары диполей связаны с излучением областей в окрестности двух концов трещины Параметры распределений амплитуд и интервалов между сигналами у таких пар кластеров часто были близки, хотя степень близости варьировалась от пары к паре. Типичным было сочетание более высокой амплитуды сигналов одного из кластеров и более высокой частоты второго кластера, хотя, присутствовал один случай, когда один источник заметно превышал второй и по амплитуде, и по частоте импульсов.

Знание законов и параметров распределения для каждого источника позволило предложить формализованный унифицированный метод выделения всплесков интенсивности по всем источникам, основываясь на величине пороговой вероятности амплитуды сигнала и интервала между сигналами. Это позволяет, задавшись величиной вероятности, сразу получить величины амплитудного и интервального порога для всех источников с полным учетом их специфики и позволяет формализовано выделять аномалию уже по одному импульсу, одному интервалу или по любой смешанной характеристике излучения. Таким образом, процедура мониторинга состоит из двух стадий на первой из которых на учебном интервале выделяются мощные источники, для каждого из которых определяются константы известных законов распределения. На второй стадии ведется контроль за каждым из этих источников на базе имеющихся законов распределения для всех параметров излучения с целью автоматического выделения аномалий.

Список литературы

1. *Добровольский И.П.* Теория подготовки тектонического землетрясения АН СССР. Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. М., 1991. 224 с.

2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ.ред. чл.-корр. РАН Клюева В.В. Т.7: В 2 кн. Кн. 1 Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустиеской эмиссии. Кн.2 Балицкий Ф.Я., Барков А.В., Баркова Н.А. и др. Вибродиагностика. М.: Машиностроение, 2005. 829 с.

3. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика с приложениями к проблемам газовых и нефтяных пластов. М.: Недра, 1996. 447с.

4. *Стахеев Ю.И.* Геохимические предвестники землетрясений // Журнал Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. 2005. Т. XLIX. № 4. С. 110–119.

5. *Черникова Т.М., Иванов В.В., Михайлова Е.А*. Спектры электромагнитного излучения отдельных трещин в ближней зоне // Ползуновский Вестник. 2011. № 3. С. 103–105.

6. *Aceves R.L., Park S.K., Strauss D.J.* Statistical evaluation of the VAN method using the historic earthquake catalog in Greece // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. No. 11. P. 1425–1428.

7. *Chirkov Ye. B.* The study of local sources of ULF geoelectric signals with steep fronts // Annals of Geophysics. 2004. Vol. 47. No. 1. P. 213–227.

8. *Trique M., Richon P., Perrier F., Avouac J. P., Sabroux J. C.* Radon emanation and electric potential variations associated with transient deformation near reservoir lakes // NATURE, Letters to Nature. 1999. Vol. 399. P. 137–141.

9. *Varotsos P., Alexopoulos K. and Nomicos K*. Seismic electric currents // Proceedings of the Academy of Athens. 1981. V. 56. P. 277–286.

УДК 550.343.6

О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ КАЖУЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Чирков Е.Б.[1], Идармачев И.Ш.[2]

[1] Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г.Москва, ye_chirkov@list.ru
[2] Институт геологии Дагестанского Научного Центра РАН, г. Махачкала, Россия

Введение

Данная работа представляет собой практический пример применения новой парадигмы краткосрочных предвестниковых исследований в основании практического применения которой лежат три простых представления. Первое из которых заключается в том, что наиболее распространённые предвестники обусловлены малыми вариациями НДС трещиноватой среды (аномалии в кажущемся сопротивлении, газовых эманациях и уровне воды -изменением емкости и проницаемости трещинного пространства; ЭМИ, акустическая эмиссия и сейсмоэлектрические сигналы (SES) вариацией излучения трещин, являющихся естественными концентраторами напряжений). Второе - в том, что аномалии краткосрочных предвестников на значительном удалении от очага возникают вследствие распространения медленной волны деформации, порожденной известной из теории ЛНТ динамической фазой, связанной с концентрацией трещин в области будущего разлома и разгрузкой внешней части консолидированной неоднородности. Третье – в том, что краткосрочные предвестниковые явления делятся на два класса по возможности использования для целей краткосрочного прогноза. К первому относятся яркие, обладающие значительной амплитудой вызванные нелинейным, зачастую необратимым откликом среды на малую вариацию НДС, связанными с уникальными особенностями локального геологического строения, наблюдающиеся редко и не обладающие повторяемостью. Ко второму малоамплитудные, вызванные линейным откликом среды на малую вариацию НДС, наблюдающиеся всегда и практически повсеместно, не вызывающие необратимых явлений и обладающие повторяемостью. К ярким краткосрочным предвестниковым явлениям относятся все предвестники, зарегистрированные в исторических хрониках и большинство известных краткосрочных предвестников, поскольку для выделения малоамплитудных предвестников требуются чувствительные и помехозащищённые методики разработать которые возможно только на основе понимания природы краткосрочного предвестника и помех. Яркие редкие краткосрочные предвестники убедительно в силу накопленного значительного количества фактов их регистрации сообщают нам о существовании вариации НДС связанной с динамической фазой разрушения неоднородности, но не могут использоваться для практического прогноза из-за редкости возникновения и отсутствия повторяемости. Малоамплитудные предвестники могут использоваться для прогноза, но требуют аккуратной разработки техники и методики измерений и обработки, что может быть реализовано только на основе понимания природы сигнала и помех.

Выбор мониторинга кажущегося сопротивления для контроля малоамплитудных вариаций НДС массива связан с ясностью физики явления [7, 9] и высокой тензочувствительностью этого параметра, подтвержденной полевыми измерениями и лабораторными экспериментами [3, 7, 12, 2].

Задача мониторинга вариаций напряженно-деформированного состояния (НДС) вблизи плотин ГЭС имеет важное практическое значение, так как любые динамические явления вблизи плотины могут иметь катастрофические последствия. Эта задача представляет также научный интерес, поскольку сезонные изменения уровня водохранилища создают значительную вариацию НДС вмещающей среды, что позволяет наблюдать реакцию среды на мощное контролируемое воздействие.

В данной работе оценивается возможность мониторинга вариаций локального НДС массива на основе анализа данных более чем трёхлетнего ряда наблюдения кажущегося сопротивления (КС) с помощью прецизионной станции «Георезистор» [1] в скважине, пробуренной для наблюдения за боковой фильтрацией воды из водохранилища в период его заполнения.

Идея данного способа измерения КС, выбор места наблюдения и его аппаратурная реализация принадлежат группе Шамиля Идармачева, Ибрагим Идармачев обеспечивал проведение мониторинга, мой вклад заключается только в идее обработки результатов измерения с привлечением некоторых дополнительных данных. Измерительная установка Венера расположена в скважине,

пробуренной для наблюдения за боковой фильтрацией воды из водохранилища в период его заполнения и находится всегда не менее чем на 40 метров ниже уровня воды в скважине. Глубина расположения её электродов от устья скважины составляет от 90 до 99 метров (A-90, M-93, N-96, B-99). Из-за высокой чувствительности геометрии трещинного пространства к внешним воздействиям, несмотря на полную водонасыщенность породы, здесь можно ожидать тензочувствительности, сравнимой с известной для туфов [12, 9, 10].

Расположение измерительной установки в водонасыщенной скважине позволяет использовать для генератора серийный 12 вольтовый источник, размещение измерительной установки на 40 метров ниже уровня воды в скважине существенно снижает влияние внешних климатических факторов и дает потенциальную возможность оценить вариации НДС в выбранной области конечного размера расположенной внутри горного массива. Использование 24 разрядного АЦП для измерения напряжения и тока и расчет среднего за сутки значения КС позволяет добиться высокой точности и надёжности оценки величины медленных вариаций КС.

Постановка задачи и подготовка данных

Как и в большинстве геофизических измерений на измеряемую величину оказывает влияние несколько факторов, из которых нас интересует только один – вариация локальной НДС.

Измеряемое кажущееся сопротивление (КС) определяется сопротивлением воды и структурой порового пространства вмещающих пород (трещиноватые известняки).

Сопротивление воды определяется её минерализацией и температурой. Минерализация воды, как показали результаты измерения электросопротивления проб воды в 2015 году, сильно меняется из-за притока вод низкой температуры и минерализации при таянии снегов. Температура воды в скважине также зависит от уровня воды в водохранилище и времени года.

Структура порового пространства подвержена влиянию вариаций локальной НДС, атмосферного давления и уровня воды в водохранилище. Локальные вариации НДС приложенные к скелету породы, при увеличении уменьшают эффективную пористость и проницаемость и увеличивают КС. Сезонные изменения уровня воды в водохранилище создают колебания давления жидкости порядка 4 атмосфер, при увеличении уровня увеличивая эффективную пористость и проницаемость и уменьшая КС. Вариации атмосферного давления при его увеличении одновременно уменьшают уровень воды в скважине и сжимают поровое пространство в результате воздействия на скелет породы распространяющегося без задержек и потерь на глубину до нескольких километров [5], приводя к увеличению величины КС за счет сложения эффектов обоих механизмов воздействия атмосферного давления. В первом приближении все эти факторы (минерализация воды изменяющая КС, атмосферное давление сжимающее скелет породы и понижающее уровень воды, давление воды, увеличивающее трещинное пространство и вариации локальной НДС) начинают оказывать влияние на КС незамедлительно [8].

В соответствии с приведенными выше представлениями и имеющимися возможностями к анализу были привлечены дополнительные данные по атмосферному давлению метеостанции Буйнакск, расположенной на расстоянии около 10 километров (с поправкой на разницу высот) [8]. Из-за значительного расстояния между точкой наблюдения и метеостанцией Буйнакск и конечной скорости движения атмосферных фронтов использованием для обработки данных метеостанции безусловно вносится некоторая погрешность в конечный результат, но это всё же лучше, чем вообще не учитывать влияние атмосферного давления. С помощью ряда методических работ были установлены зависимости между ходом уровней воды в водохранилище и двух контролируемых скважинах и получены ряды уровня и температуры воды в скважине с установкой, на основе данных по уровню воды в водохранилище и данных по температуре воды в соседней, близко расположенной скважине.

Как видно после привлечения дополнительных данных на измеряемую КС влияет два неконтролируемых нами фактора – вариации локальной НДС и вариации минерализации воды, являющиеся для нас помехой. Однако, пусть и с погрешностями, мы можем попытаться решить нашу задачу, используя то, что температура воды в скважине является индикатором притока талых вод пониженной температуры и минерализации, а зависимость сопротивления воды от температуры нам известна. Используя известную форму этой зависимости, мы решили задачу оптимизации для поиска неизвестного коэффициента (при ограничении его вариации интервалом, полученным по литературным данным), минимизируя величину коэффициента корреляции между рядами КС и температуры воды в скважине, после чего учли влияние температуры на КС с помощью полученного коэффициента. Теперь оставшаяся корреляция между рядами КС и температуры обусловлена

исключительно влиянием изменения минерализации отражающейся в изменении температуры, поскольку влияние собственно вариаций температуры на КС мы уже вычли. Таким образом, теперь вариация температуры у нас отражает только влияние вариации минерализации воды и у нас остался один не контролируемый фактор, влияющий на КС – это нужная нам вариация локальной НДС.

Однако, в наших данных присутствует ещё систематическая погрешность, связанная с вариацией модели геоэлектрического разреза в связи с сезонным изменением уровня воды на 40 метров. Упрощенно модель её влияния можно представить следующим образом. Заметим, что питающий диполь у нас расположен вертикально не менее чем на 40 метров глубже уровня воды в скважине. В этих условиях можно с некоторой погрешностью предположить, что поверхность уровня воды горизонтальна, а сопротивление всего полупространства выше этой поверхности равно сопротивлению сухих известняков, слагающих контролируемый массив (здесь мы пренебрегаем различием сопротивления сухих известняков и воздуха вдали от контакта). В этих предположениях мы имеем модель контакта для пространства и можем оценить погрешность, вызванную регистрируемым нами ходом уровня воды на 40 метров и вычесть её из измеренных данных. Что и было реализовано, также на основе решения задачи оптимизации для поиска сопротивления сухих известняков массива путем минимизации величины коэффициента корреляции между рядами КС и уровнем воды в скважине, при ограничении вариации величины сопротивления сухих известняков интервалом, полученным по литературным данным. Эта погрешность в величине КС, связанная с изменением геоэлектрической модели в связи с вариацией уровня воды, была также вычтена из измеренной величины КС. Таким образом, мы избавились от стороннего эффекта, связанного с вариацией геоэлектрической модели и приводящего к нелинейной зависимости КС от уровня воды и можем в дальнейшем считать геометрию геоэлектрической модели фиксированной.

Заметим, что суммарная относительная величина двух погрешностей (за влияние температуры воды и изменение уровня воды на КС), в максимальном за время наблюдения значении оказалась меньше 0.0007, и её малость полностью оправдывает правомочность сделанных нами допущений. Другими словами, вариация температуры воды в скважине настолько мала, что погрешность в нашей оценке по учету её влияния на КС пренебрежима, это же можно сказать и о влиянии погрешности нашего способа учета влияния изменения уровня воды на модель геоэлектрического разреза. Однако, эти оценки необходимы, так как в случае применения метода в других условиях они могут оказаться достаточно велики, а временной ход суммы этих погрешностей имеет сложный и нерегулярный характер.

Таким образом, на основе понимания геофизической ситуации мы значительно упростили задачу путем привлечения необходимых данных (уровень и температура воды в скважине, атмосферное давление) [8], снижения количества влияющих на КС факторов (устранение влияния температуры воды на КС), устранения создающих нелинейность сторонних эффектов (исключение влияний изменения модели геоэлектрического разреза вследствие вариаций уровня воды в скважине).

Применяемый метод и анализ полученных результатов во временной области

В такой постановке мы можем попытаться решить эту задачу в линейном приближении без учета временных сдвигов, поскольку у нас есть измеряемая величина КС, контролируются три фактора, оказывающие на неё влияние (вариации уровня воды, атмосферного давления и минерализации оцениваемой по температуре) и неизвестен лишь один фактор, который нам и нужно отслеживать (вариация локальной НДС). Для решения данной задачи использовался метод главных компонент [11]. В методе главных компонент последовательно ищут независимые факторы (линейные комбинации измеряемых величин), объясняющие максимальную часть оставшейся дисперсии. Метод главных компонент (МГК) обычно применяется при работе с недостаточно понимаемыми проблемами для сокращения размерности исходных данных. В данном случае нас будет интересовать формализованное разделение полной дисперсии исходных данных на независимые компоненты для попытки выделения влияния неизвестных нам вариаций локальной НДС. Для оценки достоверности полученных результатов исходный ряд был разбит на две половины и МГК был применен независимо к двум половинам интервала наблюдений и всему интервалу в целом. Во всех трех случаях были получены практически идентичные результаты, что свидетельствовало о их устойчивости и надежности.

В результате применения МГК, было выделено четыре главных фактора, описывающих 100% дисперсии использованных данных.

Первая компонента, описывающая около 62% процентов общей дисперсии исходных данных, обусловленная вариацией уровня воды включает 85% дисперсии уровня воды в скважине и

обеспечивает 80% дисперсии кажущегося сопротивления и 78% дисперсии минерализации воды. При этом КС уменьшается КС сильнее, чем его увеличивает уменьшение минерализации.

Вторая компонента, описывающая около 26% процентов общей дисперсии данных, обусловленная вариацией атмосферного давления включает 95% дисперсии атмосферного давления и обеспечивает п 4% дисперсии КС и по 2% дисперсий уровня и минерализации воды.

Третья компонента, описывающая около 8% общей дисперсии, обусловленная вариацией минерализации воды включает 19% дисперсии минерализации воды и обеспечивает 9% дисперсии КС, около 2% дисперсии атмосферного давления и около 1% дисперсии уровня воды.

Четвертая компонента, описывающая около 5% общей дисперсии данных, содержала 12% дисперсии уровня воды и 7% дисперсии КС и около 1% дисперсии минерализации воды. В четвертой компоненте влияние неизвестного фактора, по нашему мнению, вариации НДС приводит к увеличению сопротивления, несмотря на увеличение уровня воды, до сих пор считавшегося фактором, оказывающим на КС наиболее сильное влияние.

Для проверки адекватности данного предположения во временной области было проведено формализованое сопоставления выделенных аномалий четвертой компоненты, с рядом землетрясений, создающих в точке наблюдения по теории Добровольского [6] относительные деформации больше 5E-8 и было выявлены 3 аномалии предваряющих 3 землетрясения из 4 создающих наибольшие деформации в точке наблюдения и аномалия после четвертого землетрясения, наиболее слабого. Проверка данного результата с помощью метода множественной регрессии, когда анализировалась величина квадрата невязки аппроксимации ряда КС с помощью рядов данных по атмосферному давлению, уровню и температуре воды в скважине показал сходную картину аномальных проявлений. Формализация выделения аномалий в обоих случаях заключалась в том, что уровни порога выделения аномального сигнала на обоих рисунках были получены на основе определения законов распределения контролируемых параметров и выбора порога с вероятностью его превышения в 5% (p-value=0.05).

Резюмируя можно заключить о том, что временная динамика выделенной четвёртой компоненты достаточно убедительно подтверждается картиной рассчитанных на основе теории Добровольского деформаций в пункте наблюдений от местных землетрясений за время наблюдения.

Анализ измеренных величин и выделенных компонент в частотной области

Для проверки адекватности выделенных компонент в частотной области был проведен спектральный анализ рядов, измеренных данных и выделенных компонент. Сначала для оценки адекватности разложения на компоненты были сопоставлены суммы амплитуд выделенных пиков в измеренных данных и выделенных компонентах соответственно, которые совпали с погрешностью порядка 0.1%. Затем было проведено сопоставление спектральных пиков в измеренных величинах и выделенных компонентах в результате которого было обнаружено что в выделенных компонентах пропали некоторые имеющиеся в измеренных величинах спектральные пики и наоборот появились спектральные пики, отсутствующие в измеренных величинах.

Эти особенности спектрального состава выделенных с помощью МГК компонент вызвали необходимость дополнительной проверки реальности спектральных пиков компонент выделенных с помощью МГК За неимением лучшего нами был использован спектр ряда измерений атмосферного давления, измеряемого ежедневно на высокогорной станции Юнгфрауйох в течение двадцати четырёх лет [4]. Если, учитывая то, что наш интервал наблюдения был меньше четырех лет и изобиловал пропусками, принять идентичными близкие спектральные компоненты, выделенные на станции Юнгфрауйох с периодами в сутках (1102, 659, 415, 621, 265,191, 154, 128,110) и в нашем эксперименте (1082, 649, 406, 324, 271, 191, 155, 130, 108), то получим довольно неплохое совпадение обоих спектров. При этом в обоих спектрах присутствовали периоды 406, 271, 1082, 649, 130, 155, 250, 125, 191.

Если учесть, что из данных на станции Юнгфрауйох были предварительно отфильтрованы годовые и полугодовые периоды, то получим, что в нашем эксперименте не зарегистрирована только одна частота с периодом 324. В тоже время в нашем эксперименте были дополнительно выделены частоты со следующими периодами 1625, 812, 541, 231, 216, что неудивительно, так как мы измеряли не только атмосферное давление. Еще пара частот с периодами 108 и 310 была получена методами множественной регрессии.

Картина выделенных в эксперименте частот приобретет рельефность и большую достоверность если учесть, что полученные частоты делятся на несколько серий с кратными периодами (1623, 812, 541, 406, 324, 271, 231), (1082, 541, 361, 180), (649, 324, 216, , 130, 108), (310,

155), 250, 125), откуда видно, что незарегистрированная нами частота с периодом 324= 1623:5= 649:2, то есть принадлежит к сериям в которых мы зарегистрировали предыдущие и последующие члены.

Обратимся теперь к анализу частот, имевшихся в измеренных величинах и пропавших в полученных компонентах. Это частоты с периодами 649 и 216, заметим, что они принадлежат к одной серии (649, 324,216, , 130, 108) к которой принадлежит отсутствующая у нас частота с периодом 324, причем если 649 имеется в записях на станции Юнгфрауйох, то 216 имеется только в спектре измеренной минерализации.

Наконец рассмотрим частоты, отсутствующие в измеренных величинах и появившиеся в спектре вычисленных с помощью МГК компонент. Это частоты с периодами (812, 406, 130, 155, 125). Заметим, что все они за исключением 155 принадлежат к сериям, члены которых были зарегистрированы в измеренных величинах. Частоты с периодами (406, 130, 155, 125) были также независимо выделены в наблюдениях на станции Юнгфрауйох.

Учитывая высокоточный баланс сумарной мощности спектральных пиков, выделенных на измеренных величинах и вычисленных с помощью МГК компонентах, почти полное выделение новых компонент в мониторинге на высокогорной станции Юнгфрауйох и принадлежность новых компонент сериям с кратными периодами можно заключить о достоверности спектров новых компонент выделенных с помощью МГК.

Заключение

В итоге можно заключить, что на основе применения МГК к обработке КС в водонасыщенной скважине, уровня и температуры воды и атмосферного давления были получены предвестниковые аномалии для трех землетрясений, создающих в пункте наблюдения максимальные деформации по теории И.П. Добровольского. Анализ результатов работы метода в частотной области показал выделение новых спектральных компонент, первоначально отсутствующих в измеренных данных, достоверность которых подтверждена сторонними результатами. Поскольку этот результат удалось получить несмотря на относительно короткий ряд наблюдений с пропусками, оценку минерализации воды на основе данных о её температуре и использование данных о атмосферном давлении со станции Буйнакск, расположенной на расстоянии около десяти километров от пункта наблюдения, это свидетельствует о высокой перспективности метода как для контроля локальных вариаций НДС, так и для краткосрочного прогноза землетрясений.

Список литературы

1. *Абдулаев Ш. О., Алиев М.М., Идармачев Ш.Г.* Некоторые результаты исследования деформации горных пород станцией «Георезистор» // Вестник Дагестанского Научного Центра РАН. 2008. № 30. С. 16–21.

2. *Авагимов А.А.* Динамика электромагнитных процессов в Копетдагском сейсмоактивном регионе: Автореферат. дис. д-ра физ.-мат. наук. М., 1991. 52 с.

3. *Барсуков О.М.* О связи электрического сопротивления горных пород с тектоническими процессами // Физика Земли. 1970. № 1. С. 84–89.

4. *Богданов М.Б., Федоренко А.В.* Периодические изменения атмосферного давления, вызванные влиянием космических факторов // Географические исследования в Саратовском государственном университете. Сб. науч. тр. Саратов: СГУ, 2009. С. 15-19.

5. *Волейшо В.О.* Формирование гидрогеодинамического режима под воздействием региональных внешних нагрузок на водоносный горизонт: Автореферат дис. д-ра геол.-мин наук. М., 1993. 50 с.

6. *Добровольский И.П.* Теория подготовки тектонического землетрясения АН СССР. Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. М., 1991. 224 с.

7. *Челидзе Т.Л.* Об аномально высокой тензочувствительности электропроводимости неоднородных сред // ЖЭТФ. 1984. 2. С. 635–641.

8. *Чирков Е.Б., Идармачев И.Ш.* О возможности мониторинга вариаций локальной НДС на основе наблюдений кажущегося электрического сопротивления в водонасыщенной скважине // Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием ТРИГГЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГЕОСИСТЕМАХ. Москва, 2017. С. 477–482.

9. *Chelidze T.L., Gueguen Y.* Electrical spectroscopy of porous rocks: A review—I. Theoretical models // Geophysical Journal International. Vol. 137. No 1. P. 1–15.

10. *Chelidze T.L., Gueguen Y., Ruffet C.* Electrical spectroscopy of porous rocks: a review—II. Experimental results and interpretation // Geophysical Journal International. Vol. 137. No 1. P. 16–34.

11. *Jolliffe, I. T.* Principal component analysis, 2nd ed. Springer, 2002. 518 p.

12. *Morrow C., Brace W.F.* Electrical resistivity changes in tuffs due to stress // J. Geophys. Res. 1981. Vol. 86. No 4. P. 2929–2934.

УДК 550.349

ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПОДВОДНЫХ СКЛОНОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Шарафиев З.З.

Институт динамики геосфер им. М.А.Садовского РАН., г. Москва, Россия,
zulfatsharafiev@yandex.ru

Введение

Надводные и подводные склоновые процессы давно привлекают интерес исследователей как геологическое явление и как геомеханический процесс. Определяющую роль, как в надводных, так и в подводных склоновых явлениях, играют сила тяжести и силы сопротивления сдвигу. Если действие силы тяжести определяется исключительно рельефом местности, то силы фрикционного и вязкого сопротивления зависят от множества факторов.

Сведения о параметрах колебаний, инициирующих оползни, довольно скудны и отрывочны, особенно для подводных событий.Абсолютное большинство исследований, посвященных оценке возможности возникновения склоновых явлений при сейсмических событиях, анализируют сведения о предельных расстояниях от эпицентра землетрясения соответствующей магнитуды, при которых наблюдались оползни. Базовая работа, с которой сравнивают почти все последующие результаты - [2].

Исследования начальной стадии смещения участков склона, методику проведения лабораторного исследования устойчивости, установки, с помощью которых проводились лабораторные исследования, мы подробно описали в работе [1]. Ввиду слабой изученности подводных оползней в настоящей работе выполнено лабораторное исследование механики инициирования подводного склона динамическим импульсом для определения критических параметров воздействия.

Эксперименты с инициированием подводных оползней

Обобщение результатов всех экспериментов выполнялось в виде диаграмм *PGV-PGA*, на которые наносились параметры воздействия в конкретном опыте, где:

PGA – peakgroundacceleration (максимальное пиковое ускорение);

PGV – peakgroundvelocity (максимальная пиковая скорость).

Для исследования процесса инициирования динамическим импульсом оползней на подводных склонах, проводились эксперименты на вертикальной ударной установке (ВУУ), заполненной водой. Результаты этих серий представлены на рисунке 1 и в таблице 1. Были проведены серии опытов со склоном, сложенным из кварцевого песка, смеси песка с 5% глины и с жестким блоком.

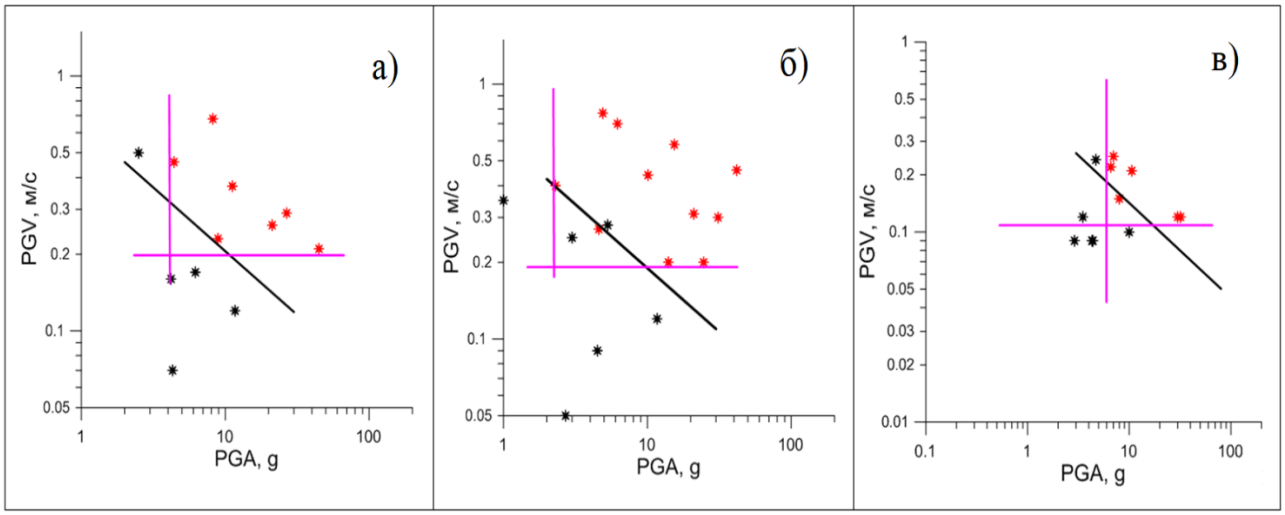


Рис. 1. Диаграммы *PGV-PGA* для опытов с подводными склонами на ВУУ: а – смесь кварцевого песка с 5% глины; б – кварцевый песок; в – блок на песчано-цементной поверхности.

Таблица 1. Критические параметры воздействия для опытов с подводными склонами на ВУУ

Угол, α°/ геоматериал	**Уравнение разделяющей линии**	***FS***	a_{cz}, **g**	PGV_{min} **м/с**	PGA_{min}, **g**	***N*, кол-во опытов**
35/песок с глиной	PGV=0.65 $PGA^{-0.5}$	1.08	0.5	0.2	3.5	12
40/ песок	PGV=0.55 $PGA^{-0.5}$	1.06	0.25	0.2	2.3	17
20/ Блок на песчано-цементной поверхности	PGV=0.45 $PGA^{-0.5}$	1.06*	-	0.1	4.7	10

Для обводненной смеси песка с глиной принимались следующие значения параметров: *FS* рассчитано при *C*=0.7 кПа, φ=30º. Предполагалась полная обводненность грунта.

Для обводненного кварцевого песка принимались значения *C*=0.8 кПа, φ=32º. Также предполагалась полная обводненность грунта.

Для блока на песчано-цементной поверхности C=0.075 кПа, φ=26º.

Основываясь на результаты, полученные при проведении экспериментов на ВУУ, были выполнены серии опытов с подводными склонами, потенциально способными сформировать оползень, на горизонтальной ударной установке (ГУУ). Результаты представлены на рис.2 и таблице 2.

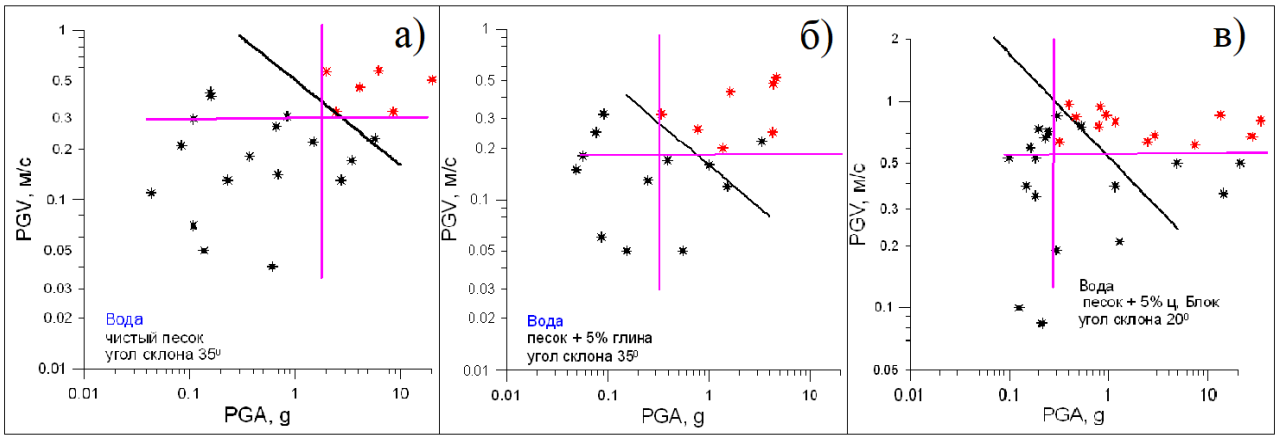


Рис. 2. Диаграммы *PGV-PGA* для опытов с подводными склонами на ГУУ: а – кварцевый песок; б – смесь кварцевого песка с 5% глины; в – блок на песчано-цементной поверхности.

Таблица 2. Критические параметры воздействия для опытов с подводными склонами на ГУУ

Угол, α°	**Уравнение разделяющей линии**	***FS***	a_{cx}, **g**	PGV_{min} **м/с**	PGA_{min}, **g**	***N*, кол-во опытов**
Подводные склоны: песок+5% глины C=0.7 кПа $\varphi_{тр}$=30º чистый песок *C*=0.8 кПа; $\varphi_{тр}$=32º						
35 /глина / вода	PGV=0.16 $PGA^{-0.5}$	1.08	0.04	0.18	0.7	19
35 / песок/ вода	PGV=0.51 $PGA^{-0.5}$	1.02	0.01	0.3	1.8	23
20/вода	PGV=0.54 $PGA^{-0.5}$	1.14	0.04	0.55	0.25	1.14

Диаграммы PGV-PGA для подводных склонов (при угле склона 35º) из песка с глиной в опытах с вертикальным воздействием показывают, что минимальное значение PGA, при котором начинает возникать оползень, равно 3.5g, при значении PGV, равным 0.2 м/с. В опытах с горизонтальным воздействием уровень воздействия на склон, требуемый для инициирования оползня, оказался существенно ниже (PGA в 5 раз меньше). При этом значение PGVсущественно не поменялось.

Базовым для изучения склоновых явлений является метод Ньюмарка [3], который моделирует сейсмически вызванный оползень как консолидированный фрикционный блок на наклонной плоскости, который подвергается тем же ускорениям, что и моделируемый склон. Исходя из этого, были проведены лабораторные эксперименты, направленные на исследование особенностей инициирования скольжения. Наблюдается аналогичная картина. Оказалось, что при горизонтальном воздействии на склон инициирование скольжения блока происходит при гораздо меньших значениях PGA, тогда как значение PGV оказалось в несколько раз больше.

Возникает дополнительная трудность при изучении инициирования скольжения блока, так как при движении блока относительно воды со скоростью ~5 см/с, на блок действует дополнительное сдвиговое сопротивление ~5 Па; при скорости ~10 см/с, дополнительное сопротивление составляет уже величину около 20 Па. Поскольку эти величины составляют заметную долю от коэффициента сцепления, относительная устойчивость блока увеличивается в процессе разгона, что стабилизирует его положение и не позволяет набрать необходимое для устойчивого скольжения «критическое перемещение».

Заключение

Эффект вертикального воздействия на склон существенно слабее, чем эффект горизонтального воздействия для подводного склона.

Наличие воды резко снижает запас устойчивости склона. Главным образом это происходит из-за действия архимедовой выталкивающей силы.

Во многих случаях инициирование сопровождается задержкой во времени в несколько секунд, либо начало движения оказывается довольно медленным, но затем материал постепенно разгоняется.

Установлены критические значения параметров динамических воздействий на модельные подводные склоны. Показано, что существуют минимальные величины *PGA* и *PGV*, при которых наблюдаются необратимые деформации склона. Если ускорение ниже минимального значения PGA_{min}, то значимых необратимых деформаций не наблюдается при любых значениях *PGV*. Значение минимального пикового ускорения, при котором наблюдалось образование оползня, по крайней мере в несколько превышает величину критического ускорения, рассчитанную на основе статического коэффициента устойчивости *FS*.

Список литературы

1. *Кочарян Г.Г., Беседина А.Н., Кишкина С.Б., Павлов Д.В., Шарафиев З.З, Каменев П.А.* Инициирование обрушения склона сейсмическими колебаниями от разных источников // Физика Земли. 2021. № 5. С. 41–54. https://doi.org/10.31857/S0002333721050112.

2. *Keefer D.K.* Landslides caused by earthquakes // Geological Society of America Bulletin. 1984. V. 95. No. 4. P. 406–421.https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95<406:LCBE>2.0.CO;2.

3. *Newmark N.M.* Effects of Earthquakes on Dams and Embankments // Géotechnique. 1965. V. 15. No. 2. P. 139–160.

Сейсмичность, сейсмическая опасность

УДК 550.34

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И СЕЙСМИЧЕСКОЕ МИКРОРАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ОСНОВНЫХ СООРУЖЕНИЙ УСТЬ-СРЕДНЕКАНСКОЙ ГЭС

Алёшина Е.И., Атрохин В.В, Карпенко Л.И., Куркин С.В., Габдарахманова Ю.В.

Магаданский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Магадан, Kurs@memsd.ru

Введение

Территория Магаданской области является сейсмически активным регионом [4, 3, 2], что требует оценки сейсмической опасности площадок, на которых возводятся объекты повышенной ответственности. К одному из таких объектов относится Усть-Среднеканская ГЭС имени А.Ф. Дьякова, входящая в Колымский каскад ГЭС.

С учетом новых геолого-геофизических и сейсмологических материалов для района Усть-Среднеканской ГЭС проведено детальное сейсмическое районирование (ДСР) и сейсмическое микрорайонирование (СМР). Исходными материалами ДСР являлись тектонические схемы Магаданской области [5], данные сейсмологического мониторинга проводимого Магаданским филиалом ФИЦ ЕГС РАН, каталоги землетрясений, научные отчеты и публикации о сейсмичности Северо-Востока России.

Исследования сейсмичности в районе Усть-Среднеканской ГЭС проводились в 1991 г. [9, 10] и в 2008 г. [12]. По нормативной карте ОСР-2016 район основных сооружений Усть-Среднеканской ГЭС расположен в 8-ми и 9-ти балльных зонах расчетной сейсмической интенсивности [16].

За весь период наблюдений сотрясения на исследуемой территории не превышали 5 баллов, что существенно ниже, чем указано на картах ОСР–2016 [16].

Основные сведения о сейсмотектонике района исследований

Район Усть-Среднеканской ГЭС располагается в юго-восточной части Верхояно-Колымской складчатой системы, протягивающейся от побережья Северного Ледовитого океана до Охотского моря. Особенностью складчатой системы являются зоны концентрации линейных структур преимущественно северо-западного простирания. В пределах Верхояно-Колымской складчатой зоны располагается сейсмический пояс Черского, землетрясения которого представляют основную опасность для сооружений Усть-Среднеканской ГЭС.

По геолого-геофизическим данным рассматриваемый район приурочен к системе поперечных, по отношению к генеральному простиранию пояса Черского разломов, образующих системы субпараллельных зон дизъюнктивных нарушений [3, 5, 14,]. Стратифицированные образования района исследований представлены морскими терригенными, отчасти вулканогенными и вулканогенно-осадочными отложениями верхней перми, триаса и нижней-средней юры Верхоянского комплекса [12]. В результате регионального метаморфизма породы преобразованы в роговики. Роговики разбиты субвертикальными (70–80°) магистральными трещинами, имеющими преимущественно субширотное простирание.

За период инструментальных наблюдений (1968–2020 гг.) в районе ГЭС зарегистрировано более 800 сейсмических событий с энергетическим классом $K_P \leq 13.7$. Гипоцентры землетрясений расположены в пределах земной коры на глубинах $h \leq 33$ *км*. Большинство событий, в том числе и самые сильные, сконцентрированы в диапазоне глубин 5–14 *км*. Максимальный макросейсмический эффект 5 баллов по шкале MSK-64 [6] наблюдался при трех землетрясениях: Эльгенском в 1974 г. ($M = 5.1$, эпицентральное расстояние $\Delta = 107$ *км*), Купкинском в 1981 г. ($M = 6$, $\Delta = 97$ *км*) и землетрясении 1992 г. ($Ms = 5$, $\Delta = 97$ *км*). Наклон графика повторяемости для района Усть-Среднеканской ГЭС по магнитуде M_S равен $\gamma = 0.7508$, что на 0.1292 ниже значения ($\gamma = 0.88$), полученного в предыдущих исследованиях для Магаданской области (Лутиков, 2019).

Методика проведенных работ

Комплекс работ по ДСР включал анализ и актуализация материалов сейсмологических изысканий прошлых лет; анализ сейсмотектоники [5]; выделение зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ); определение местоположения очагов потенциально возможных максимальных землетрясений (ПВМЗ) с оценкой балльности на рассматриваемом объекте [7, 20].

Комплекс работ по СМР осуществлялся в соответствии с действующими нормативными документами на строительство в сейсмически опасных районах [15, 11]. На участках, характеризующихся различными инженерно-геологическими условиями грунтов верхней части разреза (ВЧР), использовался метод сейсмических жесткостей и метод регистрации землетрясений и взрывов. Расчетным путем получены приращения балльности и интенсивность сейсмического воздействия.

Детальное сейсмическое районирование (ДСР) Изучена сейсмотектоника территории в радиусе около 100 *км* от объекта. Выделено 5 разломов, генерирующих землетрясения. Определено местоположение потенциальных очагов землетрясений (З-1–З-5), от которых сейсмический эффект на площадках Усть-Среднеканской ГЭС может оказаться максимальным. При этом, изучалась не общая длина разлома, а только эффективная его часть, равная максимальной длине активного сегмента (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики сейсмогенных разломов

Название разлома и код потенциально возможного максимального землетрясения (ПВМЗ)	Длина, км	Глубина очага максимального землетрясения, *км*	Минимальное расстояние от сооружений УСГЭС до очага, км	Максимальная расчетная магнитуда по длине разлома	Максимальная расчетная интенсивность сотрясений на площадке, балл , (по графе 5)	Расчетная магнитуда ПВМЗ, период повторяемости по ОСР-2016 −	
						500 лет, карта А 8 баллов	1000 лет, карта В и С 9 баллов
1	2	3	4	5	6	7	8
Правооротуканский (З-1)	158	6	17	7.6*	10.0*	6.3	6.9
Улахан *средний сегмент* (З-2)	67	6	27	7.1	8.6	6.7	7.4
Улахан (З-3) *северо-западный сегмент*	260	13	35	7.9*	9.4*	7.0	7.7
Улахан (З-4) *юго-восточный сегмент*	70	5	43	7.1	7.9	7.2	7.8**
Безымянный *скрытый разлом фундамента* (З-5)	~110	46	67	7.4	7.4	7.8**	8.4**

Примечание: * в графах 5, 6 отмечены случаи, когда максимальная расчетная магнитуда значительно выше, чем в карте ОСР-2016-С, повторяемость землетрясений с такой магнитудой реже, чем 1 раз в 5 000 лет; **в графах 7, 8 отмечены числа в случаях, когда максимальная расчетная магнитуда при ПВМЗ значительно меньше, чем по картам ОСР-2016.

При расчете максимальной магнитуды ПВМЗ (графа 5 табл. 1) применяли формулу [20]:

$$M = 4.33+1.49\cdot\lg(RLD), \quad (1)$$

где M – магнитуда землетрясения; RLD – подповерхностная длина разрыва сбросо-сдвигового разлома континентальной коры в километрах.

Оценка максимальной расчетной интенсивности сотрясений на площадке строительства проведена по формуле Н.В. Шебалина [7]:

$$I_0 = 1.5M - 3.5\cdot\lg\sqrt{h^2+\Delta^2}+3, \quad (2)$$

где I_0 – расчетная интенсивность сотрясения в эпицентре; M – магнитуда землетрясения, h – глубина очага землетрясения; Δ – эпицентральное расстояние.

Для прогнозного анализа сейсмической опасности в районе сооружений Усть-Среднеканской ГЭС определено положение зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ). При этом рассмотрен

вариант выделения зон ВОЗ, в котором очаги землетрясений генетически связаны с активными тектоническими разломами. Для этого используем схему тектонического районирования Колымо-Охотского водораздела масштаба 1:1 00 000 [5] с эпицентрами инструментально зарегистрированных землетрясений (табл. 2).

Таблица 2. Зоны ВОЗ

Название зоны ВОЗ	Протяженность продольной и поперечной осей, *км*	Число событий в зоне с $K_P \geq 10$	Максимальное землетрясение по каталогу	Глубина очага, *км*	Тип подвижки в очаге	Расстояние от эпицентра до сооружений ГЭС, *км*	Расчетная интенсивность сотрясений в районе ГЭС, балл
1	2	3	4	5	6	7	8
Улаханская	140×25	14	Эльгенское 19.06.1974 K_P=13.0, M=5.1	13	сдвиг	107	3.5
Улаханская 2	68×10	нет	26.09.1990 K_P =8.9, M=3.0	6	не определялся	30	2.3
Улахан-Купкинская	95×25	23	13.09.1992 K_P =13.7, M=5.0	5	сбросо-сдвиг	97	3.5
Купкинская	145×40	13	Купкинское 08.11.1981 K_P =13.3, M=6.0	46	левосторонний сбросо-сдвиг	97	4.9
Право-оротуканская	158×10	нет	25.03.1975 K_P =9.5, M=3.3	6	не определялся	20	3.3

Согласно механизмам очагов сильнейших землетрясений современные типы подвижек по разломам – сдвиги, надвиги, сбросы и взбросы. Близ эпицентров землетрясений преобладают субвертикальные смещения.

Выводы по ДСР. Наиболее опасные для сооружений Усть-Среднеканской ГЭС очаги ПВМЗ – землетрясения с условными названиями З-1 и З-3, которые могут быть приурочены к Правооротуканскому разлому и северо-западному сегменту разлома Улахан соответственно. Эти разломы за весь период наблюдений были сейсмически не активны.

Вероятность возникновения таких событий – вне карты ОСР-2016-С, т.е. его повторяемость реже, чем 1 раз в 5000 лет (< 0.5%). Максимальная магнитуда ПВМЗ З-3, рассчитанная по длине северо-западного сегмента разлома Улахан, $M = 7.9$. При этом максимальная расчетная интенсивность на площадке сооружений Усть-Среднеканской ГЭС составит 9.4 балла при эпицентральном расстоянии 35 *км*. Это вполне объяснимо, т.к. по карте ОСР-2016-С вблизи сооружений ГЭС расположена зона с интенсивностью сотрясений > 9 баллов. По результатам ДСР исходную сейсмичность района сооружений Усть-Среднеканской ГЭС следует принять по карте ОСР-2016-А – 8 баллов, по карте ОСР-2016-В – 9 баллов и ОСР-2016-С – 9.4 балла. При вероятностном анализе сейсмической опасности рассматривались самые неблагоприятные условия.

Полученные результаты ДСР явились исходными оценками сейсмических воздействий при проведении СМР.

Сейсмическое микрорайонирование (СМР). Основой СМР являются свойства грунтов верхней части разреза, на которых построены сооружения [15, 11]. Для оценки приращений сейсмической интенсивности на участках основных сооружений Усть-Среднеканской ГЭС применялся метод сейсмических жесткостей и метод регистрации землетрясений.

В качестве эталонного выбран участок выхода скальных грунтов, в месте установки сейсмостанции UGES3. Методом сейсмического профилирования по ближайшему (370 м) к станции UGES3 профилю №6 нами установлена скорость продольных волн V_P =2.586 км/с и поперечных волн V_S =1.549 км/с.

На участке основных сооружений Усть-Среднеканской ГЭС распространены породы юрской ситемы верхнебюченской подсвиты ($J_{1\text{-}2}bč_3$) переслаивающихся глинистых алевролитов и аргиллитов с редкими прослоями песчаников, туфопесчаников, туфоалевролитов, известковистых песчаников $\rho_{ср}$=2.68 г/см³ и моржовской свиты (J_2mr) алевролитов, аргиллитов, песчаников $\rho_{ср}$=2.66 г/см³. На крепость пород повлияли процессы контактово-регионального метаморфизма, явных контрастов плотностей в строении участка не наблюдается (Егоров и др., 2004).

Таким образом, грунты района основных сооружений Усть-Среднеканской ГЭС относятся к I категории по сейсмическим свойствам. Величина исходной сейсмичности здесь уменьшается на 1 балл, в соответствии с табл. 1 СНиП II-7-81. С учётом данных обоснований, и результатов ДСР (глава 2 настоящего отчёта) исходная сейсмичность на эталонном участке (станция UGES3) принимается: **7** баллов при периоде повторяемости 500 лет (карта А), **8** баллов при периоде повторяемости 1 000 лет (карта В) и **8.4** балла при периоде повторяемости 5 000 лет (карта С).

В настоящее время покров рыхлых пород на участке основных сооружений нарушен, а под основанием плотины, машинного зала и водопропускных сооружений удален. Их отсутствие позволяет не рассматривать характеристики рыхлых отложений участка Усть-Среднеканской ГЭС.

Для определения приращения балльности по методу сейсмологической регистрации землетрясений применено соотношение [11]:

$$\Delta I = 3.3 \lg \frac{A_i^{\max}}{A_э^{\max}}, \quad (3)$$

где ΔI – приращение сейсмической интенсивности (в баллах); A_i – максимальная амплитуда колебаний на исследуемом участке; $A_э$ – максимальная амплитуда колебаний на эталонном участке.

Приращение сейсмической интенсивности ГЭС по методу сейсмических жесткостей за счет различия грунтовых условий ΔI определялось по формуле [11]:

$$\Delta I = 1.67 \cdot \lg \frac{\overline{V(P,S)}_э \cdot \overline{\rho}}{\overline{V(P,S)}_i \cdot \overline{\rho}}, \quad (4)$$

где $V(P,S)_э$ и $V(P,S)_i$ – средневзвешенные значения скоростей распространения продольных или поперечных волн на эталонном и исследуемом участках; ρ –плотность грунтов.

Расчетным путем получены приращения балльности и интенсивность сейсмического воздействия (табл. 3).

Таблица 3. Сводная таблица результатов определения приращения балльности методами регистрации землетрясений и сейсмических жесткостей основных сооружений Усть-Среднеканской ГЭС

Название объекта	Метод регистрации землетрясений		Метод сейсмических жесткостей		Рассчитанная интенсивность *I* по картам ОСР-2016		
	Станция	Приращение балльности ΔI	№ профиля	Приращение балльности ΔI	7 баллов 500 лет	8 баллов 1000 лет	8.4 балла 5000 лет
Пункт ЛСС "Створ"	UGES1	0.4	№1	0.47	7.5	8.5	8.9
Левобережная часть грунтовой плотины (центр)	UGES4	0.13	№2	0.5	7.5	8.5	9.0
Технологическая площадка	UGES2	0.14	№3	0.4	7.4	8.4	8.8
Здания хозблоков и проходной, водоотводящий канал		–	№4	0.17	7.2	8.2	8.6
Приплотинное здание ГЭС и станционная бетонная плотина	UGES3	эталон		–	7.0	8.0	8.4
Левобережная часть грунтовой плотины (восток)	–	–	№5	эталон	7.0	8.0	8.4
Порталы ЛЭП, здание эксплуатационных служб	–	–	№6	0.29	7.3	8.3	8.7

Выводы по СМР. Наиболее опасной в сейсмическом отношении является площадка Левобережной части грунтовой плотины (центр), где при периоде повторяемости 5000 лет (по карте ОСР-2016-С) интенсивность сотрясений может составить 9 баллов. На других объектах исследований по результатам СМР расчетная интенсивность составит: при периоде повторяемости 500 лет (карта

ОСР-2016-А) 7–7.5 балла; при периоде повторяемости 1000 лет (карта ОСР-2016-В) 8–8.5 балла; при периоде повторяемости 500 лет (карта ОСР-2016-А) 8.4–8.9 балла.

Заключение

Таким образом, исходную сейсмичность района сооружений Усть-Среднеканской ГЭС для грунтов первой категории следует принять по карте ОСР-2016-А – 7 баллов, по карте ОСР-2016-В – 8 баллов и ОСР-2016-С – 8.4 балла.

Степень сейсмической опасности площадок строительства основных сооружений Усть-Среднеканской ГЭС на момент исследования грунтовых условий составит 7–7.5 балла по карте ОСР-2016-А; 8–8,5 балла по карте ОСР-2016-В; 8.4–9.0 балла по карте ОСР-2016-С.

Список литературы

1. *Алёшина Е.И., Годзиковская А.А., Гунбина Л.В., Коломиец М.В., Седов Б.М.* Сводный каталог землетрясений Северо-Востока России с древнейших времен по 1974. Обнинск, Магадан: ГС РАН, 2015. 152 с.

2. *Алёшина Е.И., Карпенко Л.И., Седов Б.М.* Положение и основные параметры зон роев и афтершоков в сейсмических поясах Северо-Востока России // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции 18-20 апреля 2018. Якутск. 2018. Том 2. С. 12–15.

3. *Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.* Сейсмотектоника Якутии. М.: ГЕОС, 2000. 227 с.

4. *Козьмин Б.М.* Сейсмические пояса Якутии и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1984. 125с.

5. *Кузнецов В.М.* Схема тектонического районирования Охотско-Колымского водораздела. Масштаб 1:1 000 000. ФГУП «Магадангеология», 2001.

6. *Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В*. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с.

7. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под общей редакцией Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. М.: Наука, 1977. 535 с.

8. Отчет о прогнозно-поисковых работах на золото на Оротуканской площади в 2001-2004 гг. (Оротуканская ПППП). // Авт. Егоров В.Н. «Магадангеология», 2004.

9. Оценка сейсмической опасности района строящейся Усть-Среднеканской ГЭС (оценка сейсмических условий). Магадан: Фонды СВКНИИ, 1991.

10. Проведение исследований по глубинному строению и геодинамике района Усть-Среднеканской ГЭС для детального сейсмического районирования. Магадан: Фонды СВКНИИ, 1991.

11. РСН 65-87. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. М.: Госстрой РСФСР, 1988. 8 с.

12. *Седов Б.М., Гунбина Л.В., Курткин С.В. и др*. Уточнение исходной сейсмичности района, сейсмическое микрорайонирование и определение параметров расчетных сейсмических воздействий участка основных сооружений Усть-Среднеканской ГЭС. Магадан: МФ ГС РАН, 2008. С. 157.

13. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР // Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1979. 190 с.

14. Сейсмотектоника северо-восточного сектора Российской Арктики / отв. ред. Л.П. Имаева, И.И. Колодезников; Ин-т земной коры СО РАН, Ин-т геол. алмаза и благородных металлов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 134 с.

15. СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах». М.: Госстрой РСФСР, 1982. 46 с.

16. *Уломов В.И., М.И. Богданов*. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской федерации – ОСР-2016. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населённых пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 2016.

17. *Югова Р.С., Ефремова Л.В., Гунбина Л.В.* Землетрясения Северо-Востока // Землетрясения Северной Евразии в 1992 году. Москва: Геоинформмарк, 1997. С. 101–105.

18. Global Centroid Moment Tensor Project: on-line Bull., URL: http://www.globalcmt.org

19. International Seismological Centre**,** On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2013. URL: http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/.

20. *Wells D.L., and Coppersmith K.J., 1994*. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 84. P. 974–1002.

УДК 550.343.6

ЗАКОН ПРОДУКТИВНОСТИ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Баранов С.В. [1]***, Шебалин П.Н.*** [2]***, Моторин А.Ю.*** [1,3]

[1]*Кольский Филиал ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Единая Геофизическая служба РАН», г. Апатиты, e-mail: bars.vl@gmail.com*
[2]*ФГБУН Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*
[3]*Кировский филиала АО «Апатит», г. Кировск*

Введение

Природные и природно-техногенные землетрясения, как правило, не происходят независимо. Скачок напряжения, вызванный землетрясением, инициирует повторные толчки (афтершоки). Количество инициированных толчков называется продуктивностью. Продуктивность характеризует отклик геофизической среды на скачок напряжений, вызванный более ранним сейсмическим событием. Распределение продуктивности играет ключевую роль при оценивании опасности повторных толчков как в условиях природной (тектонической), так и природно-техногенной сейсмичности. Последняя часто возникает при добыче полезных ископаемых в тектонически нагруженных массивах горных пород в результате техногенного воздействия на среду.

Важность понятия продуктивности для оценки опасности повторных толчков обусловлена тем, что продуктивность является фактором кластеризации сейсмичности, который в комбинации с другими законами сейсмологии (Гутенберга-Рихтера и Омори-Утсу) задает распределение афтершоков по пространству, времени и магнитуде [4, 3].

Данная статья представляет собой обобщение предыдущих работ авторов, посвященных исследованию продуктивности как природной, так и природно-техногенной сейсмичности, а также сейсмической продуктивности взрывов (способность взрывов инициировать сейсмические события). В этих исследованиях [4, 6, 16] был установлен закон продуктивности, согласно которому продуктивность тектонических землетрясений подчиняется экспоненциальному распределению, а не распределению Пуассона, как обычно предполагается [10, 11, 14]. Вид распределения сохраняется для различных глубин и магнитуд рассматриваемых событий; единственный параметр этого распределения (среднее число инициированных событий) не зависит от магнитуды события триггера и убывает с глубиной.

Аналогичные результаты были получены и для слабой ($M \geq 0$, $E \geq 10^4$ Дж) природно-техногенной сейсмичности [1, 2], а также для сейсмической продуктивности взрывов (способность взрывов вызывать сейсмические события) [8].

Исходные данные

В исследовании для анализа природной сейсмичности на глобальном и региональном уровнях использовались следующие каталоги землетрясений:

- Глобальный каталог ANSS ComCat Геологической службы США (USGS), URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/;
- Каталог Национального центра землетрясений Национального института геофизики и вулканологии Италии, URL https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/;
- Каталог Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН, URL http://seis-bykl.ru/modules.php?name=Data&da=1;
- Каталог камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, URL: http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php;
- Сейсмологический бюллетень Японского метеорологического агентства (JMA), URL: https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index_e.html;
- Каталог сети GeoNet для Новой Зеланди, URL: https://www.geonet.org.nz/data/types/eq_catalogue;
- Каталог Северной Калифорнии (NCEDC), URL: http://www.ncedc.org/ncedc/catalog-search.html;
- Каталог Южной Калифорнии, URL: https://service.scedc.caltech.edu/ftp/catalogs/hauksson/Socal.

Анализ природно-техногенной сейсмичности выполнялся по данным многолетних наблюдений, проводимых Кировским филиалом (КФ) АО «Апатит» на территории Хибинского массива [5]. Начиная с 1996 г., эти данные представительны, начиная с магнитуды 0 (энергия 10^4 Дж). Точность определения гипоцентров в зоне контроля составляет 25 м. Такая точность определения гипоцентров и представительность определяет уникальность использованных данных и позволяет проводить исследования для очень слабой сейсмичности, тем самым заполняя разрыв между лабораторными экспериментами и натурными наблюдениями. Это является дополнительной проверкой универсальности закономерностей, выявленных как в результате лабораторных исследований, так и в результате анализа глобальных и региональных каталогов тектонических землетрясений.

Дополнительно использовались данные о промышленных взрывах, проводимых КФ АО «Апатит», для исследования сейсмической продуктивности взрывов (их способность инициировать сейсмические события).

Методика исследований

Для выделения землетрясений-триггеров (основных толчков) и инициированных ими событий применялся метод «ближайшего соседа» Заляпина-Бен-Зиона [17], основанный на использовании функции близости в области пространства-времени-магнитуды [9], зависящей от параметров сейсмического режима (наклон графика повторяемости и фрактальная размерность гипоцентров). Этот метод позволяет разделить каталог землетрясений на фоновые и кластеризованные части. Для этого каждое землетрясение связывается с его потенциальным триггером, который определяется по минимуму значений функции близости, рассчитанных для всех предшествующих событий (взрывов) относительно рассматриваемого. Если соответствующее значение функции близости превышает заданный порог η_0, то связь разрывается, и оказывается, что данное событие не имеет «предка» (является фоновым). Здесь мы принимаем, что каждое землетрясение или взрыв может инициировать несколько связанных с ним толчков (кластер), но каждый толчок может быть инициирован лишь одним определенным событием. Продуктивностью триггера (землетрясения или взрыва) в такой схеме называется число инициированных им сейсмических событий. Особенность применения метода ближайшего соседа к выделению сейсмических событий, инициированных взрывами подробно рассмотрена в работе [8].

В случае, когда в качестве триггеров рассматривались сейсмические события можно построить иерархические деревья (инициированное событие само является триггером других событий), характеризующие кластеризацию сейсмичности на более высоких уровнях иерархии [17].

Мы подсчитывали число инициированных событий магнитудой выше относительного порога, т.е., для каждого представительного сейсмического события подсчитывалось число инициированных им представительных толчков с магнитудой $M \geq M_m - \Delta M$, где M_m – магнитуда триггера, $\Delta M > 0$. Аналогичные вычисления выполнялись и для массовых взрывов с магнитудой $M_m \geq 2$.

Результаты

Расчеты показали, что число инициированных толчков (Λ) подчиняется экспоненциальному распределению

$$F(x) = \mathrm{P}(\Lambda < x) = 1 - e^{-x/\Lambda_{\Delta M}} \quad (1)$$

с плотностью

$$f(x) = \frac{1}{\Lambda_{\Delta M}} e^{-x/\Lambda_{\Delta M}}, \quad (2)$$

а не распределению Пуассона, как обычно предполагается [11, 14, 10]. Здесь $\Lambda_{\Delta M}$ – среднее число толчков магнитудой $M \geq M_m - \Delta M$, инициированных триггером (землетрясением или взрывом) с магнитудой M_m. Формулы (1), (2) – закон продуктивности землетрясений.

В предыдущих работах нами было показано, что распределение продуктивности природных землетрясений не зависит от: нижнего порога магнитуд рассматриваемых инициированных событий, магнитуд и глубин событий-триггеров [4, 16]. При этом фактор кластеризации $\Lambda_{\Delta M}$ экспоненциально снижается с ростом глубин очагов событий-триггеров, сопровождаемым увеличением литостатического давления и может использоваться как новый статистический инструмент для характеристики систем разломов, подобно распределению магнитуд Гутенберга-Рихтера или афтершоковым сериям [13, 15]. Также было установлено, что единственный параметр распределения (1) $\Lambda_{\Delta M}$ при постоянстве ΔM не зависит от магнитуды триггера.

Аналогичное поведение продуктивности имеет место и для природно-техногенной сейсмичности Хибинского массива [1, 2].

Иллюстрация закона продуктивности для глобальной и региональной сейсмичности приведена на Рис. 1. На Рис. 2 приведено распределение продуктивности природно-техногенных землетрясений с $M_m \geq 1.5$ для подземных рудников Хибинского массива.

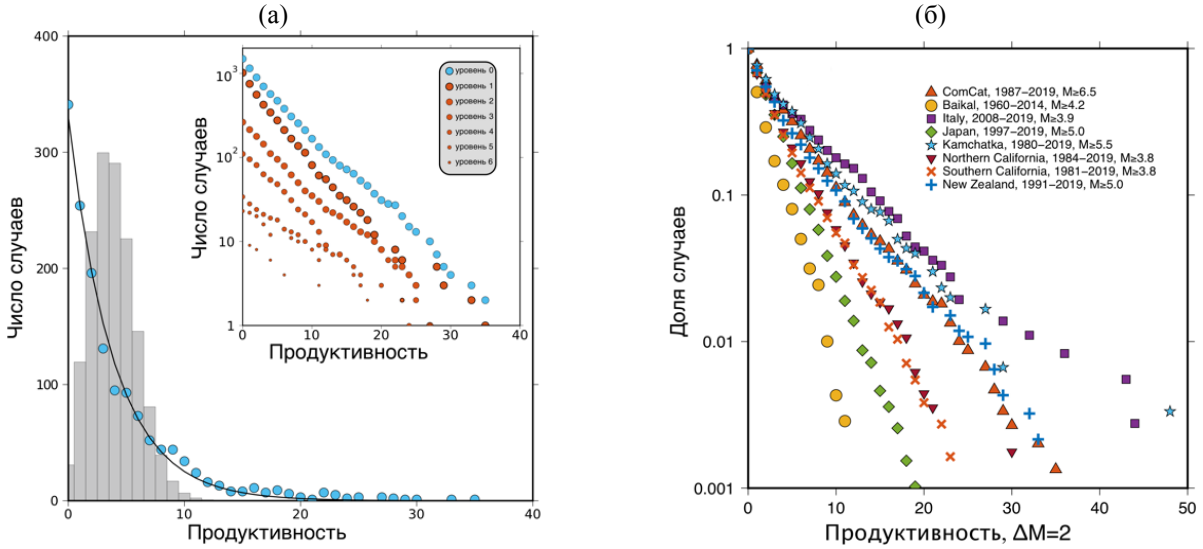


Рис. 1. Продуктивность землетрясений по данным глобального каталога ANSS ComCat (а) и региональных каталогов (б) [4]. (а) - Распределение числа землетрясений с магнитудами $M \geq M_m$-2, инициированных событиями-триггерами с $M_m \geq 6.5$ (кружки). Сплошная линия – аппроксимация экспоненциальным распределением. Гистограмма – распределение Пуассона. Параметры обеих распределений равны среднему значению инициированных событий $\Lambda_2 = 4.32$. Вставка – кумулятивные кривые распределения продуктивности на более низких уровнях иерархии. (б) – Распределение продуктивности для некоторых региональных каталогов (вертикальная ось в логарифмическом масштабе): Италия, $\Lambda_2 = 5.02$; Байкал и Прибайкалье, Λ_2=1.31; Камчатка, Λ_2 =5.28; Япония, Λ_2 =2.8; Новая Зеландия, Λ_2 = 3.72=; Северная Калифорния, Λ_2 =3.06; Южная Калифорния, Λ_2 =3.46.

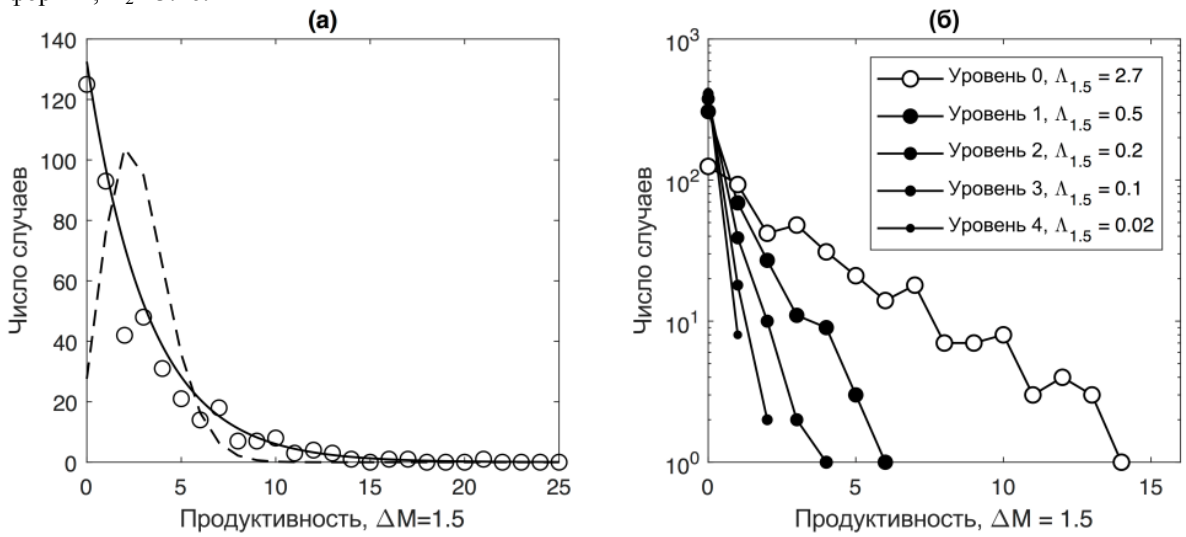


Рис. 2. Продуктивность техногенной сейсмичности Хибинского массива [1]. **(а)** – Распределение числа сейсмических событий с $M \geq M_m$-1.5, = 1.5, инициированных событиями-триггерами с $M_m \geq 1.5$ (кружки). Сплошная линия – аппроксимация экспоненциальным распределением. Прерывистая линия – распределение Пуассона. Параметры обеих распределений равны среднему значению инициированных числа событий $\Lambda_{1.5} = 2.7$. **(б)** – Кривые распределения продуктивности на более низких уровнях иерархии (вертикальная ось в логарифмическом масштабе).

Распределение сейсмической продуктивности взрывов с $M_m \geq 2$для подземных рудников Хибинского массива показано на Рис. 3. В случае взрывов-триггеров параметр $\Lambda_{\Delta M}$ может зависеть от магнитуды взрыва триггера при постоянстве ΔM из-за неэквивалентности магнитуд взрывов и

землетрясений по причине разного механизма излучения энергии. Сдвиговая компонента у взрыва практически отсутствует.

Необходимо отметить, что экспоненциальный вид распределения продуктивности не зависит от вида функции близости [4, 16]. Более того, выделение основных толчков и их афтершоков методом Молчана и Дмитриевой, использующим гиперболическое затухание афтершокового процесса, также приводит к экспоненциальному распределению продуктивности [6].

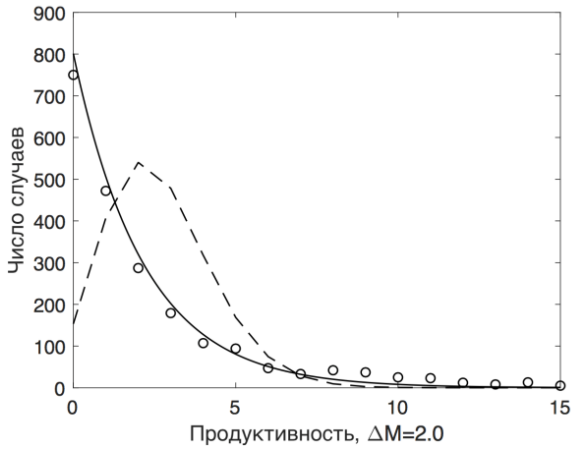


Рис. 3. Распределение числа сейсмических событий с $M \geq M_m$ - 2, инициированных взрывами с $M_m \geq 2$ (кружки) [8]. Сплошная линия – аппроксимация экспоненциальным распределением. Прерывистая линия – распределение Пуассона. Параметры обеих распределений равны среднему значению инициированных числа событий $\Lambda_2 = 2.7$.

Обсуждение результатов и выводы

Отметим, что основным отличием экспоненциального распределения от распределения Пуассона является наличие моды в нуле, следовательно, наиболее вероятным является случай, когда событие-триггер вообще не инициирует толчки. Этот результат фактически опровергает основанную на распределении Пуассона модель ETAS [14], в которой предполагается постоянство числа афтершоков с магнитудой $M \geq M_m - \Delta M$. (Распределение Пуассона естественно моделирует отклонения от среднего для конкретных реализаций.) На самом деле число афтершоков, инициированных, основными толчками с одной и той же магнитудой может отличаться на порядки [12]. Более того, согласно закону продуктивности, это число распределено экспоненциально и, следовательно, в большинстве случаев меньше среднего значения числа инициированных событий. На практике это приводит к тому, что при прогнозировании модель ETAS завышает ожидаемое число афтершоков [7]. Для устранения этого недостатка нами была предложена модель ETAS$^{(e)}$, в которой число афтершоков является экспоненциально распределенной случайной величиной [7, 16].

Тот факт, что число событий, инициированных природными, природно-техногенными землетрясениями или взрывами, подчиняется экспоненциальному распределению свидетельствует, во-первых, о универсальном характере закона продуктивности. Во-вторых, позволяет утверждать, что распределение продуктивности определяется свойствами среды и не зависит от механизма ее возмущения (взрыв, сейсмическое событие).

Этот результат является обоснованием корректности использования единых подходов к оценке опасности повторных толчков, инициированных природными, природно-техногенными землетрясениями или взрывами.

Исследование включает результаты, проведенные при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00812), а также в ходе выполнения Госзадания КФ ФИЦ ЕГС РАН и ИТПЗ РАН.

Список литературы

1. *Баранов С.В., Жукова С.А., Корчак П.А., Шебалин П.Н.* Продуктивность техногенной сейсмичности // Физика Земли. № 3. 2020. С. 40–51. DOI: 10.31857/S0002333720030011.

2. *Баранов С.В., Жукова С.А., Шебалин П.Н., Моторин А.Ю.* О независимости сейсмической продуктивности от механизма возмущения среды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-Технический Журнал, специальный выпуск 37). 2019. № 11. С. 333–342. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-333-342.

3. *Баранов С.В., Моторин А.Ю., Шебалин П.Н.* Пространственное распределение повторных толчков в условиях техногенной сейсмичности // Физика Земли. 2012. № 4. С. 91–101. DOI: 10.31857/S0002333721040025.

4. *Баранов С.В., Шебалин П.Н.* Закономерности пост-сейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков. М.: РАН, 2019. 218 с.

5. *Корчак П.А., Жукова С.А., Меньшиков П.Ю.* Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит» // Горный журнал. 2014. № 10. С. 42–46.

6. *Шебалин П.Н., Баранов С.В., Дзебоев Б.А.* Закон повторяемости количества афтершоков // Доклады Академии наук. 2018. Т. 481. № 3. С. 320–323. DOI: 10.31857/S086956520001387-8.

7. *Baranov S.V., Gvishiani A.D., Narteau C., Shebalin P.N.* Epidemic type aftershock sequence exponential productivity // Russian Journal of Earth Sciences, V. 19, ES6003. DOI:10.2205/2019ES000695, 2019.

8. *Baranov S. V., Zhukova S. A., Korchak P. A., Shebalin P. N.* Seismic productivity of blasts: A case-study of the Khibiny Massif // Eurasian Mining. 2020. No. 2. P. 14–18. DOI: 10.17580/em.2020.02.04.

9. *Baiesi M., Paczuski M.* Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // Phys. Rev. E. 2004. V. 69 (6). P. 066106-1 – 066106-8. DOI: 10.1103/PhysRevE.69.066106.

10. *Helmstetter A., Sornette D.* Subcritical and supercritical regimes in epidemic models of earthquake *Kagan, Y. Y., Knopoff L.* Stochastic synthesis of earthquake catalogs // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 2853–2862.

11. *Marsan D., Helmstetter A.* How variable is the number of triggered aftershocks? //J. Geophys. Res. Solid Earth. 2017. V. 122. P. 5544–5560.

12. *Narteau C., Byrdina S., Shebalin P. Schorlemmer D.* Common dependence on stress for the two fundamental laws of statitical seismology // Nature. 2009. P. 462, 642–645.

13. *Ogata Y.* Statistical models for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis // Tectonophysics. 1989. V. 169. P. 159–174.

14. *Shebalin P., Narteau C.* Depth dependent stress revealed by after- shocks, Nature Communication. 2017. V. 8(1). P. 1–8.

15. *Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V.* Earthquake Productivity Law // G eophysical Journal International. 2020. V. 222. P. 1264–1269. DOI: https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252

16. *Zaliapin I., Ben-Zion Y.* A global classification and characterization of earthquake clusters // Geophys. J. Int. 2016. V. 207. P. 608–634.

УДК 550.34:551.510.413.5

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ НАСТУПЛЕНИЯ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО КОМПЛЕКСУ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ И ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ

Богданов В.В., Павлов А.В.

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка
vbogd@ikir.ru, pavlov@ikir.ru

Введение

Существующие в настоящий момент методы определения периодов повышения сейсмической активности на Камчатке [7] на основе анализа только ионосферных прогностических признаков не дают ответа на вопросы ни о силе события, ни о месте его возникновения. Возникает необходимость объединения методов мониторинга сейсмического режима на основе анализа каталога землетрясений (среднесрочный прогноз) и геофизического мониторинга на основе изучения ионосферных параметров (краткосрочный прогноз) с целью разработки методов предупреждения о грозящей опасности, определяя возможную область и период ожидания землетрясения. В данной работе произведены прогностических оценок вероятности, возможной области ожидания и временного периода наступления сильных землетрясений с энергетическим классом $K_S \geq 13.5$ ($M \geq 6.0$) в Камчатском регионе за 01.01.2019–01.06.2021 гг. на основе совместного анализа аномальных значений сейсмического прогностического признака, полученного на основе вероятностной модели сейсмического режима, и комплекса ионосферных предвестников.

Методика расчета сейсмологического параметра

Применение аксиоматики А.Н. Колмогорова к каталогу сейсмических событий позволяет рассматривать каждое землетрясение как элементарное событие ω_i, а весь каталог или его отдельную часть – как пространство элементарных событий Ω [1]. Каждое элементарное событие ω_i может быть охарактеризовано четырьмя случайными величинами: широтой φ_i, долготой λ_i, глубиной h_i, энергетическим классом $K_i = \lg E$ и временем t_i. (Время события $t_i(\omega_i)$, как не имеющего математического ожидания, из системы случайных величин исключено, но учитывается как параметр, который определяет попадание события ω_i в исследуемый период ΔT). Для множества сейсмических событий, произошедших за некоторый период времени ΔT, вероятностным пространством является совокупность трех объектов $\{\Omega, \widetilde{F}, P\}$, где Ω – пространство элементарных событий, $\widetilde{F}$ – множество подмножеств случайных событий, P – вероятности этих событий. Случайные события (за конкретный выбранный период времени ΔT) могут представлять произвольную комбинацию из переменного числа случайных величин (при фиксировании других) и образовывать в $\widetilde{F}$ некоторые подмножества **A**, **B**, **C** и т.д.

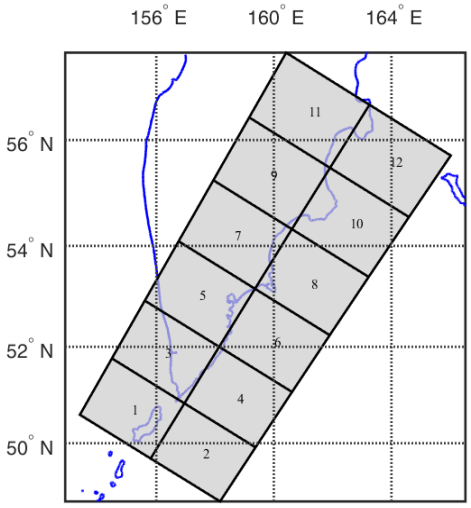


Рис. 1. Исследуемые области S_i

В качестве случайного события, на основе которого вычисляется сейсмический прогностический признак, было задано случайное событие **A**: «Попадание эпицентров сейсмических событий, произошедших в выбранном сейсмоактивном объёме, в заданные интервалы широты Δφ и долготы Δλ». Для расчета вероятностей данного случайного события был использован каталог землетрясений Камчатского филиала Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН".

Исследуемая сейсмоактивная область, расположенная вдоль восточного побережья Камчатки, включающая в себя Южную и Северную сейсмофокальные зоны, а также частично Континентальные области Камчатки, разбивается на m=12 неперекрывающихся площадей с размерами S=150×200 км (рис. 1). Так как в качестве прогнозируемых землетрясений в данной работе рассматриваются сейсмические события с энергетическим классом K_S≥13.5, то, согласно [5], длина разрыва в очагах таких землетрясений L≥11 км. Полагая, что линейный размер области подготовки землетрясения составляет порядка 10 длин разрыва, т.е ~110 км, для расчётов в качестве базового варианта был выбран размер пространственной ячейки равный 150×200 км.

Для каждой площади S_i в скользящем временном окне ΔT_k=1 год, проходящем с шагом Δt=1 месяц временной интервал T=1962–2021 гг., вычисляется вероятность $P_k(S_i)=\frac{n_{ik}}{N_k}$ (рис. 2), где n_{ik} – число землетрясений с энергетическим классом K_S≥9.0, произошедших в области S_i за период ΔT_k, $N_k=\sum_{k=1}^{m} n_{ik}$ – число землетрясений с K_S≥9.0, произошедших на площади $S=\sum_{i=1}^{m} S_i$ за время ΔT_k. Также в каждой области S_i вычисляются долговременные (фоновые) значения вероятности попадания землетрясения $P_T(S_i)=\frac{n_{iT}}{N_T}$, где n_{iT} – число землетрясений с энергетическим классом K_S≥9.0, произошедших за время T, $N_T=\sum_{k=1}^{m} n_{iT}$ – число землетрясений с K_S≥9.0, произошедших за T на площади S. При расчетах вероятностей $P_k(S_i)$ и $P_T(S_i)$ рассматривались землетрясения, произошедшие на глубинах до 200 км.

Для получения статистически значимых отклонений текущих значений вероятностей $P_k(S_i)$ от их долговременных (фоновых) значений $P_T(S_i)$ используется параметр ξ_P, определённый на основе [4] и представленный в виде:

$$\xi_P=\begin{cases}\dfrac{\Delta P_k-sign(\Delta P_k)\cdot\left|\sigma_{P_k}\right|}{\left|\sigma_{P_T}\right|}, \text{если } \left|\Delta P_k\right|>\left|\sigma_{P_k}\right| \\ 0, \text{если } 0\le\left|\Delta P_k\right|\le\left|\sigma_{P_k}\right|\end{cases} \quad (1)$$

где P_k и $\sigma_{P_k}=\sqrt{P_k(1-P_k)/n_k}$ текущие значения вероятности, и её стандартное отклонение в скользящем временном окне ΔT_k; P_T и $\sigma_{P_k}=\sqrt{P_T(1-P_T)/n_T}$ долговременные значения вероятности и её стандартное отклонение окне T>C; n_i и n_T – число сейсмических событий, произошедших соответственно за временные периоды ΔT_k и T; $\Delta P_k=P_k-P_T$ разность между текущим значением вероятности P_k и долговременным значением P_T.

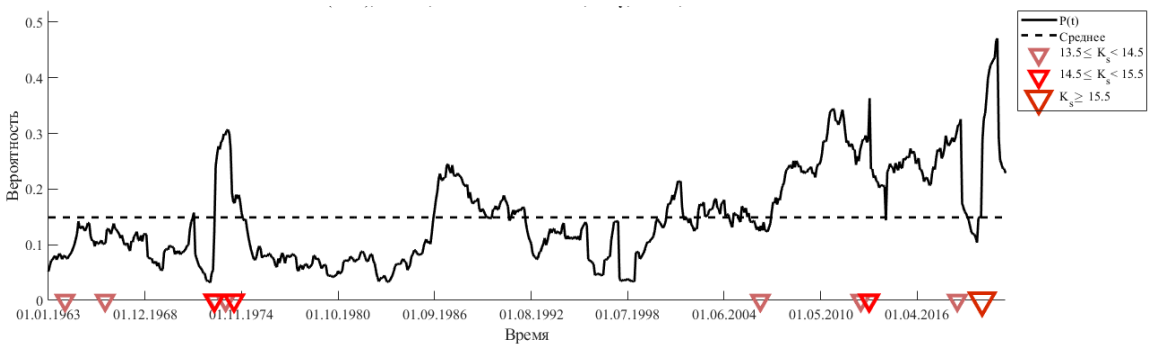


Рис. 2. Временной ряд значений вероятности $P_k(S_2)$. Красными треугольниками на временной оси отмечены землетрясения с K_S≥13.5.

При поиске периодов активизации сейсмичности за начало аномалии по параметру ξ_P принимается момент появления значений $\xi_P \geq \xi_P^{\text{тр.1}}$, а в случае поиска периодов сейсмических затиший, начало аномалии идентифицируется по моменту появления значений $\xi_P \leq \xi_P^{\text{тр.2}}$, где $\xi_P^{\text{тр.1}}$ и $\xi_P^{\text{тр.2}}$ – уровни тревоги, выбираемые экспериментально. При $\xi_P^{\text{тр.1}} < \xi_P < \xi_P^{\text{тр.2}}$ текущие значения вероятностей существенно не отклоняются от фоновых значений. В данной работе значения критериев для периодов активизации и затиший были выбраны соответственно $\xi_P^{\text{тр.1}} = 2.5$ и $\xi_P^{\text{тр.2}} = -2.5$. Для каждой области S_i производилась оценка периодов ожидания $T_{\text{a}}^{\text{ож}} = \widetilde{T}_{\text{a}} \pm \sigma_{T_{\text{a}}}$ и $T_{\text{c}}^{\text{ож}} = \widetilde{T}_{\text{c}} \pm \sigma_{T_{\text{c}}}$ землетрясений с K_S≥13.5 при обнаружении соответственно аномалий сейсмической активизации и затишья, а также периода ожидания $T_{\text{ac}}^{\text{ож}} = \widetilde{T}_{\text{ac}} \pm \sigma_{T_{\text{ac}}}$ по обоим типам аномалий.

Для оценки прогностической эффективности параметра ξ_P использовались следующие характеристики: относительное число спрогнозированных землетрясений (надежность R), относительное число реализованных аномалий (достоверность V) [6], эффективности J_G и J_M, вычисленные соответственно по методикам А.А. Гусева [3] и Г.М. Молчана [8].

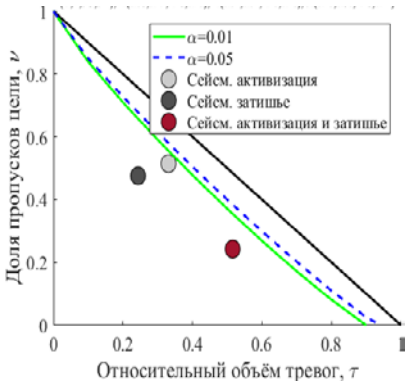


Рис.3. Диаграмма ошибок для параметра ξ_P при прогнозировании землетрясений с K_S≥13.5.

Результаты оценки прогностической эффективности параметра ξ_P для землетрясений с K_S≥13.5, произошедших в областях S_i (рис.1) показали, что его надежность R=0.76, достоверность V=0.45. Эффективность прогноза по методике А.А.Гусева составляет J_G=1.47. Так как J_G>1, то прогностический признак считается информативным и может использоваться в алгоритмах прогноза землетрясений.

Эффективность прогноза по методике Г.М. Молчана составила J_M=0.24, а на диаграмме ошибок (рис. 3), значения (τ, ν) лежат под нижней границей 99% доверительного интервала, что можно интерпретировать как высокую степень надёжности выявленной связи между идентифицированными аномалиями сейсмического режима с помощью параметра ξ_P и прогнозируемыми землетрясений с K_S≥13.5.

Методика прогнозирования на основе комплекса ионосферных параметров

В работе использованы данные радиофизических наблюдений, выполненные средствами вертикального радиозондирования. Автоматическая ионосферная станция (АИС) вертикального радиозондирования расположена в с. Паратунка (φ=52.97° с.ш., λ=1 58.24° в.д.). Наблюдения проводились один раз в 15 минут в импульсном режиме на частотах от 1 до 10 МГц.

В работе [2] был определен набор ионосферных параметров, обладающих наилучшей прогностической эффективностью. На основе этих ионосферных предвестников был предложен алгоритм краткосрочного прогноза землетрясений с энергетическим классом K_S≥11.5, в котором проводится совместный анализ рассматриваемых ионосферных возмущений в скользящем временном окне шириной ΔT=5 суток с шагом Δt=1 сутки. Условием для объявления начала периода ожидания $T_{\text{ож}}$ сейсмического события было выполнение на временном интервале ΔT как минимум для трёх из четырёх рассматриваемых ионосферных параметров следующих критериев:

1) Формирование К-слоя в течение как минимум одних суток интервала ΔT;
2) Формирование спорадического слоя Es типа r в течение как минимум одних суток интервала ΔT;
3) Превышение значений критической частоты foF2 слоя F2 медианных значений f_{med}, вычисленных за предыдущие 30 суток, не менее чем на 20% ($\Delta foF_2/f_{\text{med}} \geq 0.2$) на фоне развития магнитосферной бури (суммарные значения K-индекса за сутки $K_\Sigma \geq 20$);
4) Разветвление следа на ионограмме вблизи критической частоты foF2 (режим "V") в течение как минимум одних суток интервала ΔT.

Продолжительность периода ожидания задавалась равной $T_{\text{ож}}$=5 суток. Для алгоритма была проведена оценка его прогностической эффективности на временном интервале 01.01.2015-31.12.2018 гг. для сейсмических событий с K_S≥11.5, K_S≥12.5, K_S≥13.5 и K_S≥14.5, произошедших на глубинах до 100 км в радиусе r=500 км от пункта регистрации ионосферных наблюдений. Согласно полученным результатам, при прогнозировании землетрясений с энергетическими классами K_S≥11.5

и K_S≥12.5 эффективность прогноза по методике А.А. Гусева составляет $1.5 \le J_G < 2$. При прогнозировании землетрясений с энергетическим классом K_S≥13.5 и K_S≥14.5 эффективность $J_G > 2$, т.е. прогноз по данной методике статистически значим и более чем в 2 раза отличается от случайного угадывания.

Методика на основе совместного анализа сейсмологического и ионосферных предвестников

На начальном этапе во временном окне длительностью ΔT=5 суток с шагом Δt=1 сутки анализируется появление прогностических ионосферных параметров. Если на временном интервале ΔT зафиксировано появление как минимум для трёх из четырёх выше рассмотренных ионосферных параметров, то для определения области ожидания сильного землетрясения $S_{ож}$ для каждой ячейки S_i анализируются значения сейсмологического параметра ξ_P. Областью ожидания сильного землетрясения будет считаться область $S_{ож}$, включающая в себя элементарные ячейки S_i, в которых были идентифицированы аномалии сейсмического режима по параметру ξ_P: $S_{ож} = \sum_{j=1}^{l} S_j$, где l – число областей, в которых идентифицированы аномальные значения параметра ξ_P.

Вероятность $P(D_1 \mid EI)$ наступления сейсмического события с K_S≥13.5 в области $S_{ож}$ (случайное событие D_1), при условии, что в ней идентифицированы аномалии сейсмического режима (случайное событие E), а также выявлен комплекс ионосферных предвестников (случайное событие I), вычисляется на основе формулы Байеса:

$$P(D_1 \mid EI) = \frac{P(D_1) \cdot P(E \mid D_1) \cdot P(I \mid D_1)}{P(D_1) \cdot P(E \mid D_1) \cdot P(I \mid D_1) + P(D_2) \cdot P(E \mid D_2) \cdot P(I \mid D_2)} \quad (2)$$

Событие D_1 – наступление землетрясения прогнозируемого класса K_S≥13.5 в области $S_{ож}$.

Событие D_2 – отсутствие землетрясения с K_S≥13.5 в области $S_{общ}$, вероятность которого $P(D_2) = 1 - P(D_1)$.

Событие E – появление аномальных значений параметра ξ_P. Событие I – появление комплекса ионосферных предвестников. Наступление событий E и I можно представить в виде $EI = D_1EI + D_2EI$.

Событие D_1EI – наступление землетрясения с K_S≥13.5 в области $S_{ож}$ при идентификации аномалии сейсмического режима (активизации или затишья) и появлении комплекса ионосферных предвестников. Вероятность данного события определяется как $P(D_1EI) = P(D_1) \cdot P(E \mid D_1) \cdot P(I \mid D_1)$.

Событие D_2EI – отсутствие землетрясения с K_S≥13.5 в области $S_{ож}$ при идентификации аномалии сейсмического режима (активизации или затишья) и появлении комплекса ионосферных предвестников. Вероятность данного события определяется как $P(D_2EI) = P(D_2) \cdot P(E \mid D_2) \cdot P(I \mid D_2)$.

Если значения вероятности $P(D_1 \mid EI)$ превышают заданный критерий, то в области ожидания $S_{ож}$ объявляется период ожидания $T_{ож}$ сильного землетрясения с K_S≥13.5 длительностью до 5 суток. Период ожидания $T_{ож}$ может быть продлен при повторной регистрации комплекса ионосферных предвестников.

Результаты применения методики

За период 01.01.2019–01.06.2021 гг. в рассматриваемом сейсмоактивном районе произошло 6 землетрясений с энергетическим классом K_S≥13.5. В таблице 1 представлены результаты ретроспективного анализа по предложенной методике. Все шесть сейсмических событий произошли в течение периодов ожидания $T_{ож}$, определенных по комплексу ионосферных параметров, и попали в область ожидания $S_{ож}$ (в таблице 1 обозначено знаком "+"), определенной по значениям параметра ξ_P.

Таблица 1. Список прогнозируемых землетрясений с энергетическим классом K_S≥13.5.

№	Время	K_S	h, км	$P(D_1\|EI)$	$S_{ож}$, определенная по параметру ξ_P	$T_{ож}$ по комплексу ионосферных параметров
1	2019.06.25 09:05:39	14.3	57	0.69	+	2019.06.21–2019.06.26 гг.
2	2019.06.26 02:18:06	14.4	53	0.69	+	2019.06.21–2019.06.26 гг.
3	2020.01.22 11:04:11	14.3	83	0.71	+	2020.01.21–2020.02.05 гг.
4	2020.02.20 18:57:34	14.3	52	0.72	+	2020.02.11–2020.02.29 гг.
5	2020.03.25 02:49:19	16.8	48	0.73	+	2020.03.19–2020.03.28 гг.
6	2021.03.16 18:38:21	14.6	64	0.74	+	2021.02.14–2020.03.30 гг.

Результаты оценки эффективности прогноза землетрясений с K_S≥13.5 за временной период 01.01.2019–01.06.2021 гг. при выборе в качестве уровня тревоги значений условной вероятности $P(D_1|EI)$=0.5 и $P(D_1|EI)$=0.7, представлены в таблице 2 и на диаграммах ошибок (рис. 4).

Таблица 2. Эффективность прогноза землетрясений с K_S≥13.5 для различных уровней условной вероятности $P(D_1|EI)$.

Уровни условной вероятности $P(D_1\|EI)$	V	R	J_G	J_M
0.5	0.09	1	1.8	0.44
0.7	0.09	0.67	1.52	0.23

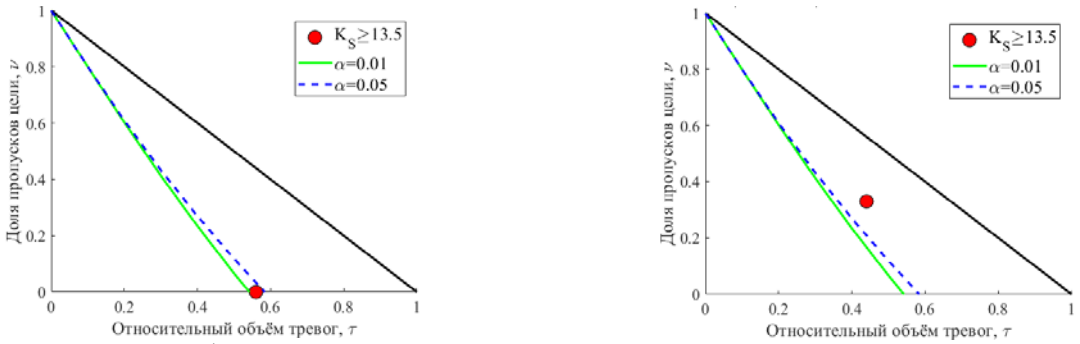


Рис. 4. Диаграммы ошибок для методики прогнозирования землетрясений с K_S≥13.5 на основе совместного анализа сейсмического и комплекса ионосферных предвестников при заданном уровне значений условной вероятности наступления землетрясений $P(D_1|EI)$=0.5 (а) и $P(D_1|EI)$=0.7 (б).

Эффективность представленной методики определения области и возможного периода наступления сейсмических событий с K_S≥13.5 при совместном анализе сейсмического параметра ζ_P и комплекса ионосферных предвестников (при значениях условной вероятности наступления землетрясений $P(D_1|EI)$≥0.5 и $P(D_1|EI)$≥0.7) показывает, что прогноз по данной методике более чем в 1.5 раза отличается от случайного угадывания. Невысокая достоверность V прогноза может быть обусловлена тем, что, с одной стороны, ионосферные возмущения формируются на фоне проявления солнечной активности, а с другой, пока нельзя точно указать нижний порог магнитуды землетрясения, подготовка которого уже начинает влиять на состояние ионосферы. Прогнозируемые по ионосферным предвестникам и учитываемые в статистике сейсмические события с энергетическим классом K_S≥13.5, не включают в себя события с энергетическим классом K_S<13.5, хотя ионосферный предвестник и сформировался. Следовательно, ионосферные прогностические признаки, которые предшествуют сейсмическим событиям с K_S<13.5, являются ложными для событий с K_S≥13.5, понижая, тем самым, достоверность прогноза.

Список литературы

1. *Богданов В.В., Павлов А.В., Полюхова А.Л.* Вероятностная модель сейсмичности на примере каталога Камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2010. № 6. С. 52–64.

2. *Богданов В.В., Павлов А.В.* Построение на основе сейсмических и ионосферных прогностических признаков методики оценки области и временного периода ожидания сильных камчатских землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Серия: Физико-математические науки. 2020. Т. 30. № 1. С. 59–78.

3. *Гусев А.А.* Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом Камчатки. Новосибирск: Наука, 1974. С.109–119.

4. *Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений. М.: Наука, 2006. 254 с.

5. *Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М: Наука, 1976. С. 9–27.

6. *Салтыков В.А.* О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений // Физика Земли. 2017. № 2. С. 84–96.

7. *Bogdanov V.V., Kaisin A.V., Pavlov A.V., Polyukhova A.L., Meister C.-V.* Anomalous behavior of ionospheric parameters above Kamchatka peninsula before and during seismic activity // Physics and Chemistry of the Earth. 2017. V. 98. P. 154–160.

8. *Molchan G.M.* Strategies in strong earthquake prediction // Phys. Earth and Planet. Inter. 1990. V. 61. P. 84–98.

УДК 550.34

СВЯЗЬ АНОМАЛИЙ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ С ТЕКТОНИЧЕСКИМ СТРОЕНИЕМ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА И ИХ УЧЕТ ПРИ ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Герман В.И. [1, 2]
[1] *Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья (КНИИГиМС), г. Красноярск, german3v@yandex.ru*
[2] *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск*

Введение

Сейсмичность традиционно описывают двумя основными характеристиками: активностью и значением тангенса угла наклона графика повторяемости. В таком описании, как правило, неявно предполагается стационарность сейсмического процесса с отсутствием последействия, которая в частности проявляется в том, что накопление землетрясений во времени описывается моделью простейшего или иначе стационарного пуассоновского потока [1, 7]. А следовательно временные интервалы между последовательными сейсмическими событиями ΔT в любом фиксированном энергетическо-пространственно-временном интервале *INT* имеют экспоненциальное распределение. В частности, модель простейшего потока принята при оценке сейсмической опасности в рамках общего сейсмического районирования [13].

Очевидно, что предположение о стационарности с отсутствием последействия в реальных условиях выполняется достаточно редко [4, 5 и др.]. В то же время в последние годы на основе анализа каталогов сейсмических событий различных регионов было установлено, что распределение временных интервалов ΔT между сейсмическими событиями в области представительных данных хорошо описывается одним и тем же законом распределения (функцией распределения) с точностью до масштабного параметра [3, 14, 15, 4, 16, 17]. Данная закономерность говорит о наличии подобия во временной структуре сейсмичности, которая определяется параметром формы распределения. Параметр масштаба при этом учитывает изменение уровня сейсмической активности в интервале *INT* при изменении его параметров.

В [17, 5] на примере каталогов Южной Калифорнии, Токтогульского района, а также Байкальского, Камчатского и Камчатско-Курильского регионов было рассмотрено изменение функций распределения ΔT при широком варьировании параметров энергетическо-пространственно-временного интервала *INT*, определяющего анализируемый набор данных. Было показано, что вид функции распределения ΔT с точностью до масштабного коэффициента постоянен при варьировании энергетических параметров интервала *INT*, практически не чувствителен к изменениям временных параметров интервала *INT*. Для Токтогульского района, а также Байкальского региона при изменении пространственных параметров *INT* вид функции распределения ΔT не имел значимых различий. В то же время для Южной Калифорнии, Камчатского и Камчатско-Курильского регионов наблюдалось, что тип функции распределения ΔT при изменении пространственных параметров интервала *INT* был не стабилен. Причиной такого поведения должны быть аномалий временной структуры сейсмичности в пространстве [6]. Ниже приводится анализ причин возникновения таких аномалий на примере сейсмичности Камчатки.

Изменение по пространству степени группирования землетрясений во времени

Для анализа был взят региональный каталог сейсмичности с 1962 г. по 2020 г. (http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php) [12]. Для обеспечения представительности рассматриваемых данных были взяты землетрясения с энергетическим классом $K \geq 9.5$. Афтершоки исключались из рассмотрения. Их выделение проводилось по алгоритму [8], реализованному В.Б. Смирновым [9].

В работах [4, 5] было показано, что функции распределения временных интервалов ΔT плохо описывается экспоненциальным распределением даже после удаления афтершоковых последовательностей, но достаточно хорошо аппроксимируется функциями распределения Вейбулла $F(\Delta t) = 1 - \exp(-\lambda\, \Delta t^k)$, где λ – масштабный параметр, а k – параметр формы. Распределение Вейбулла является обобщением экспоненциального, которое получается из него в случае, если $k = 1$. Таким образом, для выделения аномалий временной структуры сейсмичности достаточно изучить

изменение значений параметра формы k при смещении анализируемого пространственного интервала.

При построении распределений временных интервалов ΔT рассматривались пространственные ячейки размером 80х80 км, шаг их смещения составлял 10 км. Те ячейки, куда попадало менее 50 землетрясений не рассматривались. Для совместного сравнения полученных функций распределения применялось масштабирование, т.е. строилось распределение случайной величины $\Delta T/\mu$, где μ – величина пропорциональная параметру масштаба распределения случайной величины ΔT. Если функции распределения ΔT для различных пространственных ячеек имеют одинаковый параметр формы, то распределения величин $\Delta T/\mu$ будут совпадать между собой. В качестве коэффициента масштабирования μ была взята его робастная оценка [11], равная медиане отклонения от медианы ΔT (простейшей оценкой μ является математическое ожидание величины ΔT).

Рассмотрение масштабированных функций распределения временных интервалов ΔT (рис. 1) показывает, что они имеют схожий вид при значениях параметра формы k, бóльших 0.6. В то же время распределения с $k < 0.6$ значимо отличаются как от распределений с $k > 0.6$, так и между собой.

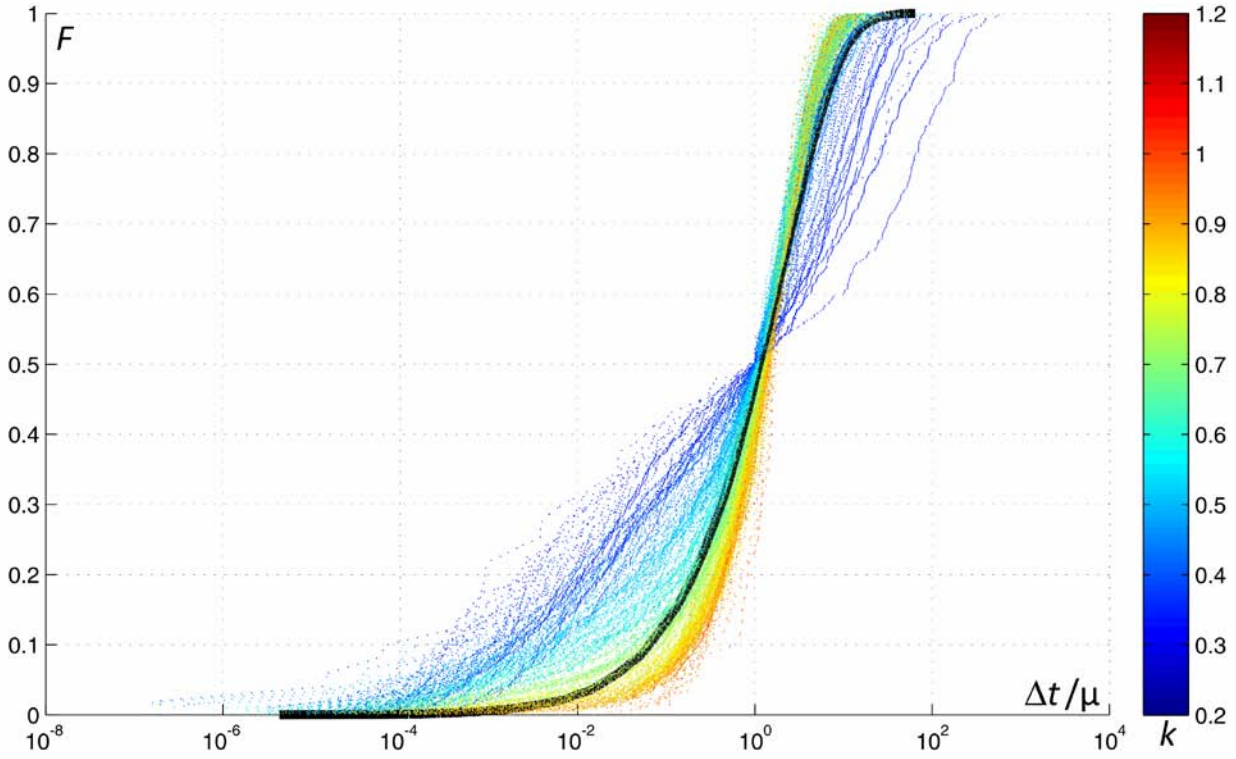


Рис. 1. Масштабированные функции распределения временных интервалов ΔT для ячеек размером 80х80 км с шагом сдвига в 40 км; цвет кривых соответствует значению параметра формы k распределения Вейбулла, аппроксимирующего их; типичная функция распределения для k = 0.65 показана черной жирной сплошной линией.

Значение параметра формы определяет характер изменения значения плотности вероятности возникновения очередного события спустя временной промежуток Δt после возникновения последнего зарегистрированного. Данная плотность вероятности равна функции интенсивности $r(\Delta t)$, для распределения Вейбулла $r(\Delta t) = \lambda k\ \Delta t^{k-1}$. Таким образом, если параметр формы k, приближенно равен 1, то возникновение одного землетрясения не влияет на возникновение другого. Распределения с k меньше 1 свидетельствует о группировке землетрясений во времени (вероятность возникновения нового землетрясения после последнего зарегистрированного со временем уменьшается). Соответственно значения k большие 1 говорят о наличии «отталкивания» землетрясений. В целом для Камчатского региона характерное значение параметра k приблизительно соответствует 0.65 [4, 5].

Изменение параметра формы k по пространству (рис. 2) показывает наличие мощной протяженной аномалии со значениями k меньшими 0.5, граница которой проходит вдоль западной границы Курило-Камчатского глубоководного желоба, разделяющего Охотскую плиту и

сдвигающуюся под нее Тихоокеанскую литосферную плиту. Наличие группирования землетрясений в данной области может быть связано с «зацеплениями» края Охотской плиты о Тихоокеанскую. При этом отсутствие сильнейших землетрясений в данной области может быть объяснено тем, что нет условий для достижения силой прижатия одной плиты к другой необходимой величины. Подобная, но менее выраженная аномалия, проходит и вдоль Алеутского желоба – линии контакта Тихоокеанской плиты с Северо-Американской.

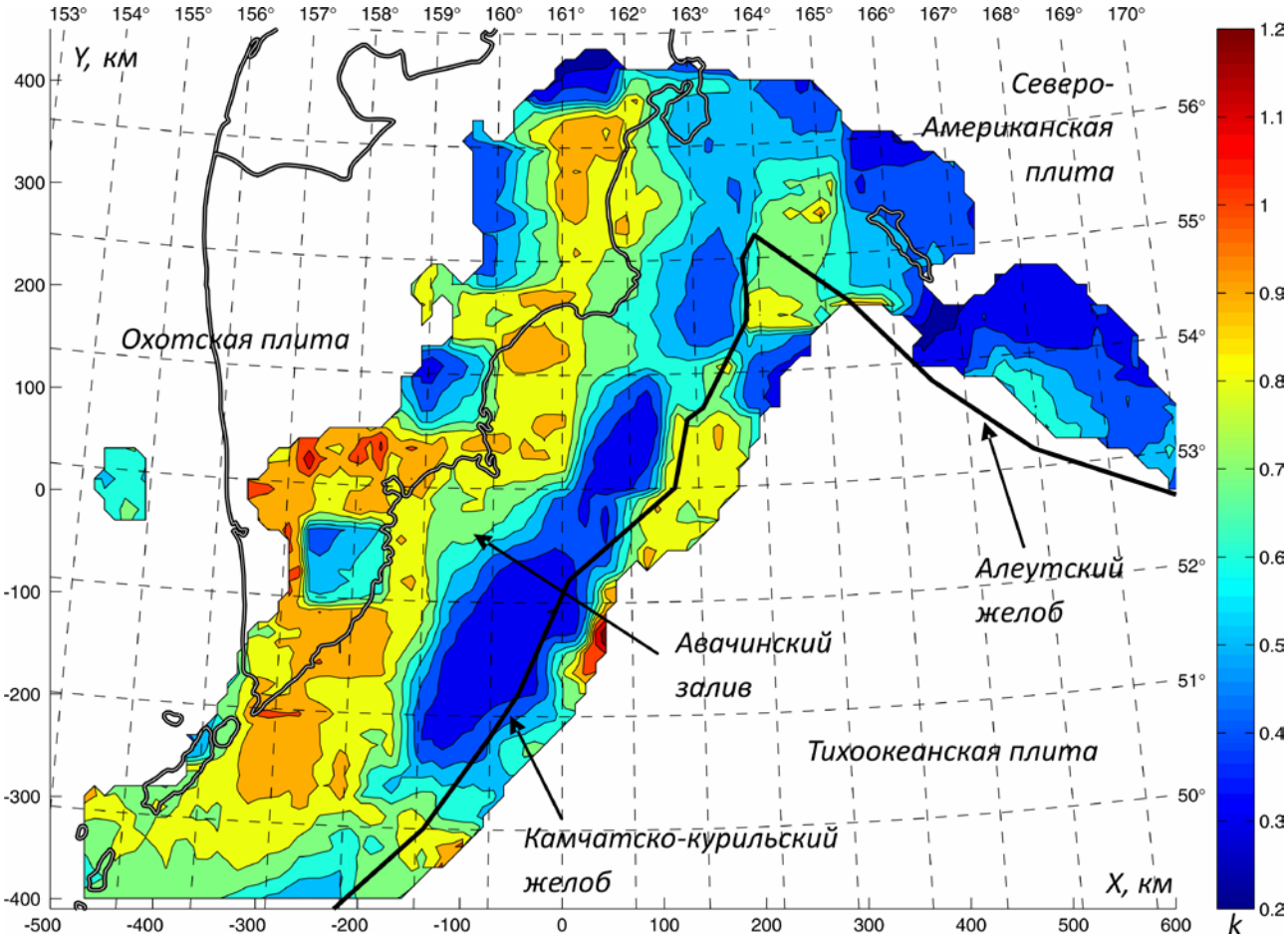


Рис. 2. Изменение параметра формы k распределения Вейбулла (характеризует степень группировки землетрясений во времени), аппроксимирующего распределение временных интервалов ΔT в ячейках размером 80x80 км, шаг сдвига ячеек – 10 км.

Схожая аномалия вдоль Курило-Камчатского глубоководного желоба выделяется также по анализу вариаций магнитудно-частотного распределения сейсмичности [2]. Она также также объясняется межплитовым сцеплением.

Еще три аномалии находятся непосредственно на территории полуострова Камчатка. Они располагаются в районе активных вулканов Безымянный и Толбачик, Мутновский и Горелый, а также вблизи вулкана Карымский. Предполагается, что эти аномалии связаны с активностью указанных вулканов.

Обнаруженные аномалии с низкими значениями параметра k сохраняются при рассмотрении более коротких временных интервалов, а также при дополнительном исключении из рассмотрения относительно слабых землетрясений. Добавление афтершоковых последовательностей приводит к увеличению размера и контрастности найденных аномалий.

Учет группирования землетрясений во времени при оценивании сейсмической опасности

К сожалению, группирование землетрясений во времени при оценке сейсмической опасности в рамках общего сейсмического районирования ОСР-97 и ОСР-2016 не учитывалось. В этих оценках принималось, что параметр формы $k = 1$. Реальная сейсмичность приближалась моделью из доменов и линеаментов, для которых оценивалась средняя повторяемость землетрясений различных магнитуд.

Для этой модели генерировался синтетический каталог землетрясений в предположении стационарности процесса их накопления во времени ($k = 1$). По этому каталогу оценивалась средняя повторяемость сотрясений, превышающих по своей интенсивности определенные уровни [10]. Соответственно для сотрясений также предполагалась стационарность их возникновения во времени.

В результате работ по ОСР-97 и ОСР-2016 строились карты A, B, C и D для периодов повторяемости T соответственно в 500, 1000, 5000 и 10000 лет. Указывалось, что для карт A, B, C и D вероятность P превышения интенсивности I_T в течение периода $t = 50$ лет равна 10, 5, 1 и 0.5%. Вероятность P рассчитывалась, исходя из экспоненциального распределения ($k = 1$), по формуле $P = 1 - \exp(-t/T)$ или, используя приближение Тейлора, $P \approx t/T$ [13]. В данном случае величина T выступает и в качестве среднего времени повторяемости интенсивности I и в качестве параметра распределения.

Однако как было показано выше накопление землетрясений в Камчатском регионе существенно отличается от модели простейшего потока. При этом распределение временных интервалов ΔT имеет распределение Вейбулла с параметром формы k меньшим 1. В этом случае следует ожидать, что повторяемость расчетной интенсивности I_T также будет иметь распределение Вейбулла. Соответственно накопление сотрясений с интенсивностью большей I_T будет являться процессом Вейбулла (нестационарным пуассоновским процессом), и вероятность P должна рассчитываться по формуле $P = 1 - \exp(-(t/Tw)^k)$ [1, раздел 2.1], где параметр Tw должен подбираться таким образом, чтобы обеспечить среднюю повторяемость сотрясений с интенсивностью не менее I_T равной T.

Известно, что среднее значение повторяемости в случае распределения Вейбулла равно $Tw\,\Gamma(1+1/k)$, где Γ – гамма функция [1]. Из равенства этого выражения T получаем, что $Tw = T / \Gamma(1+1/k)$. Соответственно $P = 1 - \exp(-(t\,\Gamma(1+1/k)/T)^k)$.

В целом для Камчатского региона характерное значение параметра k равно 0.65 [4]. При $k = 0.65$ $\Gamma(1+1/k)=1.366$, тогда если $t = 50$ лет и $T = 500$ лет, то вероятность P повышается с 10% (в случае предположения о стационарном пуассоновском накоплении) до 24% (в случае распределения Вейбулла). Для $T = 1000$ лет вероятность P повышается с 5% до 16%, для $T = 5000$ лет с 1% до 6%%, а для $T = 10000$ лет с 0,5% до 3.8%. Таким образом, вероятности P повышаются от 2,5 до 7,7 раз, что говорит о недооценке сейсмической опасности на картах общего сейсмического районирования. Для сохранения прежних вероятностей в 10%, 5%, 1% и 0,5% необходимо строить карты с повторяемостью не T, а $t\,\Gamma(1+1/k)\,(T/t)^{1/k}$, т.е. с повторяемостью большей минимум в 4 раза (2360 лет вместо 500 лет, 6856 лет вместо 1000 лет, 81551 год вместо 5000 лет и 236894 года вместо 10000 лет).

Для более корректного учета группирования землетрясений во времени необходимо для каждой из сейсмогенерирующих зон (доменов, линеаментов) проводить оценку параметра группирования k. В дальнейшем он должен быть использован для определения времен возникновения землетрясений в синтетическом каталоге, используемом для оценки интенсивности сотрясений. Имея длинный ряд из интенсивностей сотрясений и моментов их возникновения, уже можно будет непосредственно проводить расчет вероятности P превышения интенсивности I_T в течение периода $t = 50$ лет.

Заключение

Таким образом, в результате анализа временной структуры сейсмичности Камчатского региона выделены ее аномалии, отражающие группирование землетрясений во времени даже после исключения из рассмотрения афтершоков. Показана связь пространственного распределения обнаруженных аномалий с тектоническим строением территории, а также с участками вулканической активности.

Дополнительно продемонстрировано, что отсутствие учета группирования землетрясений во времени приводит к существенному занижению оценок сейсмической опасности. Такие оценки могут быть исправлены путем определения степени группировки для каждой сейсмогенерирующей зоны с дальнейшим учетом этой информации при генерации синтетического каталога землетрясений, используемого для оценки интенсивности сотрясений.

Благодарности

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

Список литературы

1. *Богданофф Дж., Козин Ф.* Вероятностные модели накопления повреждений: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 344 с.

2. *Воробьева И.А., Соловьев А.А., Шебалин П.Н.* Картирование межплитового сцепления в Камчатской зоне субдукции по вариациям магнитудно-частотного распределения сейсмичности // Доклады Академии наук, 2019. Т. 484. № 4. С. 478–481.

3. *Герман В.И.* Самоподобие временных интервалов между актами разрушения в горных породах на различных масштабных уровнях. // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Материалы 1-й Международной школы-семинара. (9-15 сент. 2001 г. Красноярск). Красноярск: СибГАУ, 2002. С. 66–72.

4. *Герман В.И.* Самоподобие временной структуры сейсмических событий на разных масштабных уровнях. // Вулканология и сейсмология. 2005. № 3. С. 66–74.

5. *Герман В.И.* Единая теория подобия структуры сейсмичности: статистический подход. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2010. 80 с.

6. *Герман В.И.* Выделение аномалий структуры сейсмичности и их связь с тектоническим строением территории. // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы Второй молодежной школы-семинара. М.: ИФЗ, 2011. Т. 1. С. 62–64.

7. *Кремер Н.Ш.* Теория вероятностей и математическая статистика М: Юнити-Дана, 2010. 551 с.

8. *Молчан Г.М., Дмитриева О.Е.* Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. 1991. Вып. 24. С. 19–50.

9. *Смирнов В.Б.* Прогностические аномалии сейсмического режима. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 7–22.

10. *Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97). Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах / гл. ред. В.Н. Страхов и В.И. Уломов 1:8 000 000. М.: ОИФЗ: Роскартография, 1999. 57 с.

11. *Хампель Ф., Рончетти Э., Рауссеу П., Штаэль В.* Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния. М.: Мир, 1989. 512 с.

12. *Чебров Д.В.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91.

13. *Шумилина Л.С.* Методика вычисления сейсмической опасности // Природные опасности России. Сейсмические опасности. Москва: «КРУК», 2000. С. 86–91.

14. *Bak P., Christensen K., Danon L. and Scanlon T.* Unified Scaling Law for Earthquakes // Phys. Rev. Lett. 2002. 88. 178501.

15. *Corral A.* Long-term clustering, scaling, and universality in the temporal occurrence of earthquakes // Phys. Rev. Lett. 2004. 92. 108501.

16. *German V.* Analysis of temporal structures of seismic events on different scale levels // Pure and Applied Geophysics. 2006. Vol. 163. № 10. P. 2243–2258.

17. *German V.I.* Unified scaling theory for distributions of temporal and spatial characteristics in seismology // Tectonophysics. 2006. Vol. 424. № 3-4. P. 167–175.

УДК 550.34

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ БАЙКАЛО-МОНГОЛЬСКОГО РЕГИОНА

Джурик В.И.[1], Брыжак Е.В.[1], Батсайхан Ц.[2], Серебренников С.П.[1], Шагун А.Н.[1], Ескин А.Ю.[1]

[1]Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия, dzhurik@crust.irk.ru
[2]Институт астрономии и геофизики МАН, Улаанбаатар, Монголия.

Введение

Байкало-Монгольский регион (БМР) является ареной крупнейших в мире внутриконтинентальных землетрясений, которые определяют высокий сейсмический потенциал региона. Здесь постоянно происходят землетрясения силой 8-11 баллов [3] и не случайно прогнозу сейсмических воздействий сильных землетрясений, с учетом современной геодинамики зон ВОЗ, для наиболее вероятных грунтовых условий уделяется особое внимание. В этом отношении появилась возможность анализа полученных данных для вновь произошедших сильных землетрясений в БМР в 2020-2021 гг. (рис. 1)

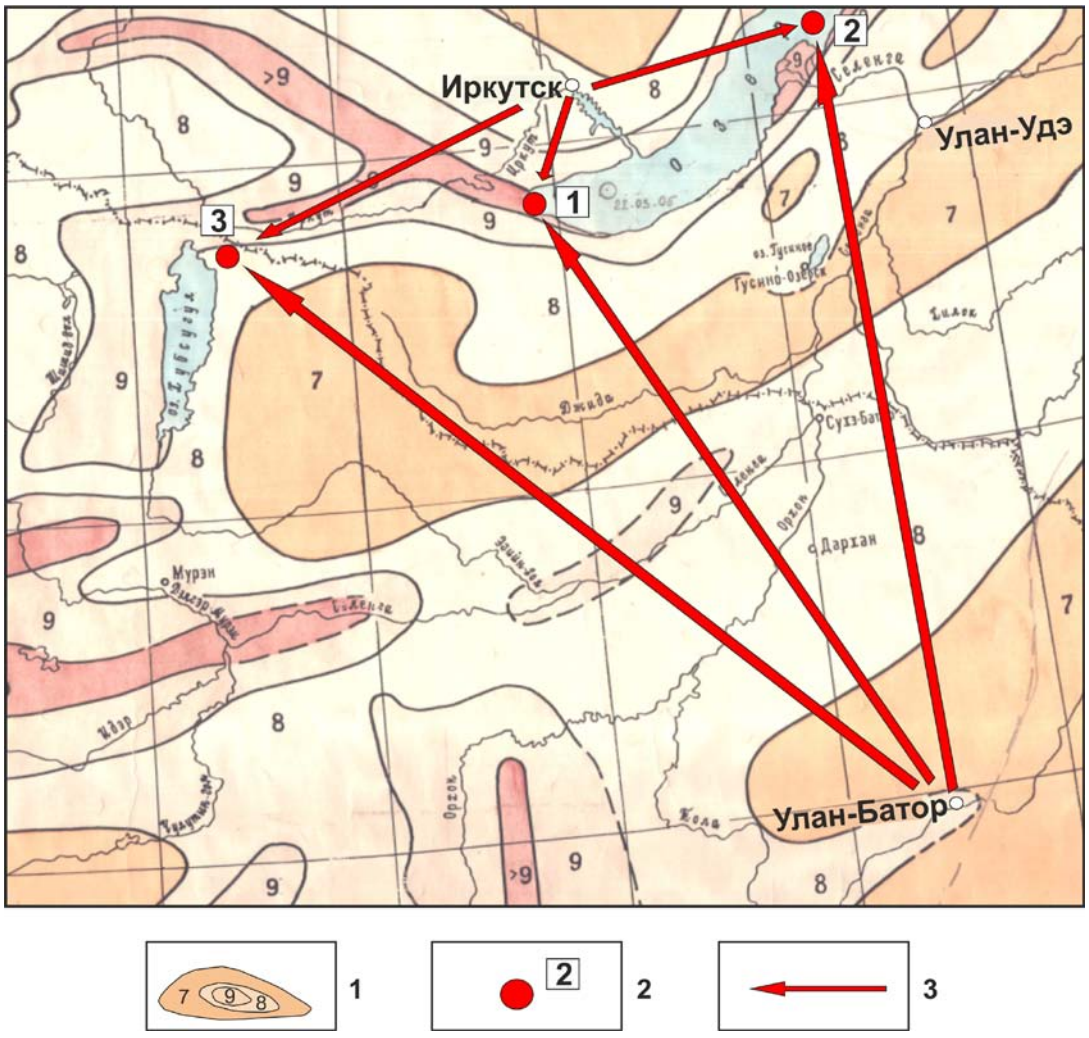


Рис. 1. Обзорная карта расположения трех эпицентров сильных землетрясений 2020-2021 гг. и пунктов их регистрации: 1 – зоны интенсивности сотрясений в баллах сейсмической шкалы MSK-64; 2 – эпицентры очагов зарегистрированных землетрясений и их номера; 3 – направления от пунктов регистрации на эпицентры землетрясений.

Для выбранных городов величина исходной сейсмичности совпадает с ее современной оценкой. По ожидаемой статистике вероятность таких землетрясений очень мала [4, 5], поэтому

анализ спектрального состава их колебаний является своевременным и необходимым для его учета при прогнозе сейсмических воздействий для ограниченных территорий из конкретных зон ВОЗ для северо-востока Монголии и юго-западного фланга БРЗ.

По макросейсмическим данным, отмеченные землетрясения проявлялись в г. Улаанбаатаре силой до 2 баллов и в г. Иркутске – от 4 до 6 баллов. Анализ спектрального состава произошедших сильных землетрясений позволяет использовать их записи для оценки сейсмических воздействий, отвечающих исходной сейсмичности рассматриваемых территорий.

Методика и результаты исследований

Основные данные анализируемых сильных землетрясений сведены в таблицу 1. В качестве принятых показателей, характеризующих влияние на спектральный состав зарегистрированных землетрясений для различных зон ВОЗ, использовались сейсмограммы и их спектры, частотные характеристики верхних грунтовых слоев и их параметры [2].

Таблица 1. Основные параметры землетрясений.

№ п/п	Врем	Район	Координаты	Магнитуда (М)	Энергетический класс (К)	Интенсивность (баллы)
1	21.09.2020	Слюдянский р-н (Иркутская область)	N 51.88 E 103.45	5.9	14.5	7.8
2	09.12.2020	Кабанский р-н (Бурятия)	N 52.38 E 106.47	5.5	13.9	7.0
3	11.01.2021	р-он оз. Хубсугул (Монголия)	N 51.27 E 100.53	7.0	15.7	8.7

Измеренные значения скоростей сейсмических волн для каждого пункта регистрации землетрясений, использованные для дальнейших расчетов в виде сейсмогрунтовых моделей, показывают их незначительные различия (табл. 2), которые дают возможность прямого сравнения изучаемых параметров проявления сейсмичности рассматриваемых землетрясений.

Таблица 2. Обобщенные параметры расчетных сейсмогрунтовых моделей для грунтов первой категории по сейсмическим свойствам для Иркутска и Улаанбаатара.

№ модели, типовой разрез	h (м)	Vp (м/с)	Vs (м/с)	ρ (т/м^3)
1	2	3	4	5
Эталонная модель для г. Иркутска.				
№1 Коренные породы (модель эталона)	10	1900	960	2.4
	14	2550	1400	2.5
	16	3000	1730	2.6
	∞	3400	1990	2.7
Эталонная модель для г. Улаанбаатара.				
№2 Коренные породы (модель эталона)	10	2100	1110	2.4
	12	2400	1320	2.5
	18	3100	1810	2.6
	∞	3400	1990	2.7

Зарегистрированные землетрясения на участках, представленных сейсмогрунтовыми моделями (табл. 2), и их спектры, рассчитанные по методике, изложенной в работах [1, 2], представлены на рисунке 2. Количественно, для нашего случая, в области низких частот до 0.4-0.8 Гц значения спектров или сравнимы, или данные по «Улаанбаатару» несколько выше. То есть с увеличением эпицентрального расстояния интенсивность колебаний на указанных низких частотах может несколько увеличиться, хотя диапазон сравниваемых величин незначительный и поэтому может быть связан с аппаратурными погрешностями в области регистрации длиннопериодных колебаний. С увеличением частоты до 2-3 Гц отношение достигает 40-80, затем вплоть до 10 Гц оно имеет практически неизменный уровень и далее до 20 Гц резко увеличивается до 100 и более.

Общая ожидаемая закономерность, связанная с относительно большим затуханием высокочастотных колебаний с расстоянием, для конкретно рассматриваемых землетрясений, сохраняется. Но явно не проявляется при их непосредственном сравнении и это связано с

отмеченными выше особенностями проявления сейсмичности по землетрясению №2, направление от пунктов регистрации (Иркутск) на эпицентр землетрясения которого пересекает о. Байкал (рис. 1).

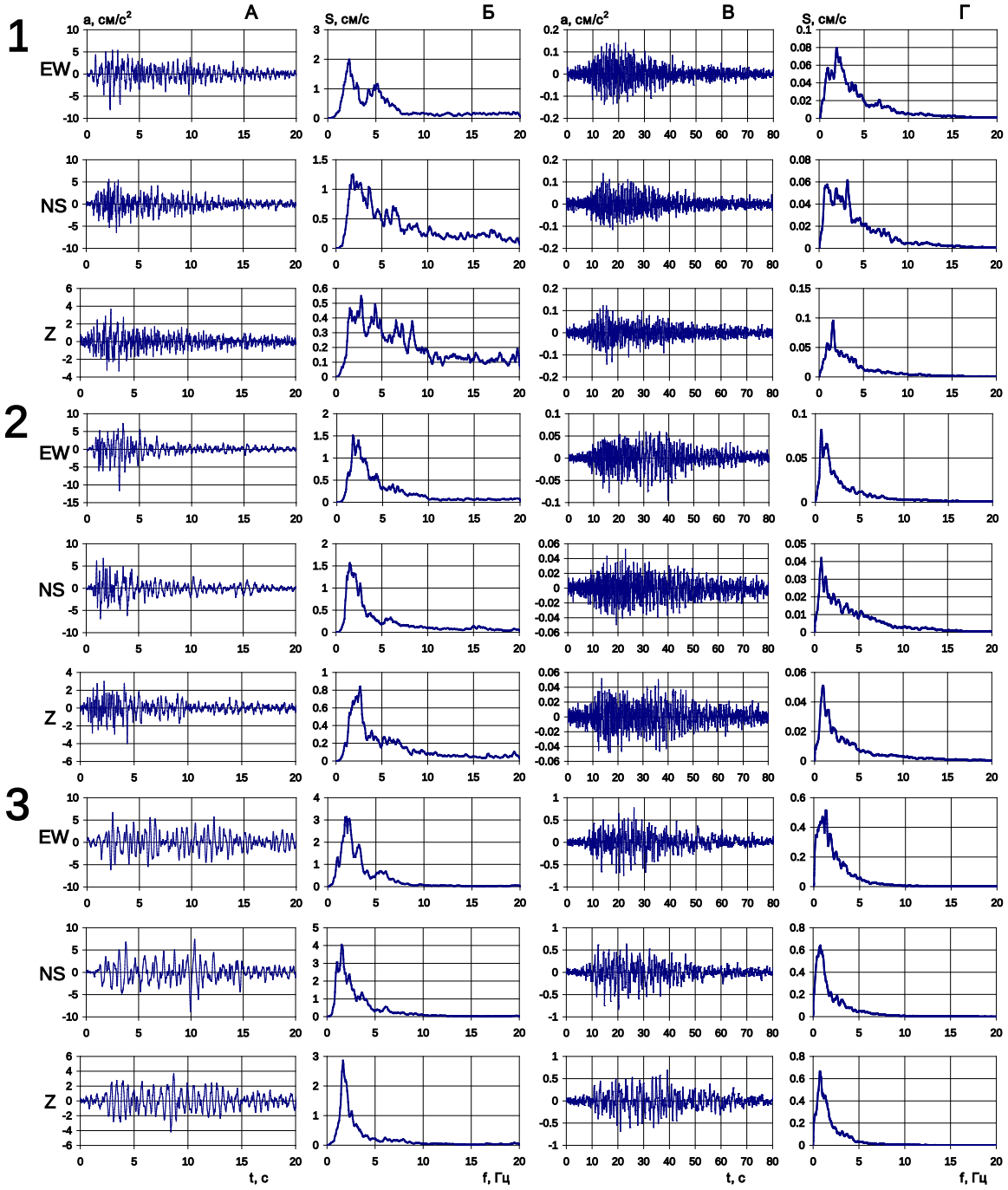


Рис. 2. Акселерограммы (А и В) и их спектры (Б и Г) зарегистрированные в Иркутске и Улаанбаатаре – соответственно, 1-3 – номера землетрясений в соответствии с таблицей 1.

Амплитудно-частотные характеристики, полученные при использовании расчетных спектров (рис. 2) и сейсмогрунтовых моделей (табл. 2), по методам тонкослоистых сред и спектральных отношений [6, 7] показывают, что верхние слои для моделей (табл. 2; рис. 3, синяя линия) практически мало искажают исходный сигнал в интервале частот до 20 Гц. В общем, это подтверждается и результатами расчетов по методу спектральных отношений (рис. 3, черная линия), осредненная по трем землетрясениям. Но в деталях для «Иркутска» в области низких и относительно высоких частот наблюдаются некоторые отклонения, которые могут быть связаны, прежде всего, с выбранными методами расчетов, особенностями распространения сейсмических волн и точностью построения сейсмических моделей. Сами частотные характеристики могут использоваться в дальнейшем для относительной оценки сейсмических воздействий на случай прогнозируемых сильных землетрясений для всего многообразия грунтовых условий исследуемых территорий региона

и для задания единого исходного сигнала для грунтов первой категории по сейсмическим свойствам, с учетом одинаково опасных для этих территорий зон ВОЗ (рис. 1).

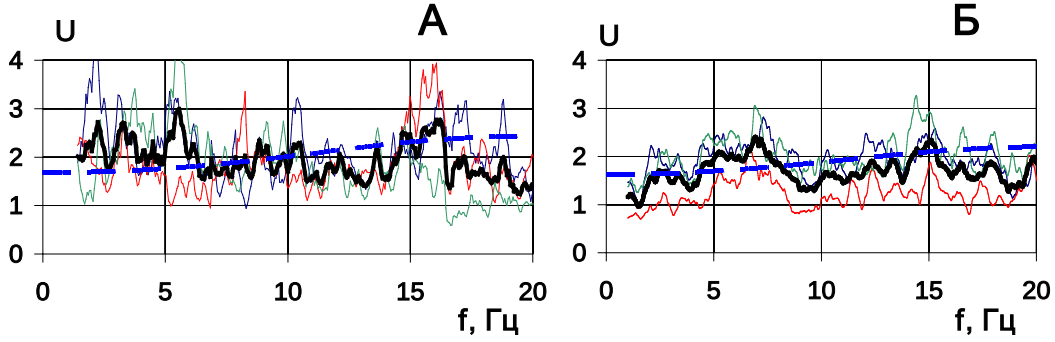


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики сейсмогрунтовых моделей для грунтов первой категории: А – «Иркутск», Б – «Улан-Батор»; синяя линия – землетрясение №1, красная – землетрясение №2, зеленая – землетрясение №3; черная линия сплошная рассчитанная по методу спектральных отношений, синяя пунктирная рассчитанная по методу тонкослоистых сред.

Анализ спектрального состава, расчетные частотные характеристики и выявленные относительные величины основных параметров спектров приводят к возможности в первом приближении сформировать единый исходный сигнал с учетом рассмотренных зон ВОЗ, для грунтов первой категории «Улаанбаатара» и «Иркутска». Предложен следующий подход к реализации поставленной задачи. Из выбранных землетрясений (табл. 1; рис. 2) находились средние спектры ускорений, которые, в свою очередь, принимались как характеристика для всей эпицентральной зоны целиком. Отдельно анализировались компоненты NS, EW, Z и для каждого отобранного землетрясения рассчитывались амплитудные и фазовые спектры с помощью прямого преобразования Фурье.

Далее нормированные сигналы для каждой компоненты использовались как исходные сигналы для модели эталона (табл. 2) так же для каждой компоненты. Результаты расчетов по методу тонкослоистых сред [6] представлены на рисунке 4. Вначале для модели эталонов (коренные породы, табл. 2) их окончательные результаты (максимальные ускорения) масштабировались на уровень принятой исходной сейсмичности равной 6 баллам для грунтов I категории по сейсмическим свойствам для «Улаанбаатара» и 7 баллов для «Иркутска». Это допускается нормативными документами при отсутствии достаточного статистического набора записей сильных землетрясений из рассматриваемых зон ВОЗ.

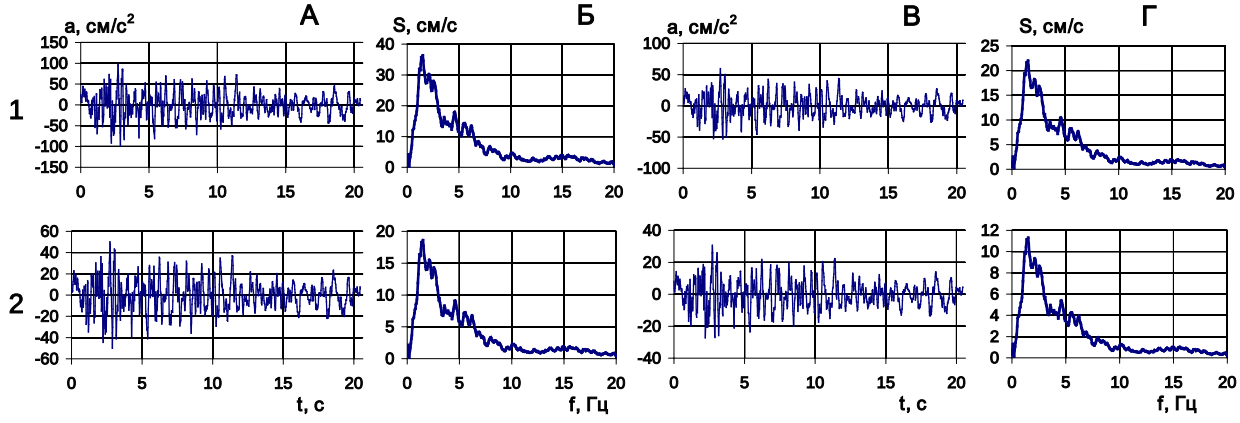


Рис. 4. Акселерограммы и амплитудные спектры для Иркутска (А, Б) и Улаанбаатара (В, Г), 1 – горизонтальная компонента, 2 – вертикальная компонента.

В результате реализации отмеченного подхода основные параметры сформированных акселерограмм (рис. 4) следующие: продолжительность колебаний 20 с; интервал частот спектра на уровне 0.5 от максимума для горизонтальной и вертикальной компоненты (NS и Z) меняется от 0.93 до 3.08 Гц; на уровне 0.7 от максимума – от 1.07 до 2.73. Максимальные значения основных максимумов спектра приходятся на частоту 1.51 Гц, а их значения достигают 22-35.3 см/с –

«Иркутск» и 11.3-16.6 см/с – «Улаанбаатар». Максимальное значение ускорений находится в интервале 60-96 см/см^2 – «Иркутск» и 31-55 см/см^2 – «Улаанбаатар».

Еще раз отмечается, что по частотному составу сформирован единый исходный сигнал, который по этому параметру может уточняться при использовании вновь произошедших сильных землетрясений, как из рассматриваемых, так и из других опасных зон ВОЗ. По амплитудному составу он может масштабироваться в зависимости от прогнозируемой исходной сейсмичности для конкретных территорий.

Анализ спектрального состава произошедших сильных землетрясений и рассмотрение выбранных станций, как пунктов, расположенных на одинаковых по сейсмическим категориям грунтах, позволяет использовать их записи для оценки сейсмических воздействий, отвечающих исходной сейсмичности рассматриваемых территорий. Это дает возможность их своевременного использования при планировании строительства и дальнейшего уточнения способов формирования исходных сигналов, при включении в рассмотрение сильных землетрясений из других наиболее опасных зон ВОЗ, для прогноза максимальных сейсмических воздействий Байкало-Монгольского региона.

Заключение

Дан сравнительный спектральный анализ трех сильных землетрясений Байкало-Монгольского региона, зарегистрированных на однотипных по сейсмическим свойствам грунтовых условиях на территориях городов Иркутска и Улаанбаатара. Несмотря на предварительный характер анализа, он дал возможность показать реальное влияние рассматриваемых зон ВОЗ на конкретные параметры сейсмических воздействий.

Непосредственное сравнение прогнозируемых параметров для «Иркутска» и «Улаанбаатара» показывает ожидаемые различия по максимальным ускорениям и соответственно по максимальным значениям спектров в пределах одного-двух порядков, которые находятся в соответствии с данными анализа отношений сравниваемых спектров для одних и тех зарегистрированных землетрясений, которые значительно различаются по эпицентральному расстоянию. Частоты основных максимумов спектра, по этой же причине, для «Улаанбаатара» по сравнению с «Иркутском» смещаются в низкочастотную область в среднем на 1-1.5 Гц.

Общая закономерность, связанная с относительно большим затуханием высокочастотных колебаний с расстоянием, для конкретно рассматриваемых землетрясений, сохраняется. Но явно не проявляется при их непосредственном сравнении и это может быть связано с различиями направления и пути распространения сейсмических волн, что требует дальнейшего подтверждения.

На основе анализа спектров по трем землетрясениям сформирован единый исходный сигнал, который по частотному и амплитудному составу может уточняться при использовании вновь произошедших сильных землетрясений из рассматриваемых и других опасных зон ВОЗ. По амплитудному составу он может масштабироваться в зависимости от прогнозируемой исходной сейсмичности для конкретных рассматриваемых территорий, что и выполнено в первом приближении для грунтов первой категории по сейсмическим свойствам для «Иркутска» и «Улаанбаатара». Проведенный спектральный анализ является основой для реализации прогноза сейсмических воздействий сильных землетрясений Байкало-Монгольского региона.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта №20-55-44011.

Список литературы

1. *Дженкинс Г., Баттс Д.* Спектральный анализ и его приложения. Т. 1. М.: Мир, 1972. 289 с.

2. *Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю.* Изучение динамических характеристик землетрясений Байкальской рифтовой зоны с целью формирования исходных сейсмических сигналов // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С. 1–11.

3. *Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С.П., Демьянович В.М., Батсайхан Ц., Баяраа Г.* Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. 420 с.

4. Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. М.: Наука, 1985. 222 с.

5. Литосфера Центральной Азии. Новосибирск. Наука, 1996. 238 с.

6. Расчетные методы в СМР // Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М.: Наука, 1988. С. 196–130.

7. *Nakamura Y.* A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly report of Railway Technical Research Institute. 1989. V. 30. P. 25–33.

УДК 550.34

ХУБСУГУЛЬСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 12 ЯНВАРЯ 2021 Г. С $M_L = 6.9$ (СЕВЕРНАЯ МОНГОЛИЯ)

Еманов А.Ф.[1], Еманов А.А. [1,3], Чечельницкий В.В.[2], Шевкунова Е.В. [1], Радзиминович Я.Б.[2,4], Фатеев А.В.[1,3], Кобелева Е.А. [2], Гладышев Е.А.[1], Арапов В.В. [1], Артемова А.И. [1], Подкорытова В.Г. [1]

[1] Алтае-Саянский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Новосибирск,
[2] Байкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Иркутск
[3] Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск
[4] Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск
emanov@gs.sbras.ru

Введение

Хубсугульское землетрясение 12.01.2021 г. с $M_L = 6.9$ и глубиной очага порядка 8 км произошло в Северной Монголии недалеко от границы с Российской Федерацией на восточной границе Тувино-Монгольского блока и вызвало интенсивный афтершоковый процесс. Данный блок испытывает поднятие и одновременно к нему приурочены рифтовые впадины [6, 7, 10]. Столь сильного землетрясения в районе западного фланга оз. Хубсугул до сих пор не происходило. Землетрясение произошло в районе одноименного разлома и вызвало интенсивный афтершоковый процесс на участке между двумя изломами. Сейсмический потенциал Хубсугульского разлома оценивался в M_{Max} = 7-7.5 [5], и данное землетрясение в соответствии с геологическими данными не является максимально возможным. Охваченный афтершоками участок разлома уходит от озера в северо-западном направлении. Сейсмически активизирован участок границы древнего Тувино-Монгольского микроконтинента. Учитывая, что сейсмическая активизация после Бусингольского землетрясения 1991 года еще не завершилась, в Тувино-Монгольском блоке наблюдаются две сильные активизации, способные оказать значимое влияние на эволюцию его сейсмичности.

Тектоническая позиция очага и история сейсмичности в эпицентральной области

В анализе сейсмичности обычно рассматривается Хубсугульская система грабенов Северной Монголии как единое целое [5, 8, 12]. При этом рассматривается сейсмичность Бусингольского грабена, состоящего из трех линейно вытянутых впадин, Дархатского грабена и Хубсугульского.

В Прихубсугульскую неотектоническую зону входят Хубсугульская впадина и параллельные ей Дархатская и Бусингольская, а также разделяющие их поднятия [9]. Впадина оз. Хубсугул – полуграбен с крутым западным и пологим восточным бортом. Борта Хубсугульской впадины обрамляют разломы различной направленности. По результатам анализа стресс-тензоров по геологическим данным район характеризуется режимом транспрессии (сжатие со сдвигом) [9].

На рис. 1 представлена карта эпицентров землетрясений с $M_L \geq 4$ в Прихубсугульской зоне. Ближайшие к эпицентру крупнейшие землетрясения – Мондинское землетрясение 1950 г. с магнитудой 7.0 и Бусингольское землетрясение 1991 г. с магнитудой 6.5. Мондинское землетрясение произошло в структуре Тункинской впадины, где сдвиговые компоненты по геологическим данным сочетаются со сбросовыми и даже доминируют над сбросовыми [8]. Мондинское землетрясение произошло хотя и не далеко от Хубсугульского, но в другой структуре и в условиях иного режима напряженного состояния недр. Бусингольское землетрясение 1991 г. произошло в пределах Тувино-Монгольского блока, в рифтовой системе впадин Северной Монголии. После этого землетрясения сформировался интенсивный пульсирующий афтершоковый процесс, продолжающийся уже почти три десятилетия [2, 3]. При этом главное событие произошло не на главном Бусингольском разломе, вытянутом вдоль одноименной впадины, а на оперяющем разломе, уходящем в Шишхидское нагорье. Пульсирующий режим связан с продвижением активизации вдоль оперяющего разлома от Бусингольской впадины [4].

До Хубсугульского землетрясения крупных событий и интенсивно развивающихся сейсмических активизаций и Дархатской впадине и в Хубсугульской не наблюдалось. Пространство Дархатской впадины заполнено землетрясениями с $M_L = 4$. В Хубсугульской впадине редкие землетрясения с $M_L = 5$ наблюдались в северной и южной частях, а центральная часть впадины и особенно эпицентральная область Хубсугульского землетрясения не были сейсмически активными.

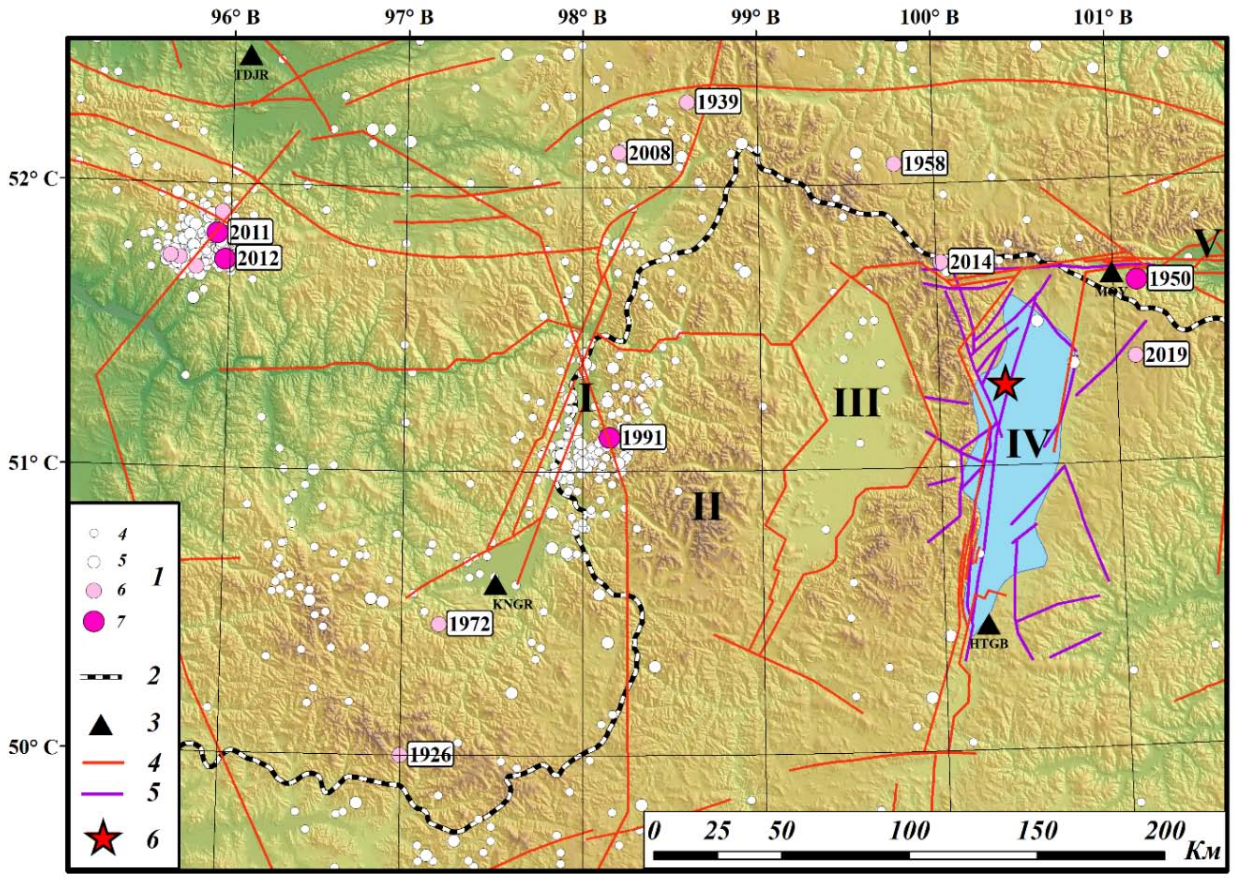


Рис. 1. Карта крупных землетрясений в Тувино-Монгольском блоке до Хубсугульского землетрясения 2021 г. 1 – магнитуда; 2 – государственная граница; 3 – сейсмическая станция; 4 – неотектонический разлом по [11]; 5 – неотектонический разлом по [9]; 6 – эпицентр Хубсугульского землетрясения 12 января 2021 г. *с* M_L = 6.9. Римскими цифрами на карте обозначены: I – Бусингольский грабен; II – Шишхидское нагорье; III – Дархатский грабен; IV – Хубсугульский грабен; V – Тункинская впадина.

Территория Северной Монголии обследована палеосейсмологическим методом [5, 8, 12]. В районе эпицентра Хубсугульского землетрясения в предыдущие годы не было обнаружено следов крупных землетрясений как по данным палеогеологии, так и по данным сейсмологических наблюдений [5]. По данным сети временных станций в 1986-87 гг. в Прихубсугулье были зарегистрированы несколько слабых землетрясений на разломе, где произошло рассматриваемое в данной статье землетрясение; был сделан вывод [5], что в районе Хубсугульского разлома, вытянутого вдоль западного борта одноименной впадины, идет процесс накопления энергии и вероятным является возникновение крупных землетрясений вдоль этого разлома.

В полном соответствии с результатами предшествующих работ находятся данные о землетрясениях, представленные на рис. 1. К 2021 г. по сейсмической активности структур данного района значимых изменений относительно 90-х годов прошлого века не наблюдается.

Параметры очага главного толчка и афтершокового процесса

На рис. 2 представлена карта плотности афтершоков Хубсугульского землетрясения за первые месяцы после главного события. Понятно, что преимущественно мы имеем дело с развитием афтершокового процесса вдоль разломной зоны, но в то же время сейсмический процесс затронул области, выходящие за ее рамки (рис. 2).

Тектоническое строение эпицентральной зоны рассматривалось в ряде работ [6], но наиболее подробная схема сетки разломов для эпицентральной области опубликована в [9]. Именно эта сетка разломов совмещена с картой плотности афтершоков (рис. 2).

Очаговая область совпадает с тектоническим нарушением, уходящим в сторону от оз. Хубсугул и являющимся границей Тувино-Монгольского блока (микроконтинента). Плотность афтершоков вдоль активизированной области не равномерна. По-видимому, это связано с наличием оперяющих разломов справа и, как следствие, со сложной блоковой структурой земной коры в активизированной области.

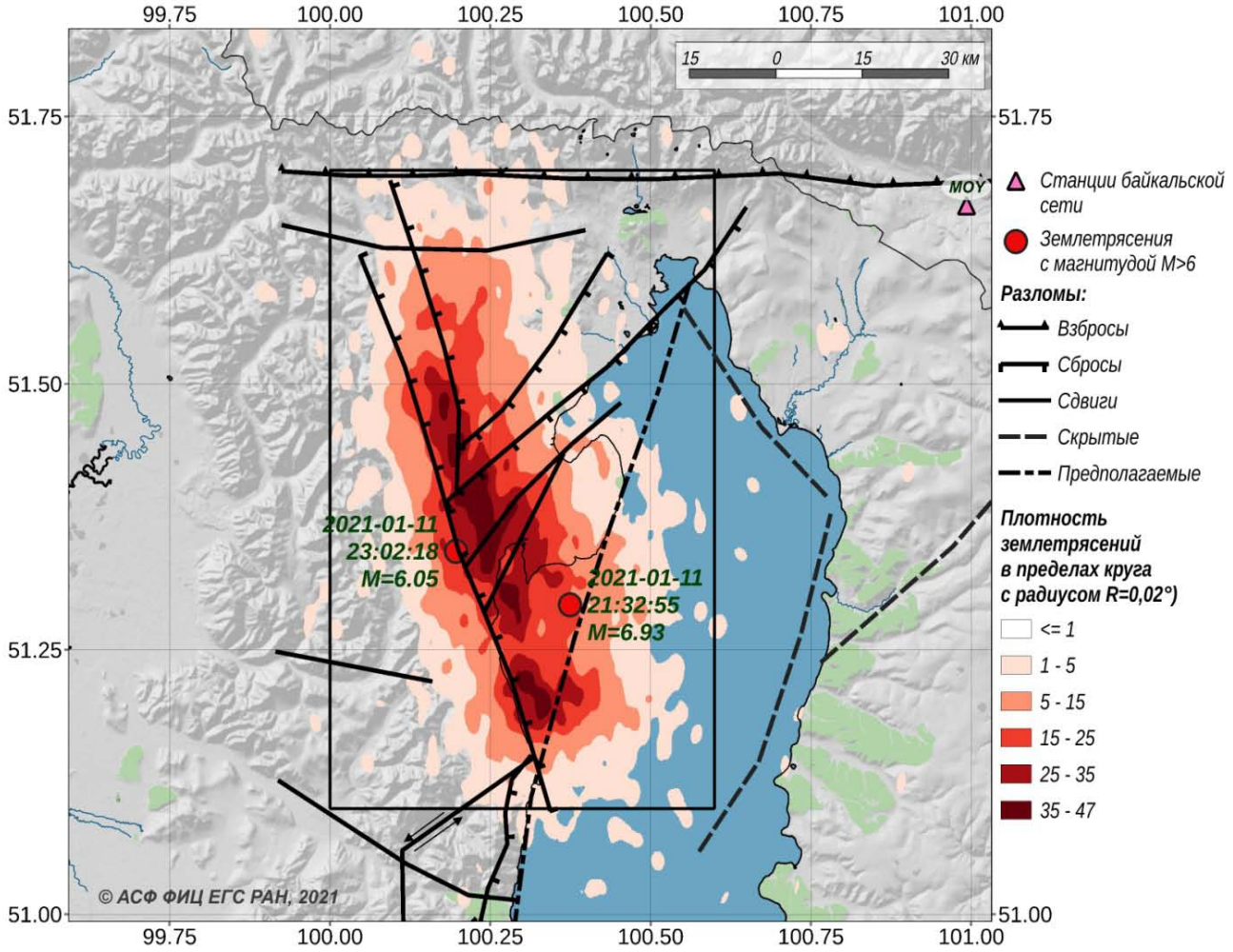


Рис. 2. Карта плотности афтершоков Хубсугульского землетрясения за период январь – март 2021 г. Разломы соответствуют [9].

На рис. 3 дано представление развития афтершокового процесса во времени. Судя по числу афтершоков в единицу времени и по числу землетрясений с максимальными энергиями, наблюдается медленное ослабление афтершокового процесса со временем. Выполнена полная обработка афтершоков за январь-май 2021 г., но как следует из рис. 3, землетрясения с магнитудами ниже 1-1.5 в афтершоковом процессе практически не наблюдаются. Вероятнее всего это связано с недостаточной представительностью регистрации в эпицентральной области.

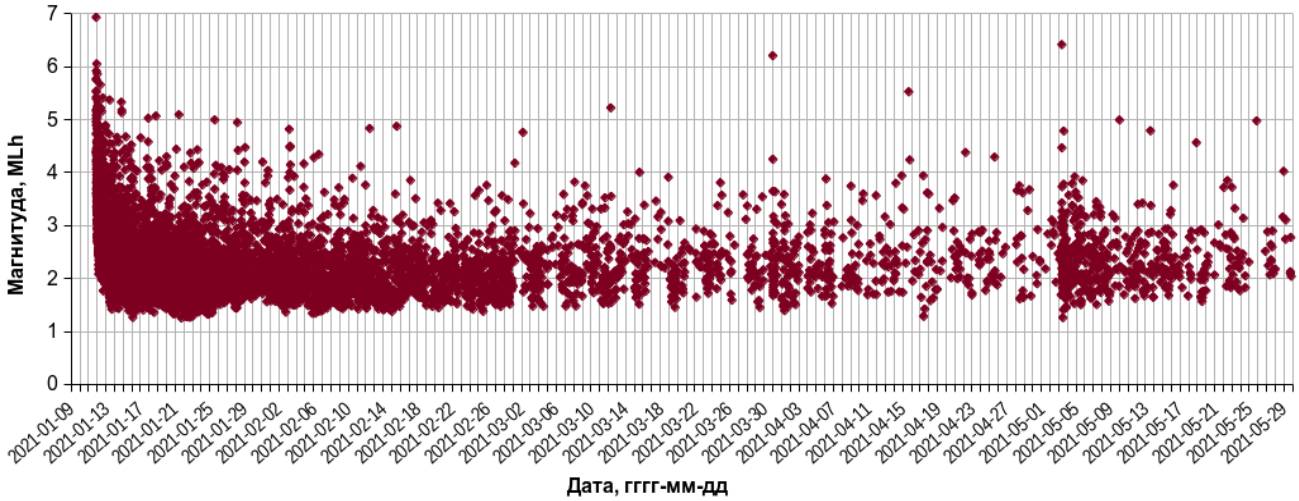
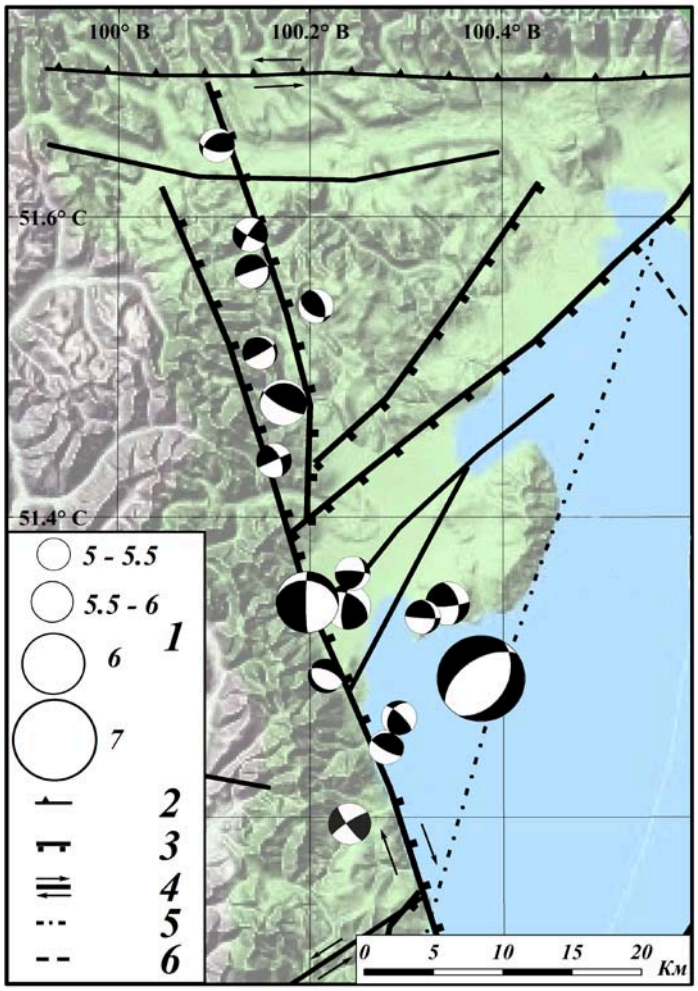


Рис. 3. Развитие афтершокового процесса Хубсугульского землетрясения во времени.

Представительной регистрацию в данном районе можно считать, начиная с M_L = 2-2.5. Такая оценка представительности получена, исходя из размеров линейной части графика повторяемости землетрясений, угол наклона которой характеризуется зависимостью $LgN = -0.72M_L+5.0$, где N – количество землетрясений. Большое количество афтершоков позволило в течение двух месяцев накопить количество событий, достаточных для получения линейной зависимости в логарифмическом масштабе, характерной для периода устоявшегося развития сейсмичности. Коэффициент наклона графика повторяемости (-0.72) близок к таковому для аналогичного графика для Алтае-Саянской области по всем историческим и инструментальным данным (-0.77).



На рис. 4 представлены механизмы афтершоков, для которых получены наиболее уверенные данные по ориентации нодальных плоскостей. Главное событие является практически чистым сбросом, только с небольшой сдвиговой составляющей. Ось растяжения горизонтальна, а ось сжатия незначительно наклонена, что вполне согласуется с существующей тектонической установкой рифтогенеза в районе Хубсугульской впадины. Механизм наиболее сильного афтершока с $M_L = 6$ также имеет значительную сбросовую составляющую, практически переходящую во взрез, тогда как более слабые события отражают перераспределение напряжений на оперяющих разломах и блоковой структуре более низкого ранга, их механизмы распределены более хаотично.

Рис. 4. Механизмы очага главного события и некоторых афтершоков Хубсугульского землетрясения. Стереограммы механизмов очагов приведены в проекции нижней полусферы.
1 – магнитуда; 2-6 – неотектонический разлом по [9]: 2 – взбросы; 3 – сбросы; 4 – сдвиги; 5 – скрытые; 6 – предполагаемые.

Сильные движения и макросейсмические данные

Для Хубсугульского землетрясения получены записи сильных движений на сейсмических станциях Алтае-Саянского и Байкальского филиалов ФИЦ ЕГС РАН и станций сейсмической сети Монголии. Наиболее высокое значение пиковых ускорений грунта (PGA) зарегистрировано на сейсмической станции «Монды» (MOY) на расстоянии 57 км от эпицентра и составило 54.6 см/с^2. Значения PGA такой величины регистрируются в Южном Прибайкалье сравнительно редко, что позволяет рассматривать запись станции «Монды» как существенное дополнение к базе данных о сильных движениях грунта на территории Восточной Сибири. С увеличением гипоцентрального расстояния зарегистрированные значения PGA и PGV постепенно снижаются и на дистанции 551 км (станция «Онгурен») пиковое ускорение составило лишь 1.5 см/с^2.

Хубсугульское землетрясение ощущалось на очень большой площади (рис. 5), охватывающей территорию Северной Монголии и несколько субъектов Российской Федерации. Максимальная наблюденная интенсивность сотрясений, оцениваемая в VI–VII баллов, отмечена в п. Монды на эпицентральном расстоянии 57 км. К западу от эпицентра ощутимые колебания распространились до г. Новосибирск (1230 км, II балла), где они были замечены на верхних этажах высотных жилых домов; в восточном направлении макросейсмические эффекты землетрясения отмечены на расстоянии до 900 км в г. Чита (III балла)

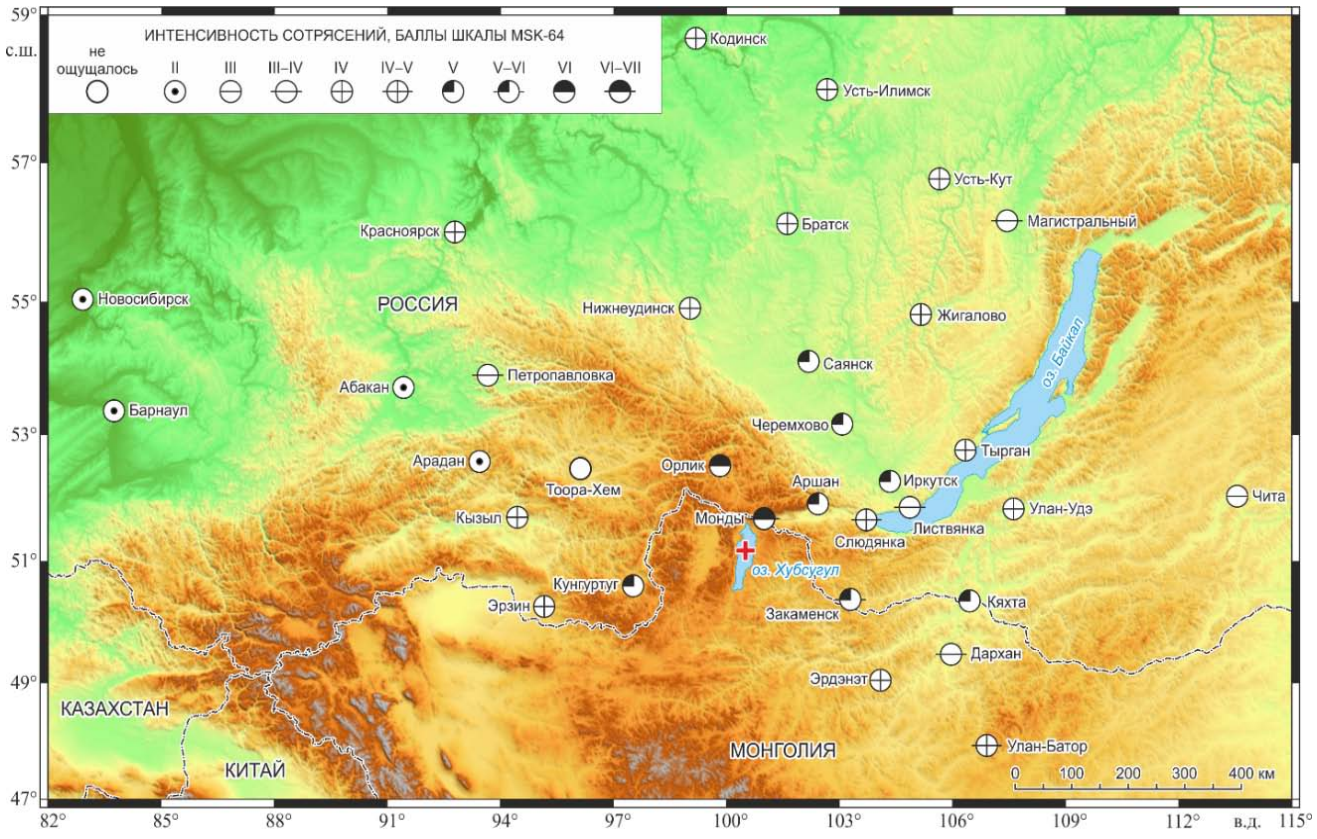


Рис. 5. Макросейсмические проявления Хубсугульского землетрясения. Красным крестом обозначен эпицентр землетрясения по инструментальным данным.

Выводы

Хубсугульское землетрясение произошло в районе одноименного разлома и вызвало интенсивный афтершоковый процесс на участке этого разлома между двумя изломами. Охваченный афтершоками участок разлома уходит от озера в северо-западном направлении. Тектонически он является восточной границей Тувино-Монгольского микроконтинента, с которым связано формирование системы субпараллельных рифтовых впадин, перпендикулярных другим впадинам Байкальской рифтовой зоны. По данным сейсмического районирования разлом охарактеризован как зона ВОЗ с вероятностью возникновения землетрясений с магнитудами 7÷7.5.

Как инструментальных, так и палеогеологических данных о высокой сейсмической активности в эпицентральной зоне Хубсугульского землетрясения нет. На основе анализа развития сейсмичности около рифтовых впадин Бусингольской и Дархатской был дан прогноз подготовки крупного землетрясения в районе Хубсугульского разлома [5], который данным землетрясением подтвержден. Афтершоки только в первые месяцы после главного события (более 5 тысяч) позволили сделать вывод о неоднородности площадного развития афтершоков и наличия связи с однобокой оперяющей структурой разломов, обеспечивающей блоковое строение эпицентральной области.

При Хубсугульском землетрясении по данным изучения сильных движений и макросейсмических проявлений и на основе регионального макросейсмического уравнения для Байкальской рифтовой зоны дана оценка интенсивности сотрясений в эпицентре в IX баллов. Отмечено более слабое затухание колебаний в пространстве, чем это было при Быстринском землетрясении 2020 г. [1], что объясняется различиями в частотах колебаний.

Список литературы

1. *Гилева Н.А., Кобелева Е.А., Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Чечельницкий В.В.* Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. (Mw=5.5) в Южном Прибайкалье: Предварительные результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 4. С. 55–71.

2. *Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В.* Сейсмические активизации в Белино-Бусингольской зоне / Физическая мезомеханика. 2010. Т.13, спец. выпуск. С. 72–77.

3. *Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В.* Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской горной области / Физическая мезомеханика. 2005. Т.8. №1. С. 49–64.

4. *Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Рудаков А.Д.* Общее и индивидуальное в развитии афтершоковых процессов крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области / Физическая мезомеханика. 2006. Т.9. №1. С. 33–44.

5. *Кочетков В.М., Хилько С.Д., Зорин Ю.А., Ружич В.В., Турутанов Е.Х., Арвисбаагар Н., Баясгалан, Кожевников В.М., Эрдэнбелэг Б., Чипизубов А.В., Монхоо Д., Аниканова Г.А., Ключевский А.В., Найдич В.И., Баяр Г., Боровик Н.С., Гилева Н.А., Адьяа М., Балжинням И., Джурик В.И., Потапов В.А., Юшкин В.И., Дугармаа Т., Цэмбэл Л.* Сейсмотектоника и сейсмичность Прихубсугулья. Новосибирск: Наука, 1993. 182 с.

6. *Леви К.Г., Шерман С.И. (отв. ред.).* Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 297 с.

7. *Леви К.Г., Шерман С.И., Саньков В.А.* Современная геодинамика Азии: карта, принципы составления, геодинамический анализ / Геотектоника. 2009. №2. С. 78–93.

8. *Молнар П., Курушин Р.А., Кочетков В.М., Демьянович М.Г., Борисов В.А., Ващилов Ю.Я.* Деформация и разрывообразование при сильных землетрясениях в Монголо-Сибирском регионе / Глубинное строение и геодинамика Монголо-Сибирского региона (сборник). *Н.А. Логачев, В.М.Кочетков, Ю.А.Зорин* (ред.). Новосибирск: Наука, 1995. С. 5–55.

9. *Парфеевец А.В., Саньков В.А.* Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой зоны / Отв. ред. Леви К.Г. Новосибирск: Академ. изд-во ГЕО, 2006. 151 с.

10. *Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Леви К.Г., Ашурков С.В., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Кале Э., Девершер Ж., Верноль М., Бехтур Б., Амаржаргал Ж.* Современные движения земной коры Монголо-Сибирского региона по данным GPS-геодезии / ДАН. 2003. Т.392. №6. С. 792–795.

11. *Трифонов В.Г.* Неотектоника Евразии. (Тр. ГИН РАН; Вып. 514). М.: Научный мир, 1999. 242 с.

12. *Хилько С.Д., Курушин Р.А., Кочетков В.М., Мишарина Л.А., Мельникова В.И., Гилева Н.А., Ласточкин С.В., Балжинням И., Монхоо Д.* Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии // Тр. совместной советско-монгольской научно-иссл. геол. экспедиции / М.: Наука, 1985. Вып. 41. 224 с.

УДК 550.34

СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ТЕРРИТОРИИ ПРИМОРСКОГО КРАЯ И ЯПОНСКОГО МОРЯ ЗА ПЕРИОД 2019-2020 ГОДЫ.

Лисунов Е.В.

Региональный информационно-обрабатывающий центр «Владивосток» ФИЦ ЕГС РАН,
г. Владивосток, lisunov.evgeniy@gmail.com

Введение

Территория приморского края и прилегающей акватории Японского моря являются относительно спокойным сейсмоактивности регионом с точки зрения сильных сейсмических событий. Ежегодно, за время работы Регионального Информационно-обрабатывающего Центра «Владивосток» (РИОЦ), здесь регистрируется в среднем от 15 до 30 сейсмических событий [2, 4]. Как правило, большая часть очагов землетрясений расположена на больших глубинах (100-600 км). Оставшиеся мелкофокусные землетрясения являются достаточно слабыми, с магнитудами 1-3. Однако иногда происходят сейсмические события, которые ощущаются местными жителями и вызывают небольшие колебания зданий. Известно о большом количестве проявлений сейсмической активности в Лазовском, Хасанском, Тернейском и в Пожарском районах, а также во Владивостоке, Артёмовском городском округе и в близи озера Ханки [1, 3]. Помимо территории Приморского края, наблюдение за акваторией Японского моря представляет не меньшую важность. История наблюдений показывает, что достаточно сильные землетрясения в Японском море способны вызвать цунами с высотой волны до 4-5 метров на восточном побережье края. Последнее ощутимое ценами произошло в 1993 году в результате землетрясения магнитудой 7.7 в районе острова Хоккайдо, Япония. Все эти случаи подтверждают важность и необходимость непрерывного сейсмического мониторинга в регионе. В сети РИОЦ «Владивосток» находится 4 сейсмостанции: VLAR-RU (Владивосток), MSH (м. Шульца), PSTR-RU (Посьет), PLTR-RU (Полтавка). Основная деятельность СП СПЦ РИОЦ «Владивосток» - круглосуточный мониторинг землетрясений Приморского края, и ближайших приграничных территорий, а также Японского моря, в зоне ответственности – 1000 км от г. Владивосток.

Результаты наблюдений

За период 2019-2020 гг., в радиусе 500 км от г. Владивосток, было зарегистрировано 42 сейсмических события, список которых представлен в таблице 1.

Таблица 1. Список зарегистрированных событий.

№	Дата	Время UTC	с.ш.	в.д.	Магнитуда	Глубина (км)
1	01.01.2019	22:20:33	41.3	129.50		0.00
2	14.01.2019	12:22:45	39.4	130.10	4.00	38.00
3	23.01.2019	01:34:00	42.2	129.10	2.00	22.00
4	07.02.2019	11:09:06	42.5	130.50	2.15	4.00
5	01.03.2019	03:21:58	43.4	132.10	2.55	12.00
6	05.03.2019	09:03:38	41.1	130.40	2.65	0.00
7	20.03.2019	19:41:03	41.8	128.50	3.65	4.00
8	30.03.2019	04:54:02	42	129.40	3.10	1.00
9	22.04.2019	00:47:42	43.1	133.60	4.50	450.00
10	22.04.2019	08:55:43	42.2	129.30	2.85	0.00
11	02.05.2019	11:17:47	42.8	129.30	4.10	0.00
12	19.05.2019	02:19:49	41.4	130.70	2.60	45.00
13	22.05.2019	04:03:10	42.7	131.60	2.30	120.00
14	03.06.2019	11:48:55	42.9	129.70	2.80	46.00
15	10.06.2019	23:05:07	42.7	132.70	3.45	6.00
16	12.06.2019	08:53:07	42.9	129.80	2.15	33.00
17	27.06.2019	13:58:34	42.4	130.90	3.10	0.00
18	01.07.2019	01:59:59	42.6	130.30	2.85	110.00
19	15.07.2019	22:05:37	42	130.90	4.20	567.00
20	25.07.2019	00:27:25	42.7	131.10	1.80	0.00

Окончание таблицы 1. Список зарегистрированных событий.

21	29.07.2019	14:27:13	42.7	130.80	2.85	15.00
22	11.08.2019	20:54:04	42	130.70	2.95	0.00
23	22.08.2019	10:01:23	43.3	130.20	3.10	16.00
24	02.09.2019	16:53:31	39.2	133.90	3.70	535.00
25	30.09.2019	17:56:07	43.4	136.30	4.90	344.00
26	02.10.2019	11:04:15	43.4	136.70	3.85	296.00
27	04.10.2019	03:37:06	43.2	130.70	2.65	16.00
28	13.10.2019	04:35:01	41.6	133.90	4.10	450.00
29	13.11.2019	04:24:16	42.5	131.20	4.90	602.00
30	19.01.2020	22:53:14	42	136.00	4.70	360.00
31	24.02.2020	03:22:19	44.1	131.80	2.40	4.00
32	24.02.2020	13:15:32	42.9	131.20	1.85	0.00
33	26.02.2020	05:35:02	42.6	131.10	1.20	22.00
34	25.04.2020	01:31:29	43	131.70	2.90	6.00
35	25.05.2020	22:24:47	43.3	132.10	3.10	6.00
36	31.05.2020	05:27:52	39.9	135.30	4.80	33.00
37	10.06.2020	05:40:24	42	131.70	2.30	0.00
38	14.07.2020	08:46:00	42.5	131.30	4.10	562.00
39	14.07.2020	22:39:06	42.7	132.70	2.20	22.00
40	26.11.2020	03:34:26	43.2	130.60	3.10	0.00
41	20.12.2020	08:30:54	42.6	129.10	2.95	0.00
42	27.12.2020	05:07:02	43.6	131.90	2.60	15.00

Из представленного списка видно, что в 2019 году произошло 29 землетрясений, в 2020-м всего 13, из которых:

- 26 мелкофокусных землетрясений (0-30 км);
- 5 с глубинами от 30 до 100 км;
- 11 глубокофокусных землетрясений с глубинами 100-600 км.

На рис. 1 показана карта эпицентров землетрясений. Видно, что основные эпицентры сосредоточены в южной части Приморского края и приграничных районах Китая.

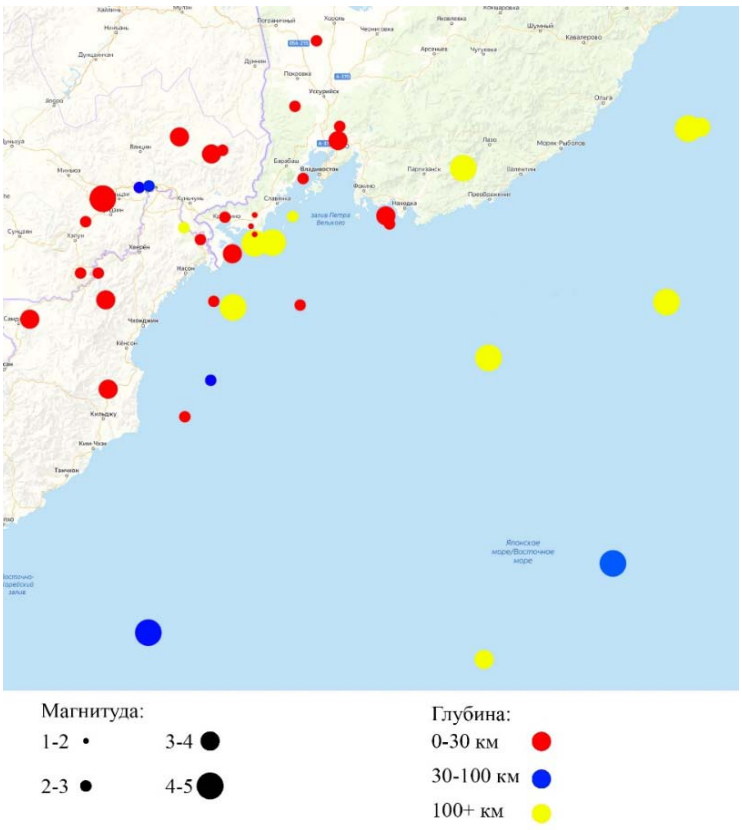


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений.

Из всего списка, хочется отметить некоторые наиболее интересные землетрясения. Одно из них произошло 25 мая 2020 года в пригороде г. Владивосток. Магнитуда составила 3, глубина 6 км. Ввиду малой глубины и того факта, что эпицентр располагался в населенном районе, были сообщения от местных жителей, которые ощущали небольшие колебания домов, легких дребезг посуды. Подобные сообщения поступали также и с окраины Владивостока, на расстоянии 20 км от эпицентра.

Еще одно подобное землетрясение произошло в тот же день в море на расстоянии 4 км от острова Русский, г. Владивостока. Магнитуда составила 2.9, глубина 6 км. Сообщений от жителей острова о каких-либо ощущениях не поступало.

Также хочется отметить два землетрясения, произошедших вблизи города Находка. Эпицентры находились в море на расстоянии 15 км от города. Первое произошло 10 июня 2019 года, магнитуда составила 3.4, глубина 6 км. Второе произошло в том же месте 25 мая 2020 года с магнитудой 2.2 на глубине 22 км. Оба землетрясения, по словам местных жителей, не ощущались. По статистике наблюдений, в данном месте часто регистрируются мелкофокусные землетрясения с магнитудами от 2 до 4.

На карте эпицентров также видно, что большинство глубокофокусных землетрясений происходили в море. Континентальная часть характеризуется более поверхностными землетрясениями, но с более слабой магнитудой.

На рис. 2 показаны распределения глубин гипоцентров и магнитуд.

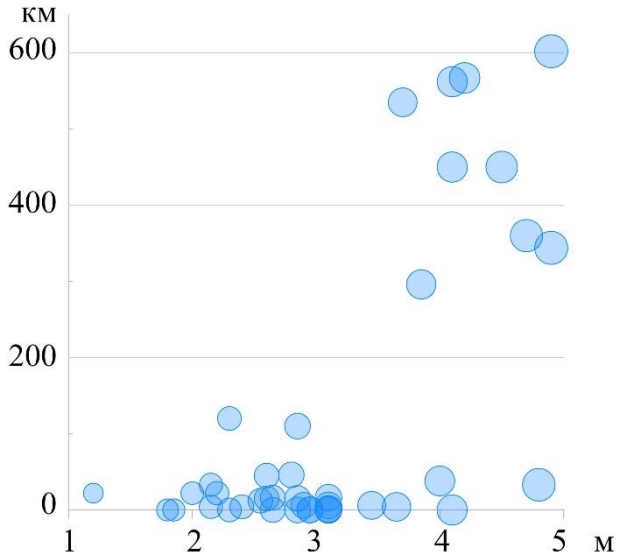


Рис. 2. Распределение глубин гипоцентров.

На рисунке видно характерное для данного региона распределение глубин очагов землетрясений, которые подтверждаются многолетними наблюдениями. По вертикальной шкале указана глубина очагов, по горизонтальной – магнитуда.

В данном случае, все землетрясения разделены на две группы. Большая часть сосредоточена на глубинах до 40 км. С увеличением глубины, количество землетрясений уменьшается. На глубинах от 100 до 300 км, сейсмическая активность за данный период была низкой.

Далее, с увеличением глубины вырисовывается вторая группа землетрясений, которая выглядит не столь плотной, как первая, но является более протяженной и распространяется от 300 до 600 километров. Что касается магнитуд землетрясений, то большинство из них происходят на этих глубинах. Однако, на рис. 2 видно, что в выбранный период также произошло несколько сильных землетрясений с магнитудами от 4 до 5 на низких глубинах, до 40 км. Максимальный разброс по магнитудам наблюдается в первой группе землетрясений на глубинах до 30-40 км. Но в целом, большинство глубокофокусных землетрясений характеризуются более высокими значениями магнитуд.

Распределение магнитуд за выбранный период представлено на рис. 3. По вертикальной шкале отмечено количество землетрясений, по горизонтальной – их магнитуда. Практически половина зарегистрированных землетрясений произошли с магнитудами 2-3. Их количество

составляет 19 событий. Анализ прошлых наблюдений подтверждает то, что подавляющее количество землетрясений в заданном регионе происходит с подобными магнитудами. По 10 землетрясений произошли с магнитудами от 3 до 4 и от 4 до 5. И всего 3 землетрясения зарегистрировано с магнитудами от 1 до 2.

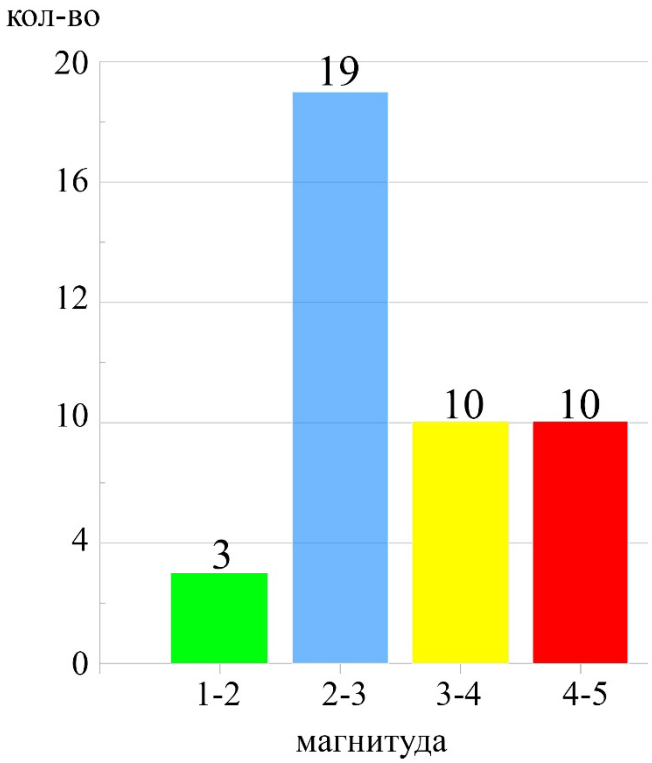


Рис. 3. Распределение магнитуд землетрясений.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что сейсмическая активность территории Приморского края, ближайших пограничных районов и Японского моря остается относительно стабильной. В среднем, большинство землетрясений происходит с магнитудами от 2 до 3. Наиболее сильные события происходят в море и являются глубокофокусными. Однако, нужно принять к сведению произошедшее землетрясение в пригороде г. Владивостока, а также периодически повторяющиеся землетрясения вблизи г. Находка.

Необходимо продолжать наблюдения за сейсмической обстановкой региона, особо уделяя внимание на зонах с часто повторяющимися сейсмическими событиями, особенно на те, что располагаются вблизи густонаселенных мест, а также дополнительно исследовать механизмы формирования землетрясений в Приморском крае.

Список литературы

1. *Горелов П.В., Шкаборня Н.Г.* Современная сейсмотектоническая активность территории Приморского края // Материалы XII Международной сейсмологической школы. 2017. С. 121–124

2. *Лисунов Е.В.* Регистрация сейсмических событий Приморского края и Японского моря за 2017 год с использованием сейсмографов и гравиметра // Материалы XIII Международной сейсмологической школы. 2018. С. 141–143.

3. *Лисунов Е.В.* Сейсмическая активность территории Приморского края за период 2014-2018гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции. Ответственный редактор Д.В. Чебров. 2019. С. 83–85.

4. *Наумов С.Б., Сайдуллоев У.Р.* Геофизическое исследование для целей детального сейсмического районирования Хасанского городского поселения Приморского края // Материалы XIII Международной сейсмологической школы. 2018. С. 231–233.

УДК 550.343.6

ПРЕЦЕДЕНТНО-ЭКСТРАПОЛЯЦИОННАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ В РАЙОНЕ КАМЧАТКИ ПО СОСТОЯНИЮ НА 1 АВГУСТА 2021 Г.

Малышев А.И., Малышева Л.К.

Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, e-mail: malyshev@igg.uran.ru

Введение

Данная работа выполнена я в рамках исследования, ориентированного на оценку прогнозных возможностей уравнения динамики саморазвивающихся природных процессов (уравнения ДСПП) [1, 2] и разработку алгоритмов его практического использования. Уравнение ДСПП представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, которое используется в качестве математической модели для аппроксимации временного ряда сейсмических данных. Прогностическое значение уравнения ДСПП заключается в возможности экстраполяции полученных аппроксимационных решений в будущее, как в ретроспективе, так и в реальном времени. Следовательно, основная область применения уравнения в прогнозировании – выявление текущих трендов активности и прогноз их дальнейшего развития. Прогноз сильных землетрясений (ступеней) на этом тренде – самостоятельная задача, связанная с прогностическими возможностями уравнения ДСПП лишь постольку, поскольку позиция ступени сильного землетрясения на тренде детерминируется определенным (и довольно высоким) уровнем активности). В этом контексте прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности направлена не на прогноз сильных землетрясений, а на выявление и последующий мониторинг зон с потенциально опасным нарастанием сейсмической активности.

Методика исследований

Пространственный анализ сейсмических данных осуществляется по сферическим гипоцентральным выборкам с радиусами 1.5, 3, 7.5, 15, 30, 60, 150 и 300 км. Центры выборок фиксированы и распределены по широте, долготе и глубине с шагом смещения, в 1.5 раза меньшим радиуса выборки (т.е. соответственно 1, 2, 5, 10, 20, 40, 100 и 200 км), что обеспечивает пространственное перекрытие выборок и исключает пропуск данных для прогностических оценок. В качестве исследуемого параметра x в работе рассматривается поток сейсмической энергии (суммарная энергия землетрясений) в анализируемых гипоцентральных выборках.

Закономерности прецедентной форшоковой подготовки сильных ($M \geq 7$) землетрясений делают возможными выявление аналогичных трендов нарастания сейсмической активности и их последующую экстраполяцию. Прогнозная оценка опасности этих трендов предполагает использование данных прецедентных ретропрогнозов и базируется на возможности привязки времени главного толчка к скорости изменения параметра x'_{sh} в ближайшей к главному толчку точке экстраполяционной кривой. Для этого создается база данных прецедентных ретропрогнозов с включением в нее информации о гипоцентральном радиусе выборки, показателе степени α и коэффициенте k уравнения ДСПП, скорости изменения параметра x'_{sh} в ближайшей к толчку расчетной точке тренда, а также информации о прецедентном главном толчке (магнитуда, локализация в пространстве и во времени).

Суть прецедентно-экстраполяционной оценки сейсмической опасности сводится к выявлению потенциально опасных пространственных зон, в которых наблюдается такое нарастание сейсмической активности, которое имеет исторические прецеденты завершения сильным землетрясением. Количественная сторона прогноза соответствует расчету возможного времени аналогичного землетрясения на основе базы данных его прецедентных прогнозов. Поскольку для каждого типа активизации, определяемого радиусом выборки и значениями показателя степени α и коэффициента k в уравнении ДСПП, подобных прецедентов может быть несколько, соответствующие расчеты возможного времени выполняются для каждого из них.

Алгоритм прогнозных экстраполяций предусматривает следующие операции.

1. Поиск в каталоге незавершенных (не вышедших из полосы допустимых ошибок на момент конца каталога) прогнозных определений, в которых обнаруживается тенденция к нарастанию сейсмической активности.

2. Сопоставление типа нарастания активности с базой данных прецедентных ретропрогнозов по радиусу выборки, показателю степениα (с точностью до 0.01) и коэффициенту k (при сравнении $\lg k$ с точностью до 0.1). Все случаи нарастания активности, не имеющие аналогов в базе данных прецедентных ретропрогнозов, игнорируются.

3. Оставшиеся случаи проверяются на прецеденты сильных толчков по ретроспективной базе данных. При этом из рассмотрения исключаются все прецедентные случаи прогноза, для которых скорость изменения параметра на момент прецедентного толчка x'_{sh} меньше текущей (на момент завершения каталога) скорости x' ($x'_{sh} < x'$). Смысл этого ограничения сводится, во-первых, к исключению из рассмотрения постшоковой активности (начальной стадии афтершоковых последовательностей, которая попадает в полосу допустимых ошибок форшоковой активизации), а во-вторых, к акцентированию внимания на ранних стадиях форшоковой подготовки ($x' << x'_{sh}$), где относительная точность прогноза наиболее высока.

4. Для каждого прецедентного ретропрогноза по скорости изменения параметра x'_{sh} рассчитывается время t_{sh} и значение параметра x_{sh}, при которых для данного типа нарастания активности ее уровень будет соответствовать уровню прецедентного толчка:

$t_{sh} = T_a - {x'_{sh}}^{1-\alpha}/[k(1-\alpha)]$ при $\alpha \neq 1$ или $t_{sh} = t_1 + \ln(x'_{sh}/x'_1)/k$ при $\alpha = 1$,

$x_{sh} = X_a + {x'_{sh}}^{2-\alpha}/[k(2-\alpha)]$ при $\alpha \neq 2$ или $x_{sh} = x_1 + \ln(x'_{sh}/x'_1)/k$ при $\alpha = 2$.

Затем рассчитываются уровень прогнозной нелинейности L_{pn}, аппроксимационно-экстраполяционное соотношение A и ожидаемое отклонение по времени σ_t фактических данных от расчетного тренда в момент главного толчка. Значение этого ожидаемого отклонения определяется из среднего отклонения по нормали[1] аппроксимируемых данных и пересчитывается на отклонение по времени в расчетной точке (t_{sh},x_{sh}) прецедентного толчка. Определения, для которых аппроксимационно-экстраполяционное соотношение A превышает максимальное значение A_{max} для ретропрогнозных определений, исключаются из рассмотрения как не имеющие прецедентов.

5. Обнаруженные прецедентные ретропрогнозы группируются по главному толчку. Для каждой группы определяется среднее расчетное время толчка, его среднеквадратическое отклонение σ_{sh}, а также средние значения L_{pn}, A и σ_t.

Более подробно детали методики изложены в [3].

Таблица 1. Ретропрогнозная оценка места и времени по кластеру прецедентной активности землетрясения 25 марта 2020 г. (M = 7.7).

Дата оценки	n_z	n_p	**Расчетные параметры**			
			Время	***Lat***	***Lon***	***Dep***
2015.01.01	2	56	2016.03.27	49.656	156.931	50
2016.01.01	5	165	2018.11.12	49.393	156.905	16
2017.01.01	10	287	2019.10.12	50.285	157.565	70
2018.01.01	13	369	2020.01.31	49.539	157.360	19
2019.01.01	13	562	2020.04.26	50.281	157.385	55
2020.01.01	13	336	2021.05.11	50.938	157.527	88
2020.03.25*	13	341	2021.07.20	51.156	157.721	86

Примечание. * – оценка в 00:00, т.е. за 2 час 49 мин до землетрясения; n_z, n_p – количество зон и незавершенных прогнозных определений в кластере; *Lat*, *Lon* – широта и долгота, *Dep* – глубина, км; фактическое положение гипоцентра: 49.110° с.ш., 158.075° в.д., 47.6 км

Исходные данные

Прецедентно-экстраполяционная оценка опасности сильных землетрясений (M7+) для района Камчатки выполнена на основе Единой Информационной Системы Сейсмических Данных[2] [5, 6], содержащей сведения о землетрясениях с 1962 г. На 01.08.2021 г. в ЕИССД имелась информация о 436236 землетрясениях с энергетическим классом[3] K от 0.8 до 17.0 (модальное значение 4.9). Для анализа форшоковой прогнозируемости и формирования базы данных прецедентных ретропрогнозов использованы также результаты обработки каталогов землетрясений JMA[4] и USGS[5]. ЕИССД содержит сведения об энергетическом классе K каждого землетрясения, тогда как в каталогах JMA и USGS имеются данные лишь о магнитуде. Поэтому энергия одиночного землетрясения в этих каталогах оценивается согласно имеющейся зависимости [4]: $K = 1.5 \times M + 4.8$.

[1] В координатах от первой точки аппроксимационного участка до расчетного толчка, нормированных на диапазон от 0 до 1

[2] http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php

[3] Десятичный логарифм энергии землетрясения в Дж: $K = \lg E$

[4] http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo_e.html

[5] https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/

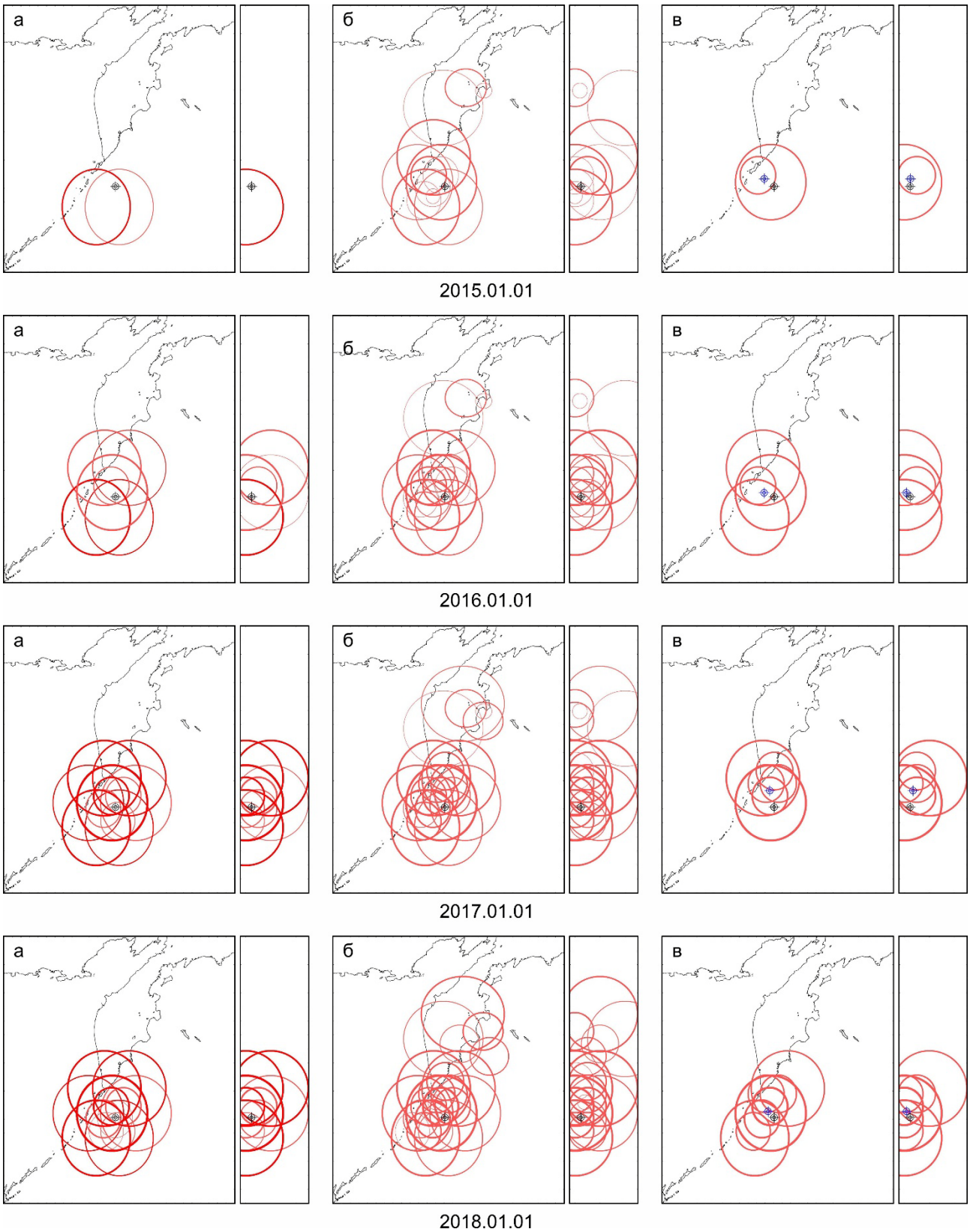


Рис. 1. Зоны фактической прогнозируемости землетрясения 25 мая 2020 г. (а), выявленные зоны с аналогичным развитием по параметрам уравнения ДСПП (б) и кластер зон наибольшей активности (в), используемый для расчета времени и места прецедентного землетрясения. Окружностями показано положение зон, в которых обнаружена потенциально опасная активность; толщина линии окружности отражает число обнаруженных потенциально опасных незавершенных прогнозных определений. Двойная окружность с перекрестием – фактическое (черный цвет) и расчетное (по кластерным оценкам в столбце (в) положение прецедентного землетрясения.

Результаты исследований и их обсуждение

Настройка алгоритма прецедентно-экстраполяционной оценки опасности для Камчатского региона выполнена на примере землетрясения 25 марта 2020 г. (M = 7.7), имевшего прогнозируемую форшоковую подготовку, начиная с 2015 г. (табл. 1, табл. 2, рис. 1). Как можно видеть на рис. 1а, прогнозируемость этого землетрясения отмечается одновременно сразу в нескольких зонах,

Таблица 2. Количество ретропрогнозов сильных (M7+) землетрясений Камчатки, выявленных в оценках опасности с 2014 г.

Землетрясение					Оценка опасности						
Дата	*M*	*Lat*	*Lon*	*Dep*	2014.01.01	2015.01.01	2016.01.01	2017.01.01	2018.01.01	2019.01.01	2020.01.01
2016.01.30	7.1	53.85	159.04	178	3	3	91				
2017.07.17	7.3	54.35	168.90	7				5			
2018.10.13	7.0	52.53	153.87	499			5	4	2		
2018.12.20	7.3	54.91	164.71	54	1	1	2	11	24		
2020.03.25	7.7	49.11	158.08	48		16	127	375	421	405	290

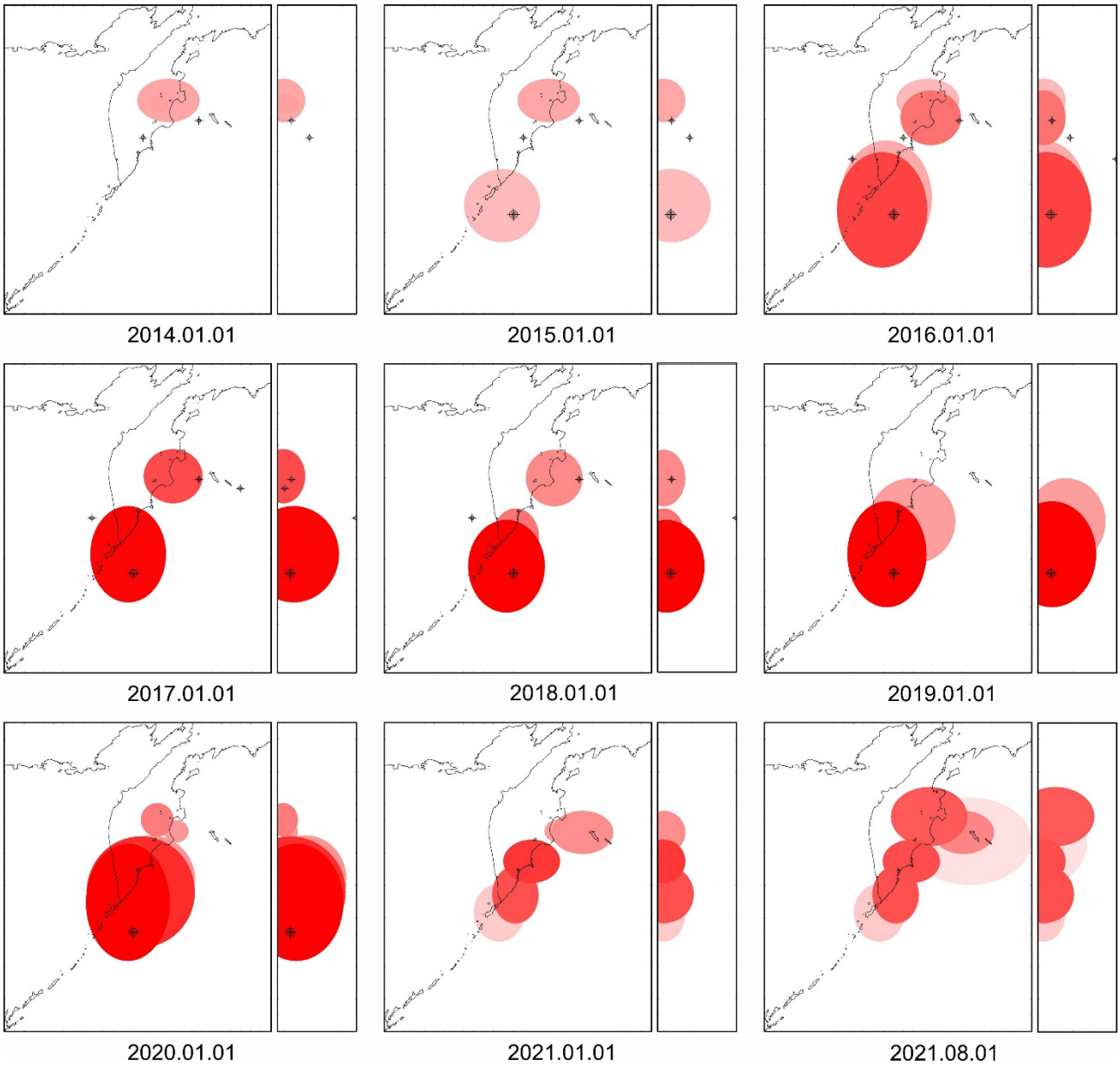


Рис. 2. Эволюция потенциальной сейсмической опасности на территории Камчатки с 2014 г. по настоящее время по результатам кластерной обработки. Цвет областей прецедентной опасности отражает число обнаруженных потенциально опасных незавершенных прогнозных определений в кластере. Двойная окружность с перекрестием – положение прецедентного землетрясения 25 марта 2020 г. (M = 7.7); одинарными окружностями с перекрестием показаны положения более слабых землетрясений M7+, которые попадают в полосу допуска прогнозных экстраполяций (табл. 2).

образующих пространственный кластер. Однако аналогичная активность отмечается не только в зоне подготовки землетрясения, где она максимальна, но и за ее пределами, (см. рис. 1, столбец (б)). Поэтому для выделения кластера активности принят критерий, по которому (1) кластер должен состоять не менее чем из двух пересекающихся зон и (2) в каждой из этих зон должно быть не менее 20 незавершенных потенциально опасных прогнозных экстраполяций. Эффективность применения этого критерия иллюстрирует столбец (в) на рис. 1, а также результаты прецедентных расчетов по кластеру (табл. 1). В 2017-2019 гг. рассчитанное по кластеру время землетрясения соответствует фактическому на количественном уровне точности (относительная ошибка в 2017 г. 13.9%, в 2018 г. 6.5%, в 2019 г. 7.1%). На ранних стадиях оценки (2015–2018 гг.) отмечается и наилучшее соответствие расчетного положения гипоцентра фактическому. Однако в последствии расчетное положения гипоцентра все больше отклоняется от фактического в направлении на север с ухудшением относительной точности прогноза по расчетному времени до качественного уровня. Это обусловлено зарождением к северу от фактического гипоцентра зон активизации, имеющих аналогичные параметры активизации, но более поздний выход на прецедентный уровень активности. Эти зоны сохраняются вплоть до настоящего времени (рис. 2), формируя кластер 9 в табл. 3 с расчетным выходом на уровень активности прецедентного землетрясения к маю 2025 г.

Таблица 3. Кластеры зон потенциально опасной (M7+) сейсмической активности Камчатки по состоянию на 1 августа 2021 г.

№	Характеристики кластера									*M*	Прецедентное землетрясение				
пп	n_z	n_p	*Lat* ± *σ*	*Lon* ± *σ*	*Dep* ± *σ*	*R*	Дата	σ_{sh}	σ_t		Дата	*Lat*	*Lon*	*Dep*	Каталог
1	2	151	53.5 ± 0.0	159.8 ± 0.7	0 ± 0	150	2022.02.06	259	35	7.3	2000.10.06	35.27	133.35	9	JMA
2	3	147	51.4 ± 0.4	158.3 ± 0.2	19 ± 39	150	2023.05.13	358	181	8.0	2000.11.16	–3.98	152.17	33	USGS
3	3	147	51.4 ± 0.4	158.3 ± 0.2	19 ± 39	187	2023.04.11	358	301	7.8	2003.11.17	51.15	178.65	33	USGS
4	3	147	51.4 ± 0.4	158.3 ± 0.2	19 ± 39	300	2023.05.13	358	312	7.8	2009.07.15	–45.76	166.56	12	USGS
5	3	135	56.2 ± 0.1	161.7 ± 0.9	79 ± 82	150	2025.08.10	728	70	7.7	2020.03.25	49.11	158.08	47	Kam
6	2	119	51.4 ± 0.4	158.3 ± 0.2	0 ± 0	108	2023.05.13	409	382	7.7	2016.07.29	18.54	145.51	196	USGS
7	2	90	55.2 ± 0.0	165.2 ± 0.8	0 ± 0	150	2021.10.31	119	400	7.7	2020.03.25	49.11	158.08	47	Kam
8	2	54	55.9 ± 0.3	163.3 ± 0.5	19 ± 20	150	2023.01.19	388	201	7.6	2011.03.11	36.12	141.25	42	JMA
9	2	49	50.3 ± 0.4	156.6 ± 0.5	0 ± 0	150	2025.05.26	921	114	7.7	2020.03.25	49.11	158.08	47	Kam
10	2	40	54.7 ± 0.0	165.8 ± 1.6	0 ± 0	150	2022.03.07	197	307	8.0	2000.11.16	–3.98	152.17	33	USGS

Примечание. *R* – средний радиус зоны, км; σ_{sh} и σ_t – ошибка времени (сут) по прецедентным расчетам и по разбросу данных на аппроксимационном участке тренда.

Последняя оценка (1 августа 2021 г.) показывает, что текущие кластеры зон прецедентной сейсмической опасности ни по числу зон в кластере (максимум 3 зоны), ни по числу незавершенных потенциально опасных экстраполяций (максимум 151) не достигают уровня форшоковой подготовки землетрясения 25 марта 2020 г. (13 зон и 562 незавершенные экстраполяции на 1 января 2019 г.). поэтому сильное землетрясение с аналогичной форшоковой подготовкой в ближайшие годы представляется маловероятным. Однако необходимо учитывать и тот факт, что в 2016–2018 гг., произошли еще четыре землетрясения M7+ (табл. 2), которые хотя и имели форшоковую прогнозируемость, но она была менее выражена по сравнению с землетрясением 25 марта 2020 г.

Прецедентно-экстраполяционные оценки сейсмической опасности можно использовать в прогнозе сильных землетрясений как вспомогательный инструмент, предназначенный для выявления и мониторинга потенциально опасной сейсмической активности.

Список литературы

1. *Малышев А.И.* Динамика саморазвивающихся процессов // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 61–72.

2. *Малышев А.И.* Закономерности нелинейного развития сейсмического процесса. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. 111 с.

3. *Малышев А.И., Малышева Л.К.* Прецедентно-экстраполяционная оценка сейсмической опасности в районе Сахалина и Южных Курил // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5. № 2. С. 84–112.

4. *Kanamori H.* The Energy Release in Great Earthquakes // JGR. 1977. V. 82. No 20. P. 2981–2987.

5. *Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В*. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.

6. *Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеенко Е.А., Чебров Д.В.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т 21. № 3. С. 66–91.

УДК 550.34

ПРИМЕРЫ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ЮЖНО-АЗИАТСКОГО РЕГИОНА

Михеева А.В. [1, 2]

[1]*ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск, anna@omzg.sscc.ru*
[2]*ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск.*

Введение

В геоинформационной системе GIS-ENDDB (Earth's Natural Disasters DataBase) [4] реализован комплекс сейсмогеодинамических методов пространственно-временного анализа данных землетрясений. При этом используются каталоги землетрясений и механизмов очагов от различных сейсмологических агентств, в том числе, Единой геофизической службы Российской академии наук. В работе показаны примеры использования программы GIS-ENDDB для исследования сейсмичности Южно-Азиатского региона. В частности, для установления взаимосвязи сейсмичности с тектонической обстановкой региона сопоставляются результаты использования методов крипекс-анализа и суммарных полей напряжений (осредненного напряженного состояния среды).

Используемые методы и результаты исследования сейсмичности

Методы исследования крипекса отличаются возможностью количественной оценки относительного вклада «мягкой» (крип) и «жесткой» (эксплозия) подвижек в общий процесс очагового излучения. Выбор наиболее информативного варианта крипекс-параметра и его реализация в GIS-ENDDB позволяют пользователю рассчитывать и визуализировать распределение параметра по данным любого каталога, содержащего парные определения M_S и m_B. В качестве наиболее информативного предлагается параметр Cr_{N_cat} - модификация нормированного параметра крипекс Cr_N путем его приведения к среднему, рассчитываемому по полиномиальному тренду $Cr_N(M_S)$ активного каталога [7].

На примере использования каталога BJI [3] графики изменения параметра $Cr_{N\ BJI}$ во времени показывают его практическую независимость от магнитуды (рис. 1) и позволяют оценивать характерные особенности развития очага в процессе его разгрузки, а при наличии форшоков – его подготовки. Типичную картину изменения крипекса в первые часы после главного толчка (его скачкообразный переход к значениям 0-0.3 с последующим убывающим или выравнивающим трендом) демонстрируют коровые землетрясения, произошедшие на стыках континентальных и континентально-океанических плит (рис. 1). При этом, если главный толчок имел отрицательный или небольшой по величине ($\leq$0.2) положительный крипекс, то после него, как правило, происходит положительный скачок крипекса небольшой амплитуды ($\leq$0.1), как показывают, например, рой землетрясений у Юго-Восточных берегов о. Хоккайдо 17.02.2007, M_S=6.2 (можно заметить на рис. 1а, что его подготовка в течение предшествующих 19 дней также характеризуется единичным выходом на положительные значения крипекса); Симуширское землетрясение 13.01.2007, M_S=8.1 (рис. 1, а-б), землетрясение близ Молукку 21.01.2007, M_S=7.5. Если же главный толчок имел повышенное положительное значение крипекса Cr_{N_BJI}>0.2 (что наблюдается в подавляющем большинстве рассмотренных за 2000-2008 гг. случаев), то после него происходит резкий отрицательный скачок крипекса с последующими подъемами относительно заниженного уровня - это рои землетрясений 2.08.2007, M_S=6.8 близ Сахалина и 5.05.2007, M_S=6.2 близ Хотана, все сильнейшие землетрясения многолетнего каскада близ Суматры: 4.06.2000, M_S=7.9; 7.06.2000, M_S=7.1; 13.02.2001, M_S=7.4; 27.06.2002, M_S=7.3; 17.07.2006, M_S=7.5; 12.09.2007, M_S=8.6; 24.10.2007, M_S=7.1; 25.02.2008, M_S=7.7, двойное событие 26.12.2006 на Тайване M_S=7.4 и M_S=7.1 (рис. 1, в-д) и т.д.

При этом на рисунке 1 представлены не только графики изменения крипекса (шкала слева), но и данные о механизме главного толчка (сверху), а также о магнитуде землетрясений (зеленый цвет, шкала справа), позволяющие судить о статистической значимости получаемого значения $Cr_{N\ BJI}$ обычно невысокой в области больших значений M_S. Отметим, однако, что и в области $M_S\geq7$ в используемой выборке каталога BJI статистическая достоверность результата достаточно высока (107 событий с $M_S\geq7$, т.е. статистическая погрешность менее 10%). Таким образом, графики рисунка 1 подтверждают, что выявленная закономерность на временах порядка 0.5 суток после главного толчка не зависит ни от механизма его очага, ни от его магнитуды.

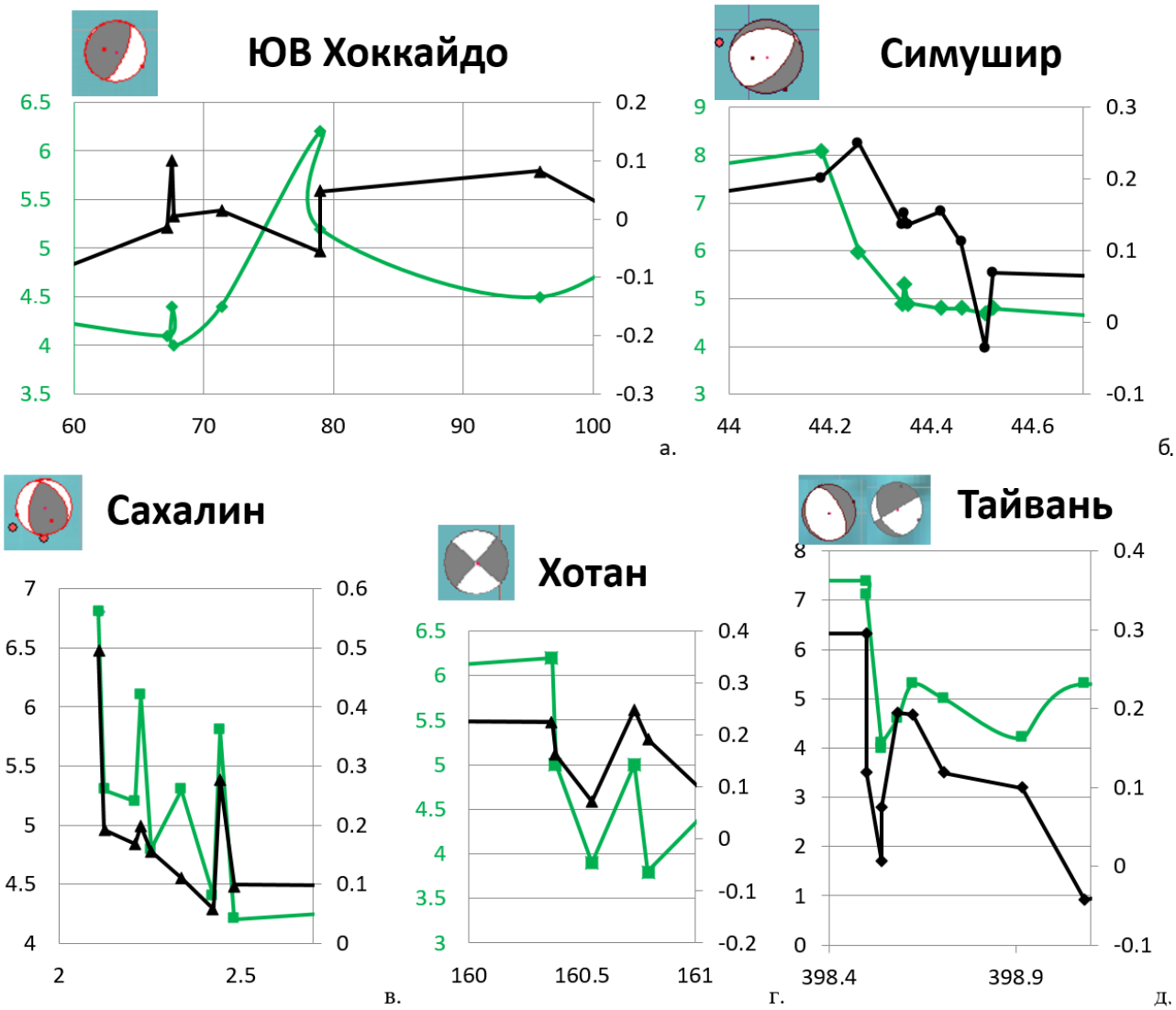


Рис. 1. Развитие во времени (в сутках) сейсмо-геодинамического процесса (зеленый цвет - $M_S(t)$, черный - $CrN_{cat}(t)$) в очаговой зоне землетрясений: а) у ЮВ берегов о. Хоккайдо (17.02.2007, M_S=6.2); б) Симуширского (13.01.2007, M_S=8.1); в) близ о. Сахалин (2.08.2007, M_S=6.8); г) в округе Хотан, южнее пустыни Такла-Макан (5.05.2007, M_S=6.2); д) близ о. Тайвань (26.12.2006, M_S=7.4).

Как известно, на повышение крипекса должна влиять относительно высокая температура среды. Если выявленные выше закономерности объяснить термодинамическим влиянием глубинных процессов, повышающих крипекс первого толчка (рис. 1, б-д), который затем, в свою очередь, провоцирует более хрупкую сейсмичность в верхних слоях коры, то следует ожидать зависимости крипекса от глубины. Пример роя землетрясений с 19 по 22 мая 2013 г в Авачинском заливе подтверждает такую возможность: видна временная корреляция графиков крипекса и глубины наиболее насыщенной событиями части роя - на ¼-суточном временном интервале с 17:44 19 мая по 0:05 20 мая (рис. 2а). При этом, такая корреляция отсутствует на более длительном 3.5-суточном интервале времени (рис. 2б). При отсутствии подобной корреляции можно предположить влияние на увеличение крипекса других факторов, например, дилатансии пород очага в момент главного толчка.

Кроме распределения крипекс-параметра во времени, выявляющего закономерности развития процесса сейсмогенеза до и после крупных толчков, важную информацию могут дать различные варианты визуализации распределений крипекс-параметра в пространстве, в частности, выявлять взаимосвязь сейсмичности с окружающей тектонической обстановкой. В GIS-ENDDB реализованы следующие методы визуализации: 1) вывод на карте окрашенных по значению крипекса очагов событий, где радиус очага определяется величиной, оцениваемой по M_S [5] (рис. 3); 2) отрисовка временной последовательности зональных карт, построенных на основе пространственной интерполяции усредненных по ячейке значений крипекса в узлах регулярной сетки, размер которых задается пользователем (врезка на рис. 3, рис. 4).

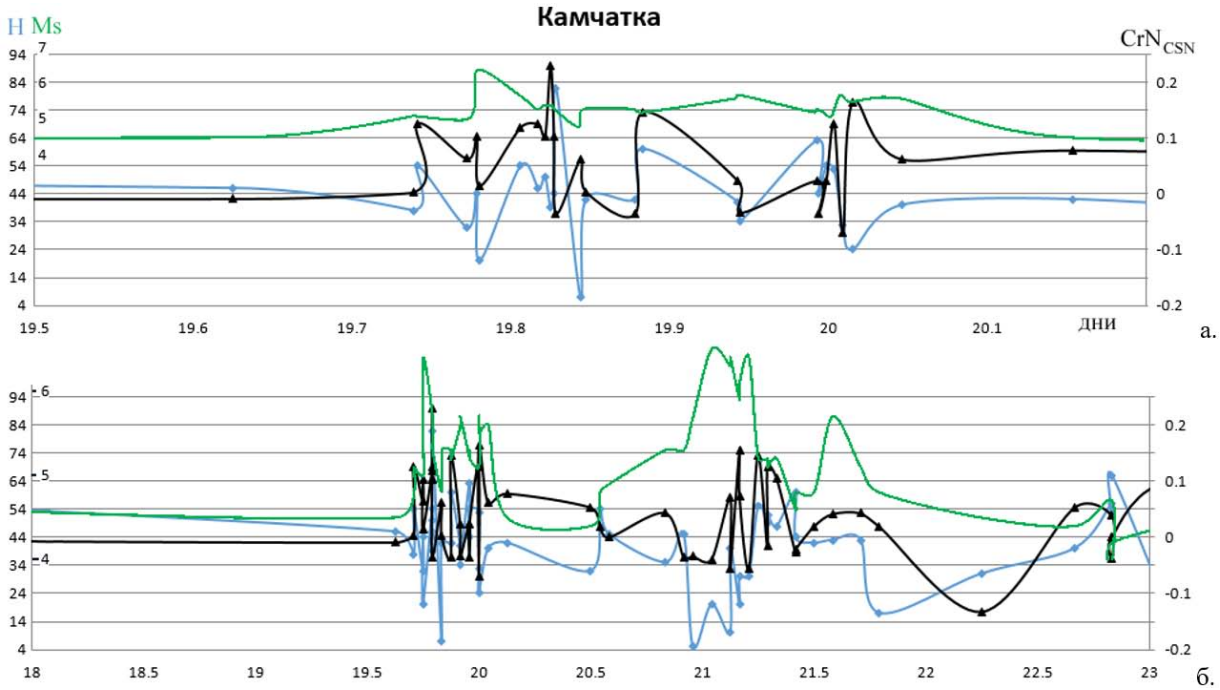


Рис 2. Распределение во времени (в сутках) крипес-параметра $CrN_{cat}(t)$) в очаговой зоне роя 19-22.05.2013 г в Авачинском заливе п/о. Камчатка.

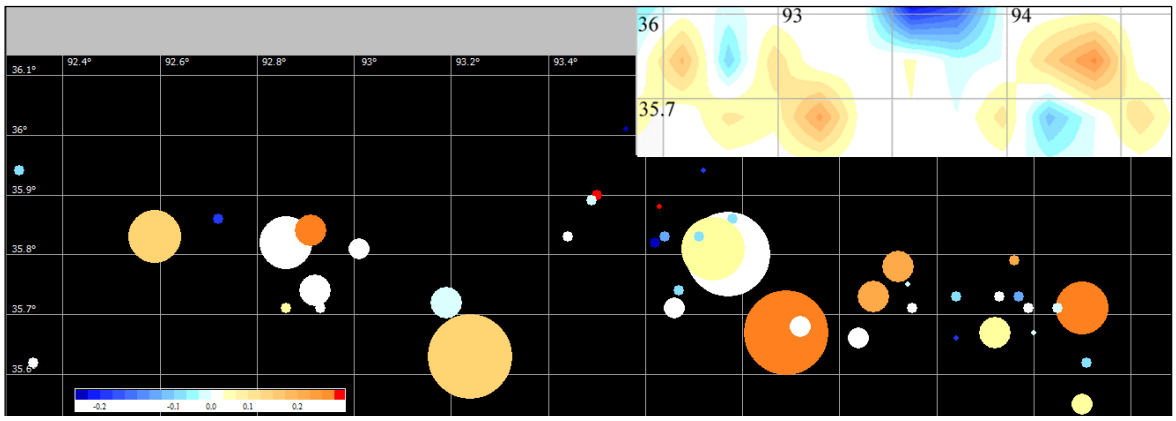


Рис 3. Распределение окрашенных по величине крипекса землетрясений центрального Тибета за 1985-2004 гг: $3.1 \leq M_S \leq 5.8$ (радиус каждого круга определён величиной очага). Во вкладке: аномалии усредненного крипекса той же выборки (ячейка усреднения 0.2×0.3°), площадь очага учитывается.

В работе [2] установлено статистически значимое влияние на уменьшение крипекса преобладания взбросо-сбросовых компонент подвижки, а на повышение - сдвиговой компоненты. Поэтому для установления взаимосвязи сейсмичности с тектонической обстановкой региона полезно сопоставить результаты использования методов крипекс-анализа и суммарных полей напряжений (суммарного направления скольжения в сейсмических очагах). Последний метод в GIS-ENDDB модифицирован с целью различения не только сбросовой и взбросовой компонент (областей растяжения и сжатия), но и сдвиговой составляющей поля напряжений (рис. 4в).

Результаты применения зонального метода для крипекс-параметра (каталог BJI) в Южно-Азиатском регионе подтверждают, что трансформные разломы со сдвиговой деформацией, тектоническое движение в которых, в целом, характеризуется свойством «асейсмической ползучести», проявляются областями преимущественно положительного значения крипекса (например, в области сочленения Евразийской плиты и Китайского агломерата на рис. 4а), а зоны субдукции, характеризующиеся «холодным хрупким разрушением» [6] – отрицательного (рис. 4б), но на глубинах $50 \leq H < 160$ км. Для верхних слоев литосферы ($H \leq 30$ км) вдоль зон субдукции наблюдается более мозаичная картина распределения крипекса (рис. 4а). Это можно объяснить тем, что на локальных участках годовая динамика аномалий отражает «специфику конкретных очаговых зон» [1] и особенно это относится к коровым землетрясениям со знакопеременными афтершоковыми роями (рис. 1). Сравнение аномалий на временных последовательностях зональных карт двух

параметров сеймопроцесса (крипекса и типа механизма очага) по количественным характеристикам - размерам этих аномалий (т.е. площадей цветовых зон), как предполагается, могут дать информацию о степени влияния сдвиговых или деформаций сброса и взброса (областей растяжения и сжатия) на величину крипекса. Например, рисунок 4 (б) показывает, что суммарный крипекс на глубинах H≥50 км образует равномерное распределение отрицательной аномалии вдоль крупных тектонических структур – зон субдукции, в целом, вероятно, отражая состояние поля напряжений в этих зонах и, вопреки ожиданиям, не проявляя связи с повышенной температурой среды на больших глубинах.

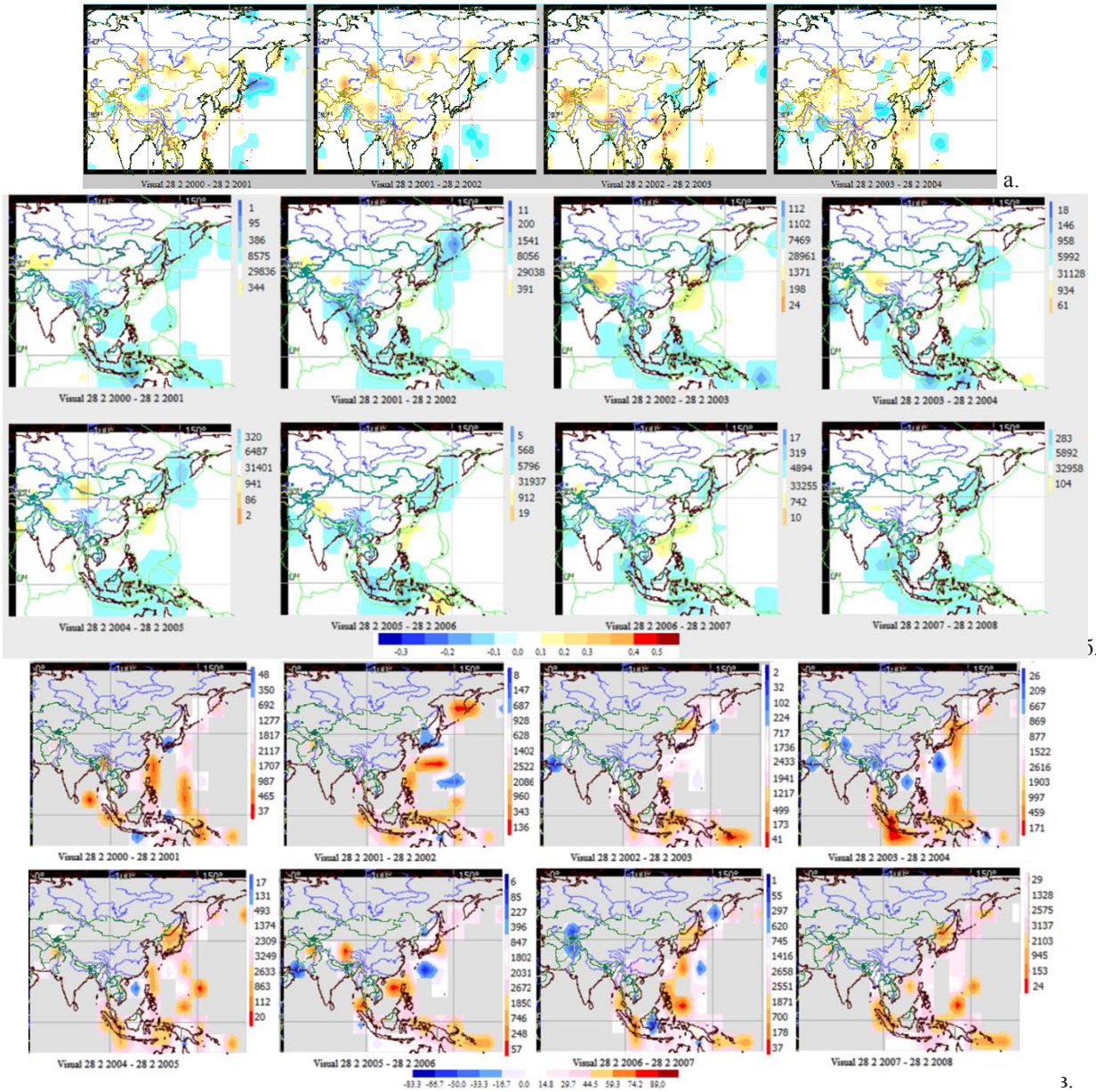


Рис. 4. Аномалии распределения усредненного крипекса $Cr_{N\ BJI}$ и полей напряжений по годовым интервалам за 2000-2008 гг в Южно-Азиатском регионе: а) $Cr_{N\ BJI}$, H≤30 км, ячейка усреднения 5×5°, до 28.02.2004 г; б) $Cr_{N\ BJI}$, 50≤H<160 км, ячейка 9×9°; в) суммарные поля напряжений (оранжево-красные - области сжатия, синие – растяжения, бело-розовые - сдвига). Справа приведены площади цветовых зон.

Максимальное распространение отрицательных аномалий по картам крипекса (рис. 4б) отмечается в период 28.02.2001-28.02.2002: суммарная площадь цветовых зон всех оттенков синего цвета достигает здесь 9808 ед. (при минимуме 5230 ед.), а максимальное распространение положительных аномалий отмечается в период 28.02.2002-28.02.2003: суммарная площадь 1593 ед. (при минимуме 104 ед.). Для сравнения, максимальное расширение взбросово-сбросовых активизаций на картах полей напряжений по данным о механизмах очагов приходится также на 28.02.2001-28.02.2002 (4367 ед. - суммарная площадь цветовых зон оттенков синего и оранжево-красного цветов на рис. 4в) и на 28.02.2003-28.02.2004 (4432 ед.), а максимальное сокращение этих

зон – на 28.02.2002-28.02.2003 (2290 ед.). Полную количественную корреляцию между собой аномалий двух сравниваемых характеристик по данным рисунка 4 можно оценить с помощью сравнения гистограмм распределения их площадей (рис. 5). Хотя относительная корреляция присутствует на отдельных (обозначенных овалами) группах временных интервалов, однако в целом заметно преобладание на картах крипекса отрицательных аномалий, а на картах суммарного механизма – сдвиговой компоненты. Дело в том, что предложенный метод усреднения напряженного состояния среды, хорошо различая области растяжения и сжатия, при попытке выявить сдвиговую составляющую суммарного поля, завышает ее за счет суммирования сбросов и взбросов. Поэтому для различения вертикальной (сбросово-взбросовой) и горизонтальной (сдвиговой) составляющей поля напряжений именно карты крипекса представляются на данном этапе более информативными, но с учетом и других факторов, влияющих на величину крипекса.

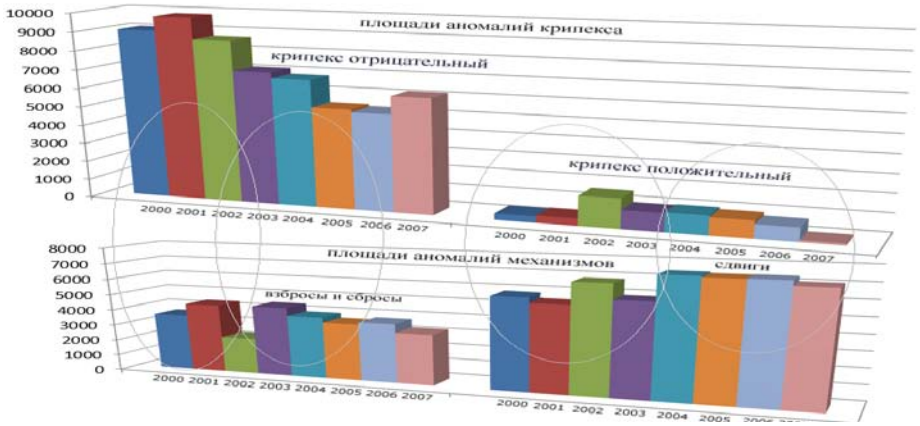


Рис. 5. Гистограммы распределения (по 8-ми годовым интервалам) площадей аномалий крипекса (вверху: слева – отрицательных, справа - положительных) и усредненного механизма (внизу: слева – взбросы и сбросы, справа - сдвиги) по данным рисунка 4.

Заключение

Параметр крипекс является наиболее информативным в комплексе сейсмогеодинамических методов пространственно-временного анализа данных землетрясений с точки зрения изучения физики очага. В работе выявлены независимые от типа механизма очага закономерности изменения этого параметра в афтершоковых процессах первых суток после крупных коровых землетрясений. Различные реализованные в программе GIS-ENDDB методы визуализации аномалий крипекса на карте, дают наглядную информацию о динамике крипекса на различных временных этапах сейсмо-геодинамического процесса, в различных геодинамических условиях, в том числе, на различных глубинах. Что касается вопроса о количественной оценке вклада сдвиговых и сбросо-взбросовых деформаций в значение крипекса, то предложенные в работе методы сопоставления результатов крипекс-анализа и суммарных полей напряжений не добавили пока однозначности в его решение. Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (0251-2021-0004).

Список литературы

1. *Болдырев С. А., Левина В. И.* Крипекс Камчатских мелкофокусных землетрясений // Физика Земли. 2008. № 3. С. 40–57.

2. Каверина А.Н., Прозоров А.Г. Вариации крипекса в зависимости от типа тектонических структур и механизма очага: статистический анализ // Геодинамиика и прогноз землетрясений. М.: Наука, 1994. С.85–93. (Вычисл. сейсмология; Вып. 26).

3. Каталог Китайского Бюро исследований землетрясений BJI Института геофизики АН Китая. URL: www.isc.ac.uk/cgi-bin/agency-get?agency=BJI (дата обращения 17.03.2021).

4. *Михеева А.В.* Геоструктурные элементы, выявляемые математическими алгоритмами и цифровыми моделями ГВС GIS-ENDDB. Новосибирск, 2016. 300 с.

5. *Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.

6. *Kaverina A.N., Lander A.V., Prozorov A.G.* Global Creepex Distribution and Its Relation to Earthquake-Source Geometry and Tectonic Origin // Geophysical Journal International. 1996. V. 125. Is. 1. P. 249–265.

7. *Mikheeva A.V., Kalinnikov I.I.* Creepex as a P arameter of Seismo-Geodynamic Studies Based on Geo-Information Systems // CEUR Workshop Proceedings: All-Russian Conference “Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes”, Novosibirsk, Russia, August 24-27. 2021.

УДК 510.311

СЕЙСМИЧНОСТЬ УДАЛЁННЫХ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ: АРХИПЕЛАГ СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ И ПОЛУОСТРОВ ТАЙМЫР

Морозов А.Н.[1], Ваганова Н.В.[2]

[1]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, morozovalexey@yandex.ru
[2]Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, г. Архангельск, navaga@mail.ru

Введение

В 1906 г. с целью организации сейсмометрических наблюдений в Васияуре (Vassijaure) на севере Швеции был установлен горизонтальный сейсмограф Вихерта (Wiechert), который, впоследствии, в 1915 г. был перенесён на территорию Научно-исследовательской станции Abisco [16]. Сейсмическая станция Васияуре стала первой станцией, функционирующей севернее Полярного круга. Дату начала сейсмологических наблюдений в Арктике связывают именно с началом функционирования этой станции [1].

Постепенно с разными темпами общее количество сейсмических станций севернее Полярного круга увеличивалось. Существенное увеличение сети арктических станций произошло в период подготовки и проведения Международного геофизического года (1957-1958). Однако вплоть до начала XXI века обширные территории Арктики были крайне неравномерно охвачены инструментальными наблюдениями по причине суровых климатических и неблагоприятных географических условий (рис. 1а). В результате значение представительной магнитуды сильно варьировалось в пределах территории Арктики, начиная от 2.0-2.5 и доходя для некоторых районов до 4.0 [1].

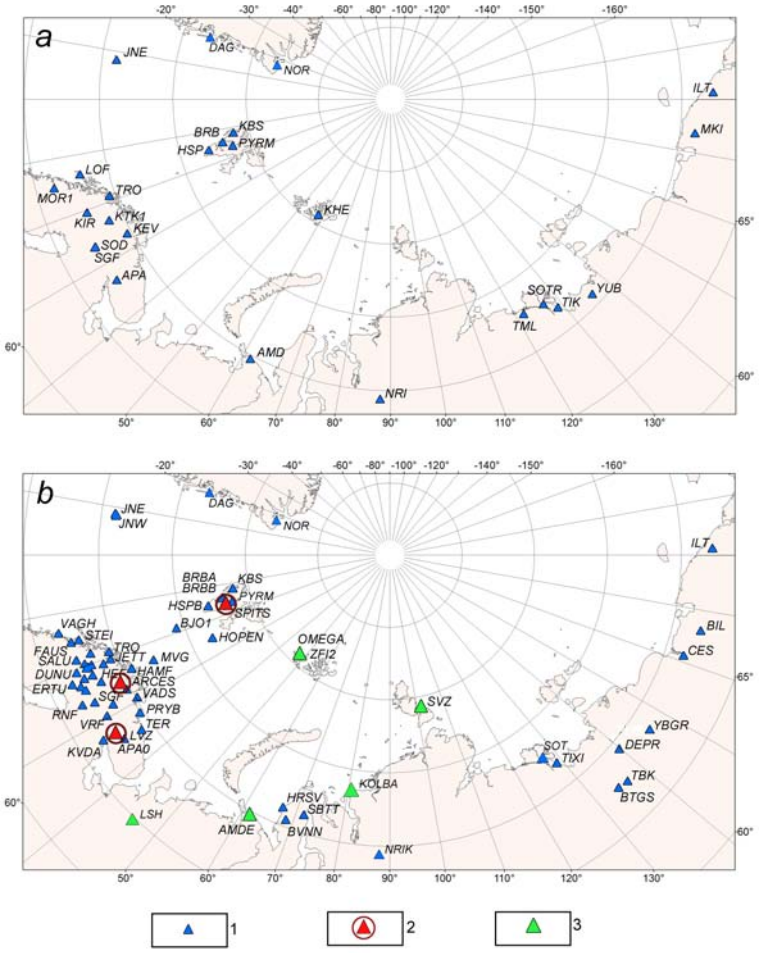


Рис. 1. Карта сейсмических станций Евразийской Арктики, функционирующих в 80-х годах XX века (а) и на момент 2019 г. (б): 1 – сейсмические станции; 2 – сейсмические группы; 3 – сейсмические станции Архангельской сети (код AH)

Однако этого было достаточно, чтобы получить хорошие представления об особенностях проявления сейсмичности главной сейсмоактивной зоны Арктики – спрединговой границы Северо-Американской и Евразийской литосферных плит, протягивающейся от Исландии через Норвежско-Гренландский бассейн, Евразийский суббассейн и шельф моря Лаптевых до Северо-Востока Евразии. Граница плит представлена в виде подводного срединно-океанического хребта, являющегося продолжением Срединно-Атлантического хребта и сейсмичность хребта обусловлена процессами океанического рифтогенеза. Самым большим участком срединно-океанического хребта в Арктике является хребет Гаккеля, который протянулся с востока на запад примерно на 1800 км от 6° западной долготы до 125° восточной долготы [1, 21].

Однако количество сейсмических станций и их плотность были совершенно недостаточны для детального изучения сейсмичности отдельных, важных с позиций научного и прикладного (и особенно геоэкологического) аспектов, районов Арктики. Не регистрировались низкомагнитудные землетрясения, изучение которых дает многое для выявления пространственно-временных вариаций сейсмичности и более правильного понимания связи ее с геологическим строением региона и развивающимися в его пределах геодинамическими процессами.

В конце XX и в начале XXI века произошло существенное увеличение количества арктических сейсмических станций, оснащенных современной высокочувствительной аппаратурой, что сказалось на уменьшении порога регистрации землетрясений для отдельных районов Арктики (рис. 1б). К таким районам, которые до последнего времени были недоступны для детального изучения сейсмичности относится центральная часть Евразийской Арктики. До начала XXI века землетрясения с этого района регистрировались только удалёнными сейсмическими станциями. В настоящий момент на данной территории функционируют сейсмические станции Архангельской сети (код сети AH, DOI: https://doi.org/10.7914/SN/AH), расположенные на архипелагах Земля Франца-Иосифа (ZFI2, OMEGA) и Северная Земля (SVZ) и побережье Карского моря (AMDE1, KOLBA) [8].

В настоящей статье мы обобщили сведения о сейсмичности в пределах архипелага Северная Земля и полуострова Таймыр за весь инструментальный период наблюдений, включая данные новых сейсмических станций. Землетрясения первой половины XX века и начала XXI были нами перелоцированы с использованием всех доступных в настоящее время исходных данных и бюллетеней сейсмических станций.

Тектоника и морфология района исследования

Рассматриваемый район исследования (рис. 2) включает часть шельфа Карского моря и моря Лаптевых, архипелаг Северная Земля и полуостров Таймыр, который является самой северной материковой частью суши Евразийского континента [7]. Архипелаг Северная Земля состоит из четырёх крупных и нескольких мелких островов, отделён от материка проливом Вилькицкого. Около 47 % площади архипелага покрыто ледниками. Полуостров Таймыр по характеру поверхности делится на три части: Северо-Сибирская низменность, Бырранга горы, протягивающиеся несколькими параллельными цепями с юго-запада на северо-восток до побережья моря Лаптевых (высота до 1146 м), и прибрежная равнина, вытянутая вдоль побережья Карского моря.

Структуры архипелага Северная Земля и Северного Таймыра расположены в пределах Карской плиты, которая занимает северо-восточную часть Карского шельфа. Западной границей плиты служит желоб Святой Анны, а на востоке она отделяется от Лаптевского шельфа северо-восточным продолжением Центрально-Таймырского аккреционного пояса [9]. Наиболее заметным линеаментом в пределах района исследования является Хатангско-Ломоносовская окраинно-континентальная зона разломов, которая довольно отчетливо отражается в рельефе дна Лаптевоморской континентальной окраины. Эта зона протягивается из Хатангского залива в северо-восточном направлении в район сочленения хребта Ломоносова с континентальной окраиной [22].

Континентальный склон в пределах района исследования имеет простое строение, т.е. на всем протяжении склона от бровки шельфа до континентального подножья отсутствуют осложнения его профиля, который в верхней части является крутым, а в нижней постепенно выполаживается. При этом склон интенсивно расчленён каньонами, которые в литературе именуются трогами и/или желобами. Это желоба Воронина, Шокальского, Вилькицкого и Комсомольская правда [4]. В тектоническом отношении желоба представляют собой грабены, сформированные в результате разновременных тектонических и геоморфологических процессов [3].

Представление о сейсмичности района исследования до последнего времени было весьма схематично, что обусловлено удаленностью регистрирующих сейсмических станций. Очевидной была лишь ярко выраженная линейность пояса землетрясений хребта Гаккеля и ее исчезновение при

переходе на шельф моря Лаптевых – расщепление на восточную и западную зоны сейсмичности, обусловленные разрядкой напряжений, генерируемых в осевой зоне [1, 15]. Непосредственно в пределах района нашего исследований умеренной сейсмичностью характеризуется северо-восток полуострова Таймыр. Самыми сильными землетрясениями, зарегистрированными здесь за весь период инструментальных наблюдений, были землетрясения 1964, 1986, 1996 и 2015 гг. (mb=3.9–4.6 по [12]), а также землетрясение 9 июня 1990 г., имеющее максимальную для рассматриваемого района магнитуду mb=4.9 и интенсивность в ближней к эпицентру зоне VI–VII баллов по шкале MSK-64 [6]. Согласно исследованию [6], в очаге Таймырского землетрясения реализовались пологая и субвертикальная плоскости разрывов северо-западного и субмеридионального простирания со взбросо-сдвиговой и взбросовой подвижками соответственно.

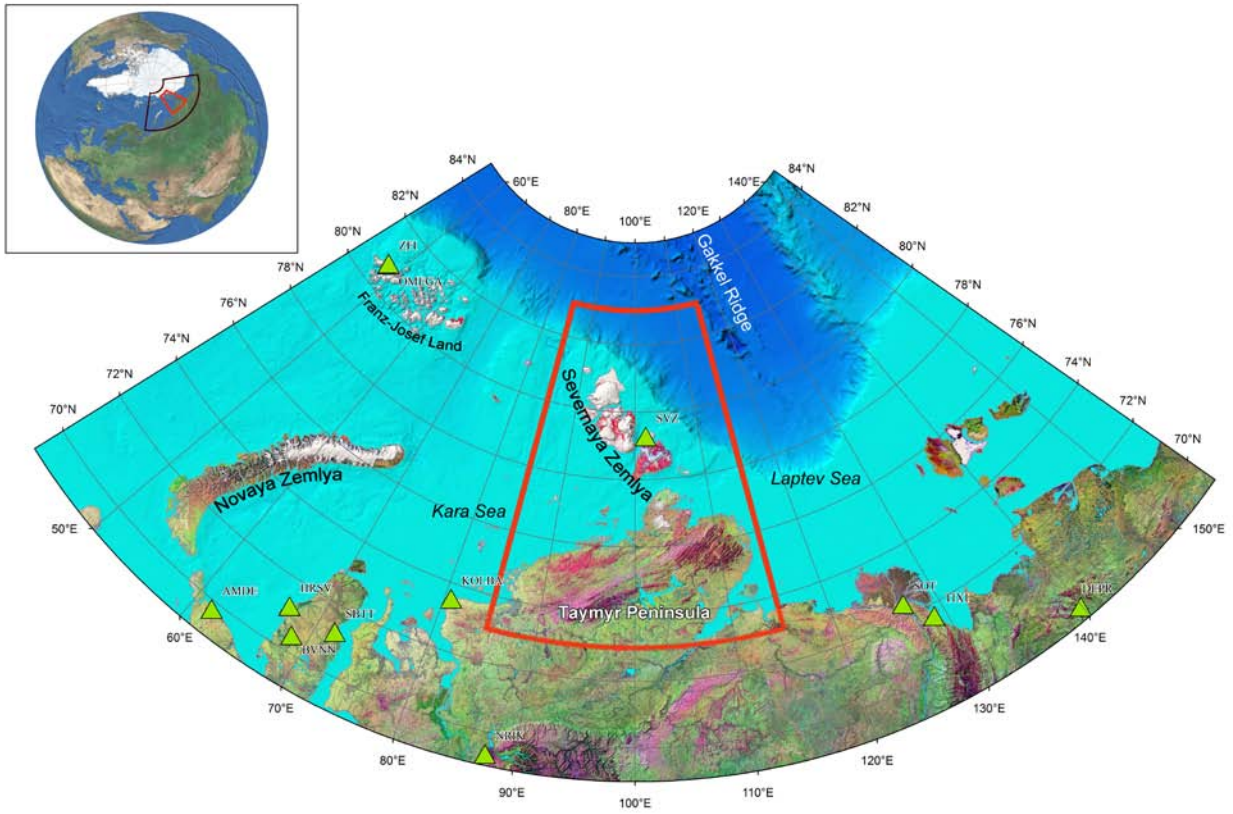


Рис. 2. Батиметрическая карта с указанием район исследования. Зелеными треугольниками указаны, функционирующие в регионе стационарные сейсмические станции

Исходные данные и методика исследования

Для исследуемого района был составлен предварительный каталог сейсмических событий за период с начала XX века по 2020 год на основе данных International Seismological Centre (ISC) [12] и с привлечением каталогов сети АН. Предварительный каталог включал в себя параметры гипоцентров 85 землетрясений. Параметры очага землетрясений в бюллетене ISC за период с 1964 по 2010 гг. были пересчитаны использованием скоростной модели ak135 и используемым в настоящее время в ISC алгоритмом расчета. Поэтому процедура уточнения параметров очагов землетрясений была проведена только для землетрясений, зарегистрированных в первой половине XX века. Для Арктического региона информация об исторических и палеоземлетрясениях практически недоступна, поэтому большое значение для оценки сейсмической опасности имеют землетрясения, зарегистрированные за инструментальный период.

По каждому событию первой половины XX века составлялись сводные бюллетени на основе изучения бюллетеней сейсмических станций, функционировавших в тот период времени. Бюллетени сейсмических станций по конкретным событиям привлекались из следующих источников:

– бюллетени сейсмических станций, функционировавшие в первой половине XX века, аккумулированные и выложенные в открытый доступ в рамках научных проектов ISC-GEM и EuroSeismos;

– Сводный бюллетень Постоянной Центральной сейсмической комиссии за 1912 г. и Сводный квартальный бюллетень сети телесейсмических станций (1928–1939) (Россия);

– International Seismological Summary (1918–1963);

– BAAS (1913–1918);

– Бюллетень сети сейсмических станций СССР/Сейсмологический бюллетень сети опорных сейсмических станций СССР (1940–1987);

– Бюллетень International Seismological Centre;

– архив бюллетеней ФИЦ ЕГС РАН.

Определение параметров гипоцентров сейсмических событий производилось методом Generalized beamforming [17], в усовершенствованном виде, реализованном в программе NAS (New Association System) [10].

В данном исследовании использовались также результаты сейсмического мониторинга, проводимого в пределах района исследований на основе данных сейсмической станции SVZ и с привлечением данных станций ZFI2, OMEGA, AMDE1 и KOLBA за период с 2016 по 2020 гг. (Рис. 1б) Все зарегистрированные землетрясения были перелоцированы с использованием программы NAS и региональной скоростной модели BARENTS [14]. Для определения значений локальной магнитуды ML использовалась уточнённая шкала для Евразийской Арктики.

Как уже отмечалось, в настоящее время количество стационарных сейсмических станций в Евразийской Арктике является наибольшим за весь инструментальный период наблюдений. Однако до сих пор условия для достоверной локации эпицентров землетрясений, особенно низкомагнитудных, остаются все еще неблагоприятными по причине малого количества сейсмических станций, их удаленностью друг от друга и геометрии их сети (рис. 1б). И в ближайшем будущем условия локации этих землетрясений не улучшатся. Поэтому, не редкими являются ситуации, когда низкомагнитудные землетрясения регистрируются только одной станцией. В этом случае использовался метод определения координат эпицентров землетрясений по записям одной станции, реализованный в программе EL (Event Location) [2]. Для минимизации возможной ошибки в определении координат таких эпицентров анализировались только землетрясения с четкими вступлениями фаз P и S, т.е. с высоким значением отношения “сигнал/шум”. Конечно, это менее достоверный способ локации, однако по его результатам мы можем определить основные закономерности распределения их эпицентров. Для 43 низкомагнитудных землетрясений значения координат эпицентров были определены в программе EL. Мы не можем не учитывать такое количество зарегистрированных землетрясений в своём исследовании.

Обсуждение результатов и выводы

Самым ранним инструментально зарегистрированным землетрясением в пределах района исследования является землетрясение 13 апреля 1912 г. Это землетрясение упоминается в работах [5, 11, 23]. При этом по [5, 11] эпицентр располагается в пределах архипелага Северная Земля, согласно [23] в пределах хребта Гаккеля. В работе [20] нами было проведено уточнение параметров очага по данным шести европейских сейсмических станций. Землетрясение произошло в пределах хребта Гаккеля. Бала пересчитана его магнитуда MS по данным из бюллетеней станций, которая равна 5.1. Соответственно, это землетрясение не имеет никого отношения к району архипелага Северная Земля, а эпицентр его располагается в районе хребта Гаккеля. Это очень важный результат для оценки сейсмической опасности территории (рис. 3).

Землетрясение 24 сентября 1922 г. также изучалось нами ранее в работе [18]. Из-за малого количества сейсмических станций, их удалённости от эпицентра и широкого азимутального створа уточненный эпицентр имел большой эллипс ошибок, и само решение не считалось надёжным. В этом исследовании нам удалось обнаружить дополнительные времена вступлений на сейсмических станциях, которые в предыдущей работе не учитывались. После уточнения эпицентр сместился в район хребта Гаккеля. Большой эллипс ошибок не даёт нам возможности отнести это землетрясение в определённому району. Вычислить магнитуду для этого землетрясения по данным бюллетеней сейсмических станций не удалось.

Только землетрясение 19 октября 1924 г. из всех землетрясений первой половины XX века можно отнести к району нашего исследования, а именно к континентальному склону. Для этого землетрясения было вычислено значение магнитуды по данным трёх станции равное 6.0. При этом за весь инструментальный период наблюдений в этом районе землетрясения не регистрировались. Это, конечно, не может не вызывать сомнения в приуроченности этого землетрясений к данному району.

Дополнительно, была проведена процедура уточнения для трёх землетрясений, произошедших во второй половине XX века. Это землетрясения 8 октября 1963 г., параметры которого не были пересчитаны в ISC и по этому землетрясению не был приведен бюллетень

сейсмических станций. Нам удалось обнаружить времена вступлений 14-ти сейсмических станций. При этом процедура уточнения подтвердила достоверность первоначального эпицентра, исходный эпицентр располагается в эллипсе ошибок вычисленного эпицентра (рис. 3).

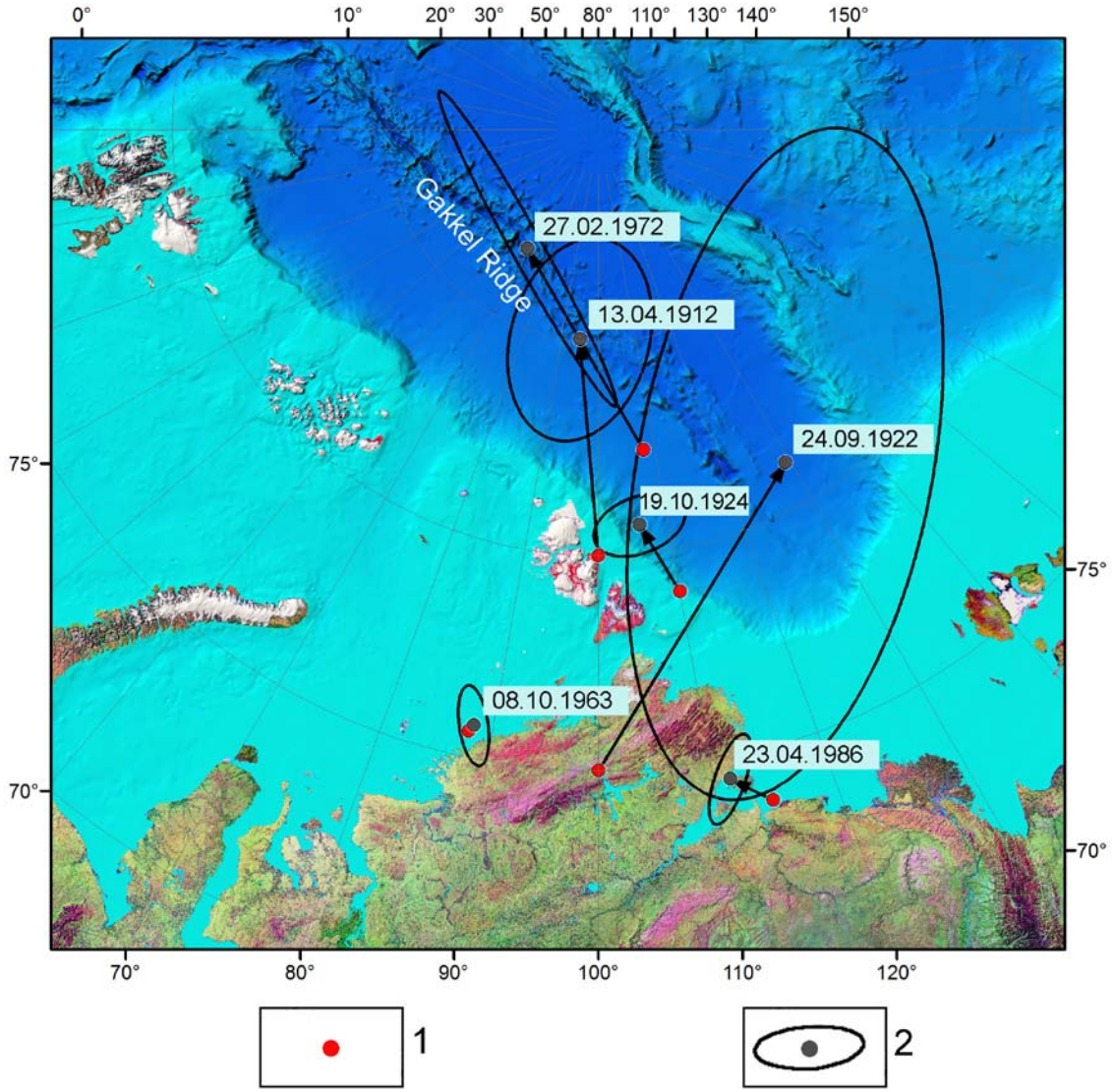


Рис. 3. Карты с обозначением уточнённых эпицентров землетрясений: 1 - исходные координаты; 2 - новые координаты и эллипсы ошибок

Землетрясения 27 февраля 1972 г. и 24 апреля 1986 г. представлены в бюллетене ISC по данным ежегодника «Землетрясения в СССР», в котором обобщались сведения о сейсмичности разных регионов Советского Союза за определённый год. Эти землетрясения также были перелоцированы с учётом скоростной модели ak135. В результате, эпицентр землетрясений 27 февраля 1972 г. был отнесен к хребту Гаккеля, для землетрясения 24 апреля 1986 г. процедура уточнения подтвердила достоверность первоначального эпицентра (рис. 3).

До установки в 2016 г. сейсмической станции на архипелаге Северная Земля в пределах района исследования регистрировались землетрясения с магнитудами mb выше 3.0. После 2016 г. появилась возможность регистрировать землетрясения с магнитудами ML от 0.6. За период с декабря 2016 г. по декабрь 2020 г. в пределах района исследования по данным сети было зарегистрировано 56 землетрясений. Среди них только пять землетрясений были зарегистрированы станциями мировой сети. Восемь землетрясений зарегистрировали ближайшие станции на архипелагах Северная Земля, Земля Франца-Иосифа и Шпицберген. Остальные 43 землетрясений зарегистрированы только одной станцией SVZ.

Восемь землетрясений, которые были зарегистрированы ближайшими станциями на архипелагах Северная Земля, Земля Франца-Иосифа и Шпицберген, были перелоцированы с

использованием программы NAS. Оказалось, что шесть землетрясений из восьми относятся к хребту Гаккеля. Одно землетрясение из пяти, которые было зарегистрировано станциями мировой сети было также перелоцировано с добавлением данных новой станции KOLBA. Однако, добавление станции не сильно изменило местоположение эпицентра.

Большая часть эпицентров (N=21) землетрясений, зарегистрированных одной станцией, приурочено к южной части о. Октябрьской революции. В этой части острова располагаются крупные ледники, поэтому вполне вероятно, что сейсмичность приурочена к деструкции этих ледников. В апреле - мае 1984 г. на крайней северной точке архипелага Северная Земля мыс Арктический были проведены экспедиционные сейсмометрические наблюдения. Было также зарегистрировано большое количество сейсмопроявлений на локальных расстояниях (от первых до первых десятков км), большинство которых были связаны с процессами в ближайшем леднике [1]. Регистрация льдотрясений (icequakes) для стационарных сейсмических станций на арктических архипелагах является обычным явлением [13]. А вот к необычному явлению можно приурочить тот факт, что 7 августа 1978 г. в этом районе с разницей в 40 минут было зарегистрировано два сильных землетрясения с магнитудами mb(ISC) равными 4.3 и 4.6.

Большая часть землетрясений, зарегистрированных за инструментальный период приурочена к устьевой части Хатангского залива, в котором располагается Хатангский грабен и берёт своё начало Хатангско-Ломоносовская окраинно-континентальная зона разломов, и к восточной части полуострова Таймыр (рис. 4a,b). Именно в восточной части полуострова Таймыр 9 июня 1990 г. произошло сильное землетрясение с mb(ISC)=5.0.

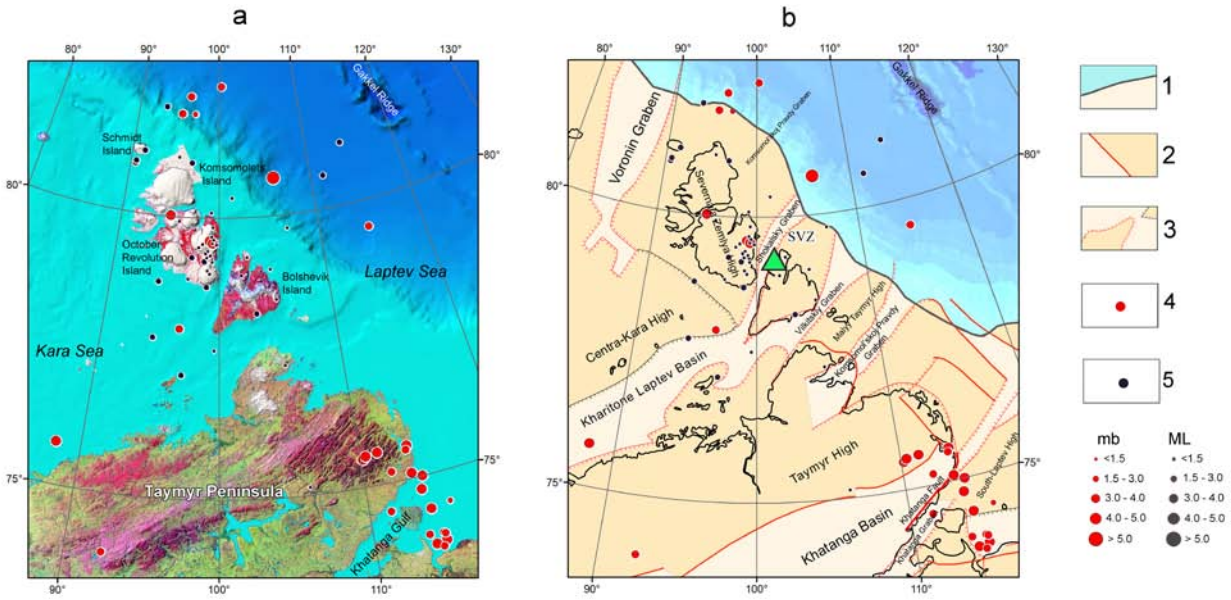


Рис. 4. Карта неотектонических структур (а) и тектонических разломов (б) [Атлас…, 2004] с эпицентрами землетрясений, зарегистрированные в течение всего инструментального периода: 1 – край шельфа, перегиб флексурно-разрывной зоны; 2 – главные неотектонические разломы; 3 – границы разрывных нарушений; 4 – Эпицентры землетрясений, вычисленные по данным нескольких станций; 5 – Эпицентры землетрясений, вычисленные по данным одной станции SVZ.

Часть эпицентров приурочены к континентальному склону. Однако в отличие от эпицентров землетрясений, зарегистрированных западнее района исследования в пределах континентального склона Баренцево-Карского региона [19], в данном случае мы не можем говорить о их приуроченности к желобам.

Результаты, полученные в этой статье, позволяют уточнить наши представления о сейсмичности удалённых арктических территорий – архипелага Северная Земля и полуострова Таймыр. В силу географических и климатических условий, рассматриваемый регион до сих пор остается слабо изученным и представления о сейсмичности было весьма схематично. Поэтому полученные в этой работе результаты представляют определенный научный интерес для последующих исследований, связанных с построением геодинамических моделей, исследованием напряженно-деформированного состояния земной коры и оценки сейсмической опасности территории.

Список литературы

1. *Аветисов Г.П.* Сейсмоактивные зоны Арктики. СПб: ВНИИ Океангеология. 1996. 186 с.

2. *Асминг В.Э.* Создание программного комплекса для автоматизации детектирования, локации и интерпретации сейсмических событий и его использование для изучения сейсмичности Северо-Западного региона / Автореф. дисс. кандидата физ.-мат. наук. М.: ИДГ РАН, 2004. 25 с.

3. *Верба М. Л.* Современное билатеральное растяжение земной коры в Баренцево-Карском регионе и его роль при оценке перспектив нефтегазоносности // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. Т. 2. С. 1–37.

4. *Зинченко А. Г.* Два типа континентальных склонов в Северном Ледовитом океане (в связи с проблемой внешней границы континентального шельфа) // 70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2018. С. 31–39.

5. *Линден Н.А.* О карте сейсмичности Арктики // Сейсмические и гляциологические исследования в период МГГ. М.: АН СССР, 1959. №2. С. 7–17.

6. *Середкина А.И., Козьмин Б.М.* Очаговые параметры Таймырского землетрясения 9 июня 1990 г // Доклады Академии Наук. 2017. Т. 473. №. 2. С.214–217.

7. *Хайн В.Е.* Тектоника континентов и океанов. М.: Научный мир, 2001. 606 с.

8. *Antonovskaya G., Morozov A., Vaganova N., Konechnaya Y.* Seismic monitoring of the European Arctic and Adjoining Regions // The Arctic. Current Issues and Challenges. 2020. P. 303–368.

9. *Bogdanov N.A.* Tectonics of the Arctic ocean // Geotectonics. 2004. V. 38. №. 3. P. 166–181.

10. *Fedorov A.V., Asming V.E., Jevtjugina Z.A., Prokudina A.V.* Automated seismic monitoring system for the European Arctic // Seismic Instruments. 2019. V. 55. №. 1. P.17–23.

11. *Gutenberg B., Richter C.* Seismicity of the Earth. Geological Society of America, 1941. V. 34.

12. International Seismological Centre. URL: http://www.isc.ac.uk/ (дата обращения 06.12.2020 г.)

13. *Köhler A., Nuth C., Schweitzer J., Weidle C., Gibbons S.J.* Regional passive seismic monitoring reveals dynamic glacier activity on Spitsbergen, Svalbard // Polar Research. 2015. V. 34. №. 1. P.1–19.

14. *Kremenetskaya E., Asming V., Ringdal F.* Seismic location calibration of the European Arctic // Pure Appl. Geophys. 2001. V. 158(1). P.117–128.

15. *Krylov A.A., Ivashchenko A.I., Kovachev S.A., Tsukanov N.V., Kulikov M.E., Medvedev I.P., ... & Shakhova N.E.* The seismotectonics and seismicity of the Laptev Sea region: The current situation and a first experience in a year-long installation of Ocean bottom seismometers on the shelf // Journal of Volcanology and Seismology. 2020. V. 14. №. 6. P. 379–393.

16. *Kulhánek O.* The status, importance, and use of historical seismograms in Sweden // Symposium on historical seismograms and earthquakes. 1988. P. 64–69.

17. *Kvaerna T., Ringdal F.* Generalized beamforming, phase association and threshold monitoring using a global seismic network // Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty. Springer, Dordrecht, 1996. P. 447-466.

18. *Morozov, A.N., Vaganova, N.V., Asming, V.E., K onechnaya Y.V., Evtyugina Z.A.* The instrumental seismicity of the Barents and Kara sea region: relocated event catalog from early twentieth century to 1989 // Journal of Seismology. 2018. V. 22. №. 5. P. 1171-1209.

19. *Morozov, A.N., Vaganova, N.V., Ivanova, E.V., Konechnaya, Y.V., Fedorenko, I.V., & Mikhaylova, Y.A.* New data about small-magnitude earthquakes of the ultraslow-spreading Gakkel Ridge, Arctic Ocean // Journal of Geodynamics. 2016. V. 93. P. 31–41.

20. *Morozov, A.N., Vaganova, N.V., Shakhova, E.V., Konechnaya, Y.V., Asming, V.E., Antonovskaya, G.N., Evtyugina, Z.A.* Seismicity of the Arctic in the Early Twentieth Century: Relocation of the 1904–1920 Earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. 2019. V. 109. №. 5. P. 2000–2008.

21. *Schlindwein V., Demuth A., Korger E., Läderach C., Schmid, F.* Seismicity of the Arctic mid-ocean ridge system // Polar Science. 2015. V. 9. №. 1. P. 146–157.

22. *Shipilov E.V.* Generations of spreading basins and stages of breakdown of Wegener's Pangea in the geodynamic evolution of the Arctic Ocean // Geotectonics. 2008. V. 42. №. 2. P. 105–124.

23. *Tams E.* Die seismischen Verhältnisse des europäischen Nordmeer, zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Palaentologie, Jahrg // Number. 1922. V. 13. P. 385–397.

УДК 550.34.042.43

ШКАЛА *ML* ДЛЯ ТИМАНО-СЕВЕРОУРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

***Носкова Н.Н.*[1], *Дягилев Р.А.*[2], *Верхоланцев Ф.Г.*[2,3]**

[1] Институт геологии имени академика Н.П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Сыктывкар, noskova@geo.komisc.ru
[2] Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», г. Обнинск
[3] «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

Введение

Шкала магнитуд *ML*, предложенная Рихтером в 1935 г., по-прежнему остается наиболее распространенной оценкой силы землетрясений с очагами, удаленными на первые сотни километров. В Институте геологии имени академика Н.П. Юшкина (ИГ) Коми НЦ УрО РАН для Тимано–Североуральского региона используется магнитуда *ML* (*MWA*), основанная на осредненной по Северной Евразии калибровочной функции [1]. В то же время, на Среднем Урале и в западной части Евразийской Арктики уже получены свои региональные шкалы *ML* и введены в практику рутинной обработки сейсмологических данных [2, 4].

Исходные данные и методы исследования

Исходным материалом для исследований послужили данные сейсмических станций ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Сыктывкар» (SYK) в г. Сыктывкаре, «Пожег» (PZG) в с. Пожег Усть-Куломского района и «Грива» (GRV) в Койгородском районе (закрыта 24.12.2018). Станции оснащены короткопериодными сейсмоприемниками СМ-3КВ и цифровыми регистраторами SDAS и UGRA (разработка НПП «Геотех+» совместно с ФИЦ ЕГС РАН).

В соответствии с классическим определением, сформулированным Ч. Рихтером, шкала имеет следующий вид:

$$ML = \lg(A_{wa}) + a\lg(R/100) + b(R-100) + 3 + S, \quad (1)$$

где A_{wa} – максимальная амплитуда записи (в мм) на горизонтальной компоненте колебаний, симулированных для сейсмографа Вуда-Андерсона; R – гипоцентральное расстояние от станции до очага в км, a – геометрическое расхождение, b – коэффициент поглощения, S – станционная магнитудная поправка.

Для получения калибровочной кривой – $\lg A_0$, которая равна правой части уравнения (1) без $\lg(A_{wa})$ использовались записи 144 региональных сейсмических событий, зарегистрированных в 2004–2020 гг. Динамические замеры выполнялись в программе *WSG* [3] в симуляции Вуда-Андерсона, на горизонтальной составляющей в максимуме S-волны. Расчеты параметров обновленной локальной шкалы магнитуды выполнены в программе *MagScale* [2]. Инверсия исходных данных для получения коэффициентов калибровочной кривой шкалы *ML* выполнялась только для тех очагов, для которых имеется не менее трех записей на различных станциях. События с меньшим количеством записей не позволяют одновременно определить оба коэффициента a и b уравнения (1). В связи с малым количеством станций ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН для повышения представительности были привлечены данные станций Уральской сейсмологической сети [5].

Обсуждение результатов

В результате расчетов получены коэффициенты калибровочной кривой: $a = 1.299$, $b = 4 \cdot 10^{-6}$. Общая невязка шкалы равна 0.2. Примечательно, что коэффициенты полностью соответствуют ранее полученным для Среднего Урала [2], однако при этом впервые получен набор станционных поправок *S для* станций в Республике Коми (таблица).

Распределение количества замеров значений амплитуд в зависимости от эпицентрального расстояния и магнитуд землетрясений представлено на рис. 1. Эпицентральные расстояния сейсмических событий для станций SYK, PZG и GRV составили 23–1000 км, диапазон магнитуд 1.5–4.5. Азимутальное распределение событий неравномерное (рис. 2).

Таблица 1. Магнитудные поправки сейсмических станций ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

Станция	Код	N	S±σS
Сыктывкар	SYK	37	0.11±0.19
Пожег	PZG	94	0.06±0.16
Грива	GRV	70	0.00±0.17

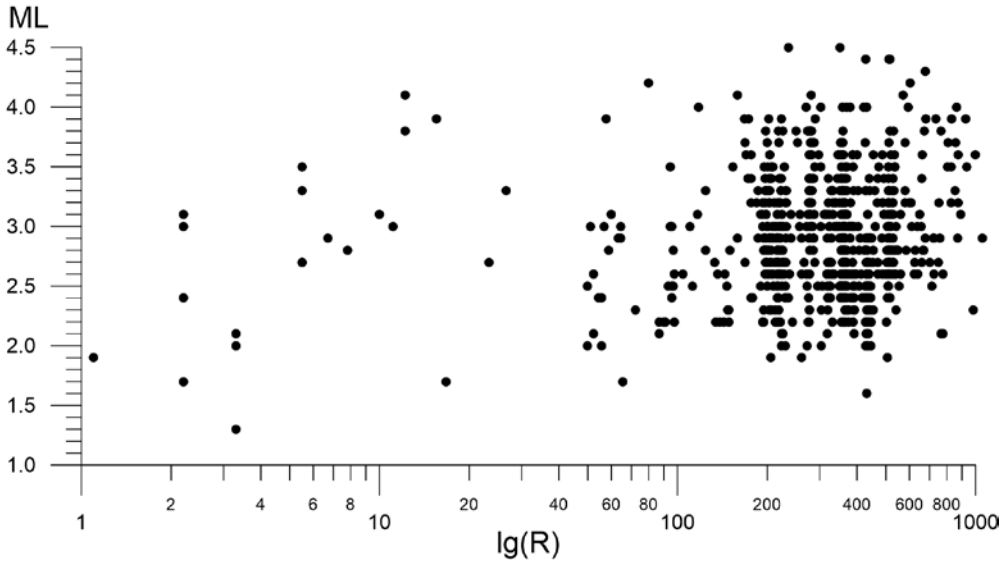


Рис. 1. Распределение рассчитанных событий по магнитудам и гипоцентральным расстояниям

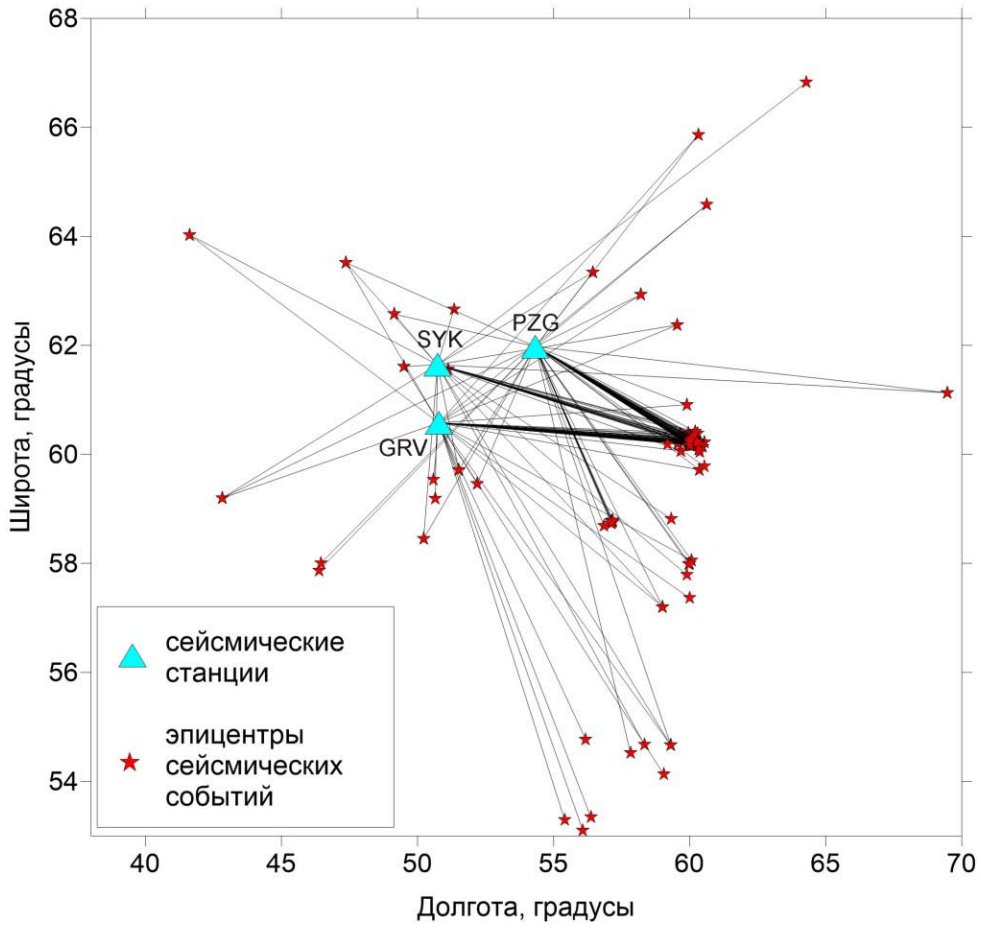


Рис. 2. Расположение сейсмических станций ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН и эпицентры землетрясений

Сейсмичность исследуемой территории низкая, тектонических землетрясений за указанный период лишь 42, а преобладающее большинство событий, 102 – это горно-тектонические удары на территории Пермского края, Свердловской и Челябинской областей.

Представление о характере распределения невязок магнитуд по оси гипоцентральных расстояний дает рис. 3. Распределение дано с учетом поправок магнитуд, вычисленных индивидуально для каждой станции. В целом учет станционных поправок благоприятно сказался на внутренней сходимости шкалы. Правая часть рис. 3, где представлена количественная статистика Ni/N по диапазонам значений невязок (где *Ni* – количество невязок в i-м диапазоне, *N* – общее количество невязок), отчетливо свидетельствует о множественном перераспределении величин *ML(sta)-ML(eq)* (где *ML(sta)* – частное определение магнитуды по станционной записи, *ML(eq)* – средняя магнитуда сейсмического события, определенная по группе станций) в диапазон [-0.2; 0.2] после учета станционных поправок.

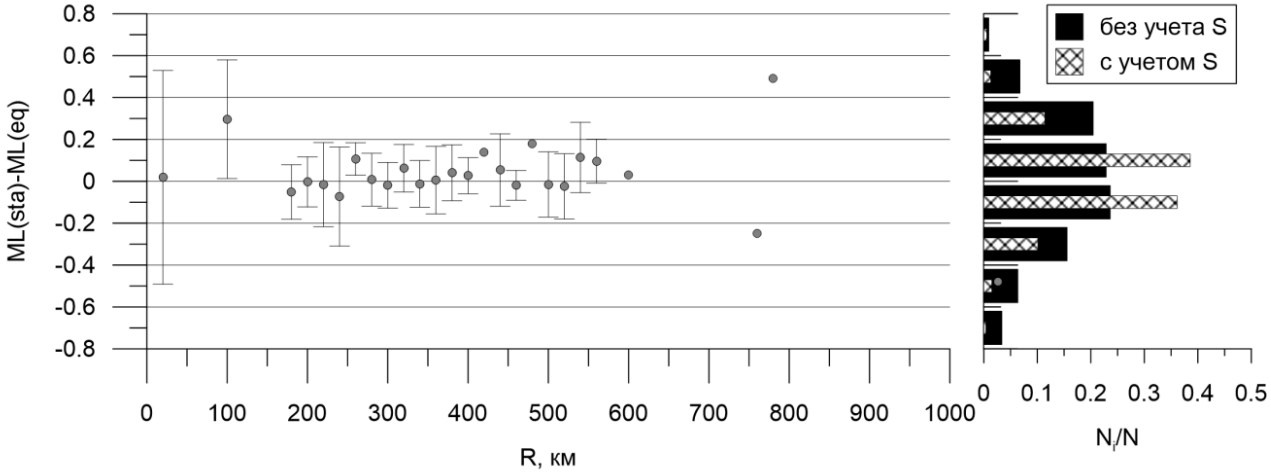


Рис. 3. Распределение невязок магнитуд по гипоцентральным расстояниям

Очень низкая представительность на расстояниях до 160 км и далее 600 км отражается на рисунке в виде значительных отклонений с большими среднеквадратическими ошибками. Однако схожесть коэффициентов шкалы с оценками для Среднего Урала дает основание использовать данную шкалу для малых расстояний, где статистика землетрясений была достаточно представительна.

Заключение

В результате выполненных расчетов впервые получена шкала локальных магнитуд для Тимано-Североуральского региона. Определены региональные коэффициенты геометрического расхождения и поглощения энергии волн, которые оказались схожими с величинами, полученными ранее для Среднего Урала. Установлены поправки магнитуд для сейсмических станций ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. При этом среднеквадратическая величина невязки магнитуд по всему набору имеющихся данных не превышает 0.2.

Список литературы

1. *Габсатарова И.П.* Внедрение в рутинную практику подразделений Геофизической службы РАН процедуры вычисления локальной магнитуды // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 49–53.

2. *Дягилев Р.А.* Шкала *ML* Среднего Урала // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы / Отв. редактор А.А. Маловичко. Обнинск: ГС РАН, 2015. С. 118–122.

3. *Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П.* Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 77–83.

4. *Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Евтюгина З.А.* Шкала ML для западной части Евразийской Арктики. Российский сейсмологический журнал. 2020. Т.2, №4. С. 63–68. DOI: https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.06.

5. Сейсмологический мониторинг Западного Урала. URL: http://pts.mi-perm.ru/region/ (дата обращения 20.08.2021).

УДК 550.34

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ БУРЕЙСКОЙ ГЭС НА ГЕОФИЗИЧЕСКУЮ СРЕДУ

Пупатенко В.В.

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск, pvv2.dv@gmail.com

Введение

Проектирование, строительство и эксплуатация особо ответственных сооружений должно учитывать, среди прочего, возможные сейсмические воздействия и сопутствующие им опасные геологические процессы. Большинство гидроэлектростанций (ГЭС) расположены в сейсмически активных регионах, поскольку для них необходимы горные реки одновременно с большим расходом воды и с большим перепадом высоты.

Обеспечение сейсмической безопасности ГЭС – сложная и многосторонняя проблема, поскольку ГЭС и водохранилище оказывают существенное воздействие на состояние геологической среды. Наиболее типичное проявление этого воздействия – изменение природной сейсмичности [5, 6], однако это не единственный результат воздействия ГЭС на напряжённо-деформированное состояние геологической среды. Плотины ГЭС могут работать как резонаторы, усиливая сейсмические колебания, включая микросейсмический шум. Например, вынужденные колебания плотины ГЭС в штате Монтана (США) под действием сейсмических волн слабых локальных землетрясений оказались настолько сильными, что их успешно использовали для сейсмической томографии прилегающих территорий [7].

В работе [1] показано, как с изменением уровня воды в Чиркейском водохранилище связано изменение частот собственных колебаний плотины ГЭС. Ожидается, что учёт этого эффекта позволит выявлять гораздо меньшие по амплитуде изменения частот собственных колебаний, которые связаны с появлением и развитием дефектов конструкции плотины ГЭС. Аналогичным образом, изменения вынужденных колебаний плотины ГЭС должны приводить к изменению интенсивности и частотного состава микросейсмического шума в окрестностях ГЭС, там, где ГЭС является доминирующим источником сейсмического шума.

Как показали предыдущие исследования, существенное искажение спектрального состава микросейсмических колебаний и записей землетрясений под влиянием низкочастотного (2-3 Гц) виброизлучения агрегатов ГЭС и, предположительно, связанное с изменением физических свойств геологической среды, наблюдается на значительном удалении от плотины [3].

В настоящей работе представлены результаты анализа изменения во времени высокочастотного микросейсмического шума на станциях локальной сейсмологической сети (ЛСС) Бурейской ГЭС. Показано, что искажения спектра микросейсмических колебаний сопровождаются аналогичными искажениями спектра слабых локальных и региональных землетрясений.

Методика исследования

Бурейская ГЭС – северная и наиболее крупная часть Бурейского гидроузла. Бетонная плотина длинной 720 м и высотой 140 м обеспечивает полную ёмкость водохранилища 20 км^3. Сезонные колебания уровня воды составляют около 20 м. На удалении 55 км от Бурейской ГЭС расположена Нижне-Бурейская ГЭС.

ЛСС Бурейской ГЭС состоит из шести сейсмических станций, оборудованных регистраторами REFTEK 130-01 и короткопериодными датчиками GS-1. В разные периоды времени одновременно работали от трёх до пяти сейсмостанций. Конфигурация сети позволяет регистрировать землетрясения с магнитудой около M = 1 в пределах сети и порядка M = 2 на удалениях до 200–250 км [4]. При этом детальные сейсмические наблюдения начались уже после заполнения водохранилища, это осложняет интерпретацию наблюдаемых особенностей как сейсмического процесса, так и микросейсмических колебаний.

Для анализа взяты сейсмические записи за период с декабря 2010 г. по сентябрь 2018 г. Анализ микросейсмического шума проводился следующим образом. Рассчитывались ежеминутные спектры сейсмических записей (в диапазоне частот 1-40 Гц), которые затем усреднялись медианным фильтром с получением медианных 4-суточных спектров. Таким образом, было исключено влияние на спектр сейсмических колебаний землетрясений, а также минимизировано влияние внутрисуточных и других сравнительно быстрых вариаций интенсивности микросейсмических

шумов природного и техногенного происхождения. В результате были получены двумерные частотно-временные зависимости интенсивности (спектральной плотности мощности – СПМ) микросейсмического шума, которые визуализировались в виде диаграмм.

Для зарегистрированных ЛСС Бурейской ГЭС слабых локальных и региональных землетрясений были построены спектрально-временные диаграммы. С их помощью были вручную определены частоты, на которых наблюдаются аномально высокие амплитуды колебаний.

Результаты и выводы

На рис. 1 приведены примеры рассчитанных по приведённой методике многолетних спектрально-временных диаграмм интенсивности микросейсмического шума по Y-компоненте для станций PAYK и MKSH. Именно на этих станциях наиболее явно выделяются изменения частотного состава микросейсмических колебаний, а также минимальны дополнительные антропогенные помехи, не связанные с работой ГЭС.

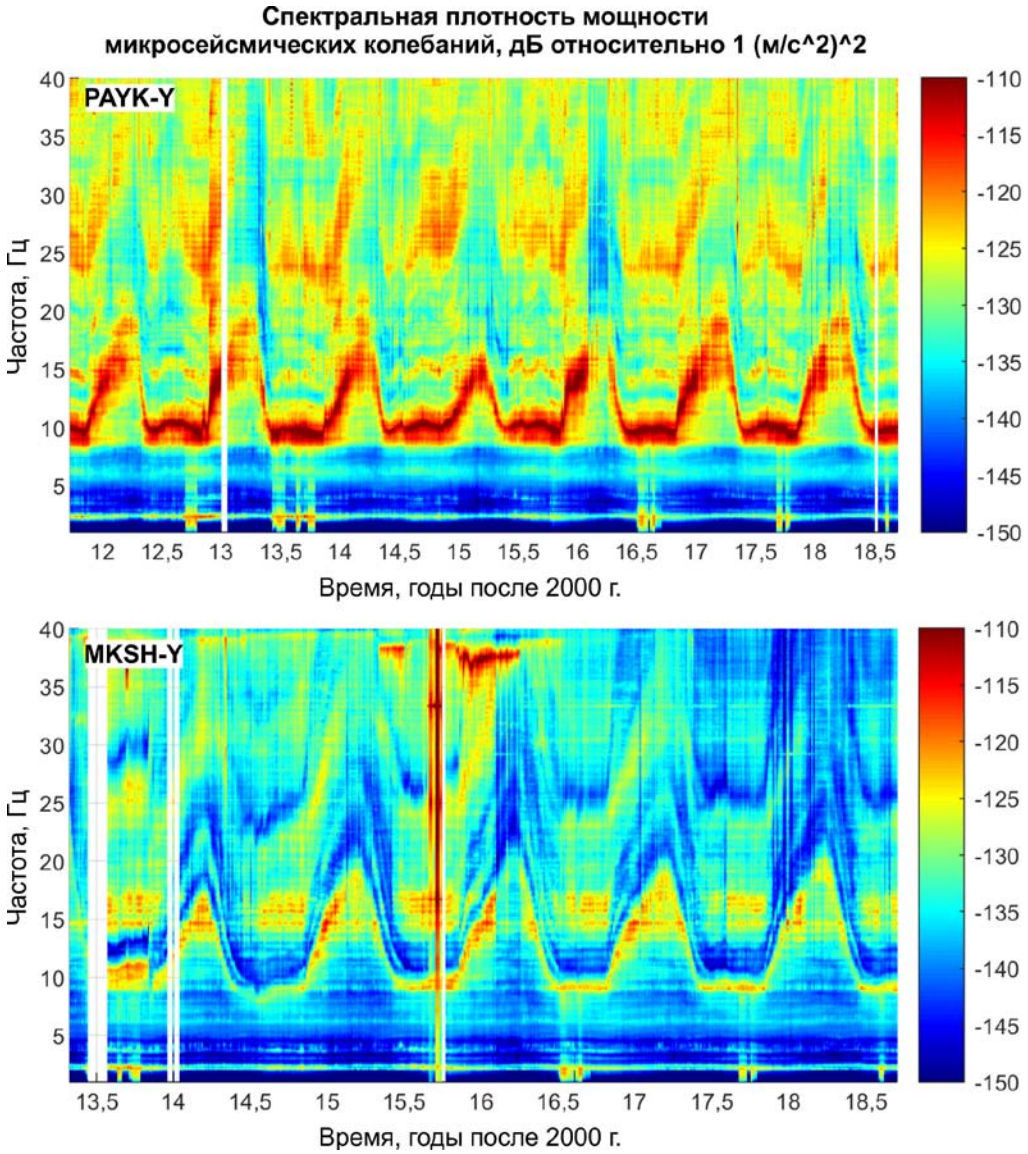


Рис. 1. Изменение во времени медианных значений СПМ микросейсмических колебаний на станциях PAYK и MKSH (Y-компонента).

Несмотря на то, что постаменты сейсмических датчиков на всех станциях ЛСС установлены на скальный грунт, частотный состав микросейсмических колебаний и характер их вариаций во времени на разных сейсмостанциях принципиально различаются. Частотный состав микросейсмических колебаний и его вариации также принципиально различны на вертикальных и горизонтальных каналах сейсмических записей. Далее будут обсуждаться результаты, касающиеся

горизонтальных каналов, поскольку амплитуды микросейсмического шума на них более чем в два раза выше, чем на вертикальных.

Вертикальным серым линиям на низких частотах на рис. 1 соответствуют периоды интенсивного сброса воды через водосбросы мимо турбин. В целом, на станциях ЛСС превалируют частоты, которые непосредственно не излучаются агрегатами ГЭС, и их амплитуды во много раз выше амплитуд «традиционного» виброизлучения на частотах около 2-3 Гц. Это касается, в том числе и самой близкой к плотине ГЭС продолжительно работающей станции, расположенной в п. Талакан. Вместе с тем, в отличие от низких частот, высокочастотное излучение непостоянно и по амплитуде, и по частоте. Меняются, в том числе, величины доминирующих частот – на десятки процентов на вертикальных компонентах и почти до двух раз на горизонтальных компонентах.

Изменение доминирующих частот колебаний носит сезонный характер с периодом около года, однако его характер не может быть объяснён локальными явлениями. Например, процессы промерзания и оттаивания грунта не совпадают по времени с временными интервалами повышения и понижения основной частоты колебаний. При этом изменение доминирующих частот колебаний коррелирует с вариациями уровня воды в водохранилище. Понижение уровня воды сопровождается ростом основной частоты. После начала повышения уровня воды значение частоты быстро возвращается к низким значениям (рис. 2).

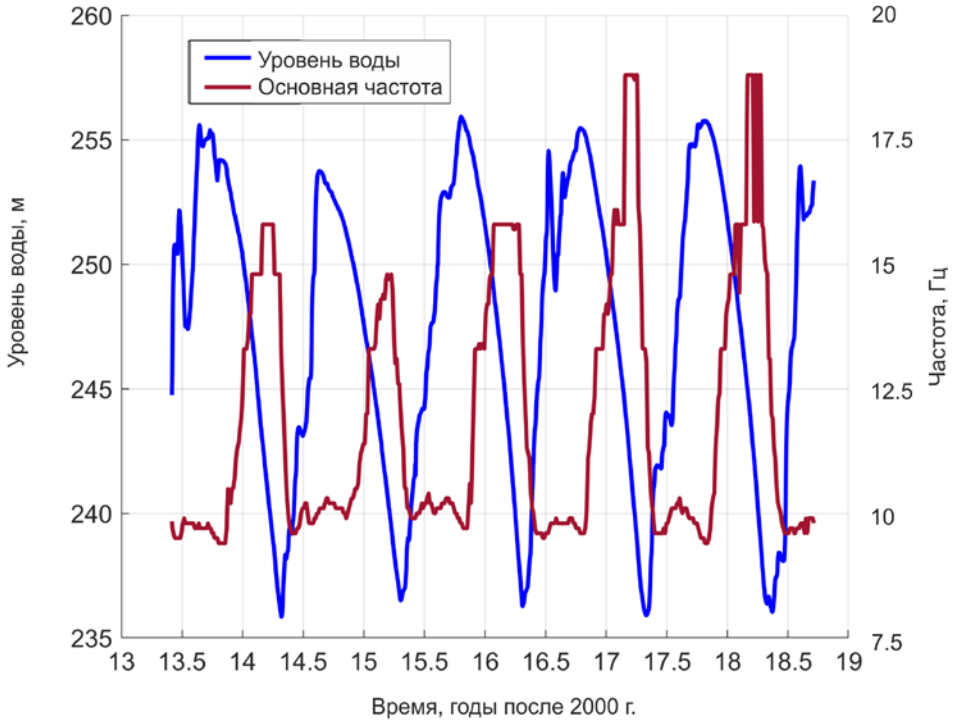


Рис. 2. Уровень воды в водохранилище и основная частота высокочастотной составляющей микросейсмических колебаний на станции PAYK (Y-компонента).

Вероятная причина наблюдаемой корреляции уровня воды в водохранилище и частотного состава высокочастотных микросейсм состоит в том, что наблюдаемый микросейсмический шум – следствие вынужденных колебаний плотины ГЭС. В этом случае изменение уровня воды в водохранилище приводит к изменению нагрузки на плотину. Перераспределение напряжений в теле плотины приводит к изменению частот собственных колебаний плотины.

На рис. 3 в дополнение к диаграмме изменения во времени медианных значений СПМ микросейсмических колебаний отмечены времена и частоты наблюдаемых аномально высоких амплитуд колебаний на записях слабых локальных и региональных землетрясений.

Указанные частоты в подавляющем большинстве случаев совпадают с частотами максимумов СПМ микросейсмических колебаний, при этом не только для «основной» частоты из диапазона 9-18 Гц, но и для частот более 20 Гц, интенсивность микросейсмических колебаний на которых выше «фоновых» значений на 5-10 дБ.

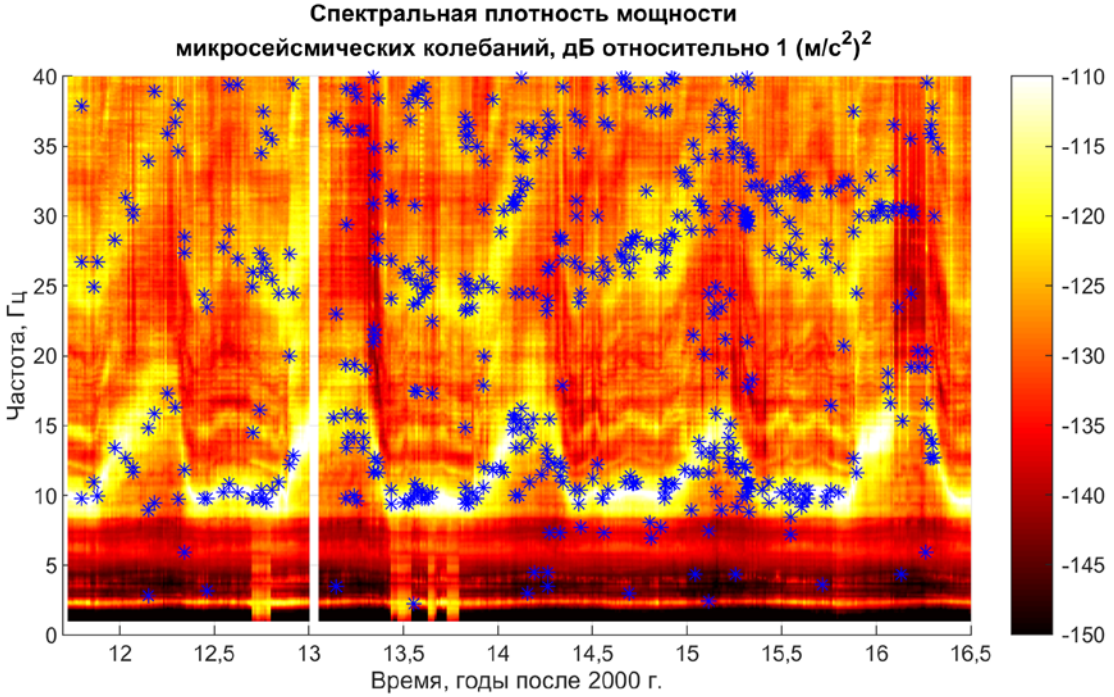


Рис. 3. Изменение во времени медианных значений СПМ микросейсмических колебаний на станции PAYK (Y-канал). Звёздами обозначены частоты, на которых наблюдены аномально высокие амплитуды колебаний записей слабых локальных и региональных землетрясений.

Результаты, в том числе приведённые на рис. 3, показывают, что сейсмические волны землетрясений усиливаются в той же степени, что и микросейсмические колебания, источником которых служит плотина и агрегаты ГЭС. Это означает, что плотина Бурейской ГЭС является фактором, существенно повышающим сейсмическую опасность для прилегающей территории (п. Талакан), а не только для самой плотины, которая проектируется по существенно более жёстким нормам.

Благодарности

Автор благодарен Филиалу ПАО «РусГидро» – «Бурейская ГЭС», любезно предоставившему данные локальной сейсмологической сети Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных - кандидатов наук № МК-306.2020.5.

Список литературы

1. *Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адилов З.А., Ting-Yu Hsu, Arygianni V.* Особенности мониторинга собственных частот плотин гидроэлектростанций (на примере Чиркейской ГЭС) // Российский сейсмологический журнал. 2019. Т. 1. № 1. С. 23–34.

2. *Пупатенко В.В., Рябинкин К.С.* Затухание сейсмических колебаний в районе Бурейской ГЭС и его связь с резонансными эффектами // Успехи современного естествознания. 2018. № 10. С. 108–113.

3. *Трофименко С.В., Рябинкин К.С., Пупатенко В.В., Колотова Л.Г., Харитонов М.Е.* Динамика геосреды по спектральной плотности мощности микросейсм до и после землетрясений // Тихоокеанская геология. 2017. № 5. С. 20–28.

4. *Харитонов М.Е., Гильманова Г.З.* Эффекты наведенной сейсмичности вблизи Бурейской ГЭС // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всероссийская научная конференция с международным участием (г. Южно-Сахалинск, 26-30 мая 2015 г.). Владивосток: Дальнаука, 2015. Том 1. С. 218–221.

5. *Barros, L.V., Assumpção M., Ribotta L.C., Ferreira V.M., de Carvalho J.M., Bowen B.M., Albuquerque D.F.* Reservoir Triggered Seismicity in Brazil: Statistical Characteristics in a Midplate Environment // B ulletin of the Seismological Society of America. 2018. Vol. 108. No. 5B. P. 3046–3061.

6. *Simpson D.W., Stachnik J.C., Negmatoullaev S.K.* Rate of Change in Lake Level and Its Impact on Reservoir Triggered Seismicity // Bulletin of the Seismological Society of America. 2018. Vol. 108. No. 5B. P. 2943–2954.

7. *O'Connell D. R. H.* Concrete dams as seismic imaging sources // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. No. 20. L20307.

УДК 550.34

НОВОЕ О ПРИРОДЕ ГЛУБОКОФОКУСНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

***Родкин М.В.*[1,2]**

[1]*Институт теории прогноза землетрясений и математической физики РАН, г. Москва*
[2]*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск*
rodkin@mitp.ru

Предыстория проблемы

Давно известен парадокс сейсмичности [2, 3, 6, 8, 9, 12]. Легко показать, что в условиях температур и давления недр Земли хрупкое разрушение по модели Рида невозможно на глубинах более 30-50 км. В то же время, землетрясения более-менее непрерывно продолжаются до глубин более 700 км, причем никаких изменений в параметрах очагов землетрясений от глубины, несмотря на значительные усилия, выявлено не было. Выявляются только некоторые второстепенные различия; у глубоких землетрясений в среднем меньше афтершоков, и характер излучения глубоких очагов имеет более симметричные нарастание и спад [12, и др.].

Для объяснения глубоких землетрясений были предложены модели, предполагающие решающую роль процессов дегидратации и фазовых переходов. Модель дегидратации является самой распространенной для объяснения промежуточных землетрясений, с глубинами от 70 до 300 км [3, 10-12, и др.]. Предполагается, что высокое давление выделяющегося флюида компенсирует рост давления с глубиной и позволяет реализоваться обычным сдвиговым подвижкам. Отметим, что предположение о таком механизме предполагает возможность реализации такого же механизма и в вышележащих слоях, куда флюид внедряется под высоким давлением.

Меньше единодушия в вопросе о природе глубоких землетрясений, с глубиной очага более 200-300 км. Обычно предполагалась связь с фазовыми превращениями в верхней мантии, тем более что в распределении числа землетрясений с глубиной (рис. 1) намечаются максимумы сейсмичности на глубинах фазовых превращений [3, 4, 7, 8, 10, и др.]. Графики, аналогичные представленному на рис. 1, традиционно используются в качестве свидетельства связи глубоких землетрясений с превращениями вещества погружающихся литосферных плит.

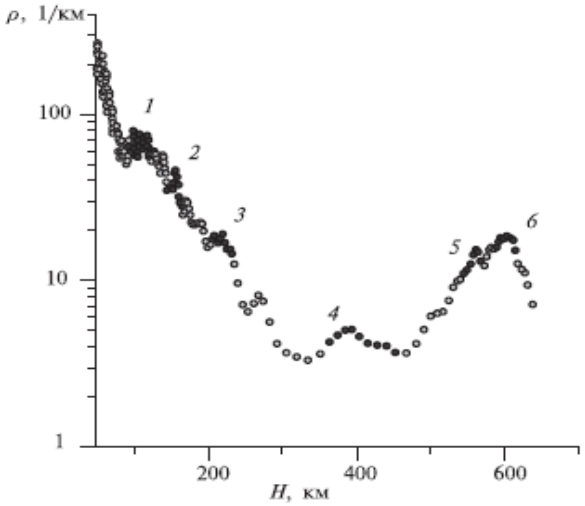


Рис. 1. Зависимость плотности числа событий ρ (по данным Гарвардского каталога) от глубины Н. Черным цветом выделены максимумы, соответствующие глубинам твердофазных превращений:
1 — десерпентинизация (двойная сейсмофокальная зона); 2 — эклогитизация; 3 — образование А-фазы; 4 — α–β- превращение; 5 — β–γ-превращение; 6 — γ-фаза Pv+Mw переход, [6].

Исходно предполагался процесс замороженных и внезапно реализующихся фазовых превращений. Эта гипотеза дополнительно подкреплялась тем, что в разных зонах субдукции сейсмичность прекращается на разном уровне, в зависимости от скорости субдукции и возраста (мощности) погружающейся плиты. Получалось, что сейсмичность ограничена условием, что температура зоны сейсмичности не выше 900^{o}C, а это та температура, выше которой трудно

предполагать замораживание и задержку превращений [3]. Но заметим, что эта тенденция не указывает на роль именно фазовых превращений; высокая температура будет приводить к крипу и препятствовать быстрым подвижкам при любом механизме землетрясений.

Однако при внезапных фазовых превращениях следовало ожидать доминирующих объемных изменений очаговой области, а такие изменения в очагах глубоких землетрясений не фиксировались. Вариантом фазовой модели стал подход, основанный на учете аномалии реологических свойств вещества в процессе твердотельных (в частности, фазовых) превращений [2, 3, 6, 9, 14, 15]. При этих превращениях имеют место, во-первых, изменения кристаллической решетки, во-вторых, возможно возникновение высоких локальных напряжений, в связи с изменением плотности вещества и кристаллической структуры. В ходе превращений, даже при слабых внешних негидростатических напряжениях вещество приобретает аномальную деформируемость; этот эффект получил название трансформационной сверхпластичности [3; 5, 6, и ссылки в этих монографиях]. В процессе превращения с относительным изменением объема ($\Delta V/V$) твердое тело приобретает свойства вязкой жидкости, и при одноосном напряжении σ деформируется со скоростью $d\varepsilon/dt$ пропорциональной приложенному напряжению σ:

$$d\varepsilon/dt = R\,(\Delta V/V)\,(\sigma/I)\,dc/dt, \qquad (1)$$

где dc/dt – скорость фазового превращения, I – предел пластичности слабейшей из фаз, R – коэффициент. При $(\sigma/I) \ll 1$, R близок к единице; при $(\sigma/I) \approx 1$, $R \approx 10$ [3, 5].

В [6, 13] приведены оценки, что при реализации заторможенного фазового превращения в поле относительно высоких негидростатических напряжений возможны деформации, только около 10% которых представляют объемную составляющую, а скорости деформации сравнимы со скоростями подвижек при землетрясениях.

Такая модель представляется приемлемой для объяснения глубоких землетрясений. Открытым, однако, остается вопрос, происходит ли замораживание превращений в процессе субдукции, и наблюдается ли в очагах глубоких землетрясений соответствующая, пусть и второстепенная, объемная компонента. Последний вопрос в значительной степени остается открытым, в частности, из-за сложной внутренней структуры зон субдукции [11,12,19]; в [19] в частности, аргументируется, что типичные для глубоких землетрясений отличия механизма очага от модели двойного диполя могут объясняться сильной анизотропией в материале погружающейся плиты.

В самое последнее время появился цикл работ аргументирующих, что глубокие землетрясения также могут объясняться наличием флюидной компоненты [17]. Авторы исходят из того, что в связи с областями субдукции наблюдались находки алмазов, предположительно образовавшихся в диапазоне глубин глубокофокусных землетрясений и при наличии флюидной фазы. Широкий максимум сейсмичности, начинающийся с глубин около 400 км, связывается в [17] с этим процессом. При этом природа требуемых при этом достаточно заметных объемов флюида остается открытой.

Подчеркнем, что обсуждавшиеся выше изменения механизма землетрясений с глубиной, как уже отмечалось, не находят подкрепления в изменениях параметров очагов землетрясений. Эти вопросы обсуждаются ниже.

Свидетельства в пользу изменений физических механизмов сейсмогенеза с глубиной

Убедительный пример выполнения парадокса сейсмичности связан с Командорским сегментом Алеутской зоны субдукции. На рис.2, по данным GCMT каталога, даны положения эпицентров неглубоких (H<50 км) и промежуточных (H> 50км) землетрясений. Также показаны современные вулканы и направление смещения океанической плиты. Неглубокие землетрясения распространены вдоль всей зоны субдукции. Но землетрясения с H>50км и современные вулканы имеются только на Алеутском и Камчатском сегментах зоны. На Командорском участке, где направление движения плиты почти параллельно простиранию островной дуги, ни землетрясений с H> 50км, ни вулканов нет. При том, что скорость проскальзывания плиты вдоль желоба составляет 8 см/год. На Камчатке цепь активных вулканов резко обрывается вулканом Шивелуч, самым северным и очень активным вулканом Камчатской группы вулканов. Обращают на себя внимание резкость обрыва цепи вулканов.

Вулканизм островной дуги принято связывать с водным флюидом, выделяющимся при субдукции в результате дегидратации. В свете вышесказанного естественно заключить, что

отсутствие землетрясений с H> 50км на Командоском участке зоны субдукции связано с отсутствием здесь собственно процесса субдукции и соответствующих изменений P,T условий и превращений, в частности процессов дегидратации. Таким образом, находит весомое подкрепление предположение, что промежуточные землетрясения связаны с процессами дегидратации, а землетрясений обычного типа, как то теоретически и предполагалось, действительно не бывает на глубинах более 50 км.

Отметим, что отсутствие более глубоких землетрясений характерно и для континентальных зон сдвига. Так, вдоль хорошо изученных региональных сдвиговых зон Северо-Анатолийского разлома и Сан-Андреас наблюдается максимум сейсмичности на глубинах 10-15 км и отсутствие землетрясений на глубинах более 20 – 30 км. Относительные скорости смещений по этим разломам составляют 2 – 3.5 см/год, и вполне очевидно, что движения по этим разломам не ограничиваются верхней корой, но захватывают и более глубокие горизонты литосферы [16]. Однако значительных погружений коровых блоков здесь не происходит, значительных изменения PT условий в породных комплексах также не происходит, соответственно метаморфические превращения не активны, не наблюдается и землетрясений. Заметим, что на Командорском сегмента зоны субдукции скорости относительных смещений плит выше, около 8 см/год, и землетрясения здесь продолжаются глубже, до 40-50 км.

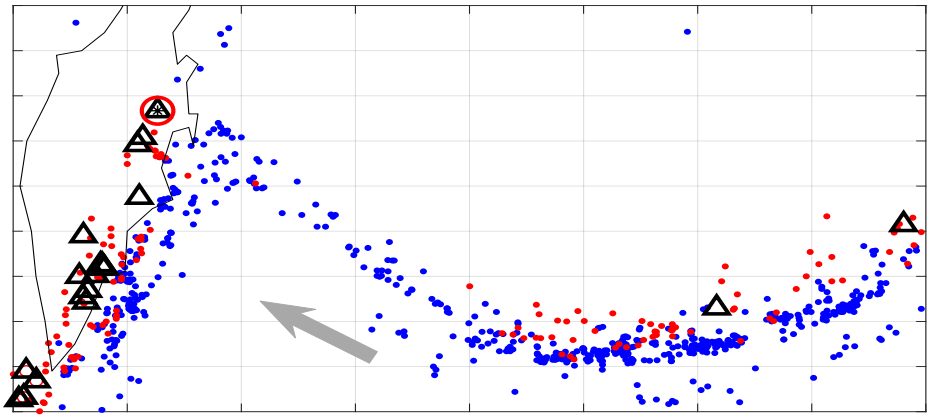


Рис. 2. Соотношение развития приповерхностной и более глубокой сейсмичности (синие и красные точки соответственно) и активных вулканов (треугольники). Стрелкой дано направление движения Тихоокеанской плиты. Красным кружком обведён вулкан Шивелуч.

В качестве нерешенного вопроса выше отмечалось также рассогласование между предположительно относительно узкими интервалами глубин фазовых переходов и непрерывностью распределения глубоких землетрясений по глубине (рис. 1). Рис. 3 демонстрирует расположение разноглубинных землетрясений в Курило-Камчатской и Японской зонах субдукции. Интервалы глубин выбраны с учетом предполагаемых глубин фазовых превращений и характера изменения числа землетрясений с глубиной (рис. 1). Видно, что для отдельной зоны субдукции распределение землетрясений по глубине отнюдь не непрерывное; землетрясения группируются в довольно узких глубинных интервалах, которые могут отвечать глубинам фазовых превращений в данной зоне субдукции. При этом сравнение данных GCMT каталога (с 1976 года) с данными ISC-GEM каталога (с 1904) указывает на постоянство интервалов глубин землетрясений на интервале времени более 100 лет. Отсюда естественно предположить, что непрерывность распределения землетрясений по глубине в масштабах планеты связана с различиями температурного режима и глубин фазовых превращений в разных зонах субдукции.

Выше подчеркивалось, что ранее не было выявлено существенных различий характера очагов землетрясений от глубины и признаков различия между областями реализации разных механизмов генерации землетрясений. Более полные современные мировые каталоги, однако, позволяют подойти к этому вопросу. На рис. 4 даны медианные значения величин кажущихся напряжений σ_a для последовательных по глубине групп из 100 землетрясений с шагом 50 событий. Использован GCMT каталог за 1976 -2019 годы. На рисунке (ось глубин дана в логарифмическим масштабе) хорошо выделяются несколько максимумов величин σ_a на глубинах примерно 10-13, 40-50 и 120-150 км.

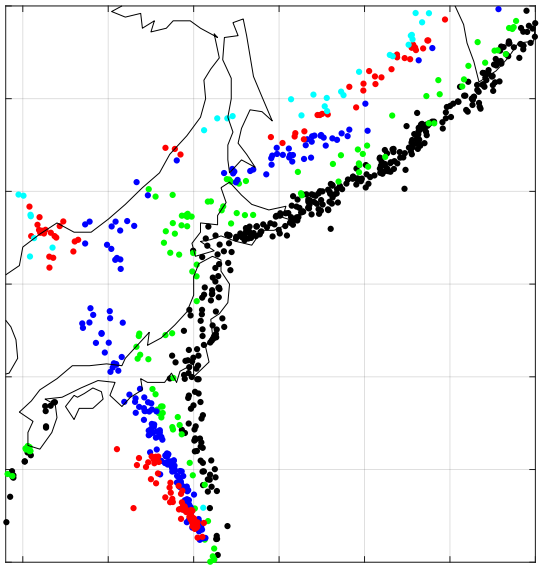


Рис. 3. Расположение землетрясений разной глубины, 80-160 км, черные точки; 160-320, зеленые; 320-460, синие, 460-570, красные и 570-720 голубые; GCMT каталог (1976-2019). Видно, что землетрясения отвечают достаточно узким полосам, соответственно и малым интервалам глубины.

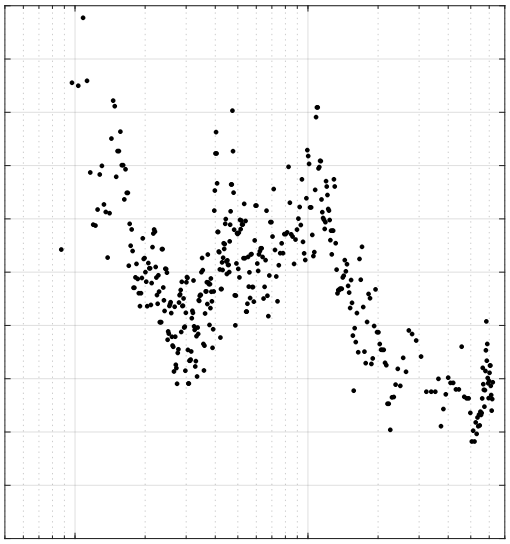


Рис. 4. Изменение медиан кажущихся напряжений σ_a с глубиной. Значения получены для последующих по глубине групп из 100 событий, с шагом 50 событий. Каталог GCMT (1976-2019).

Первый максимум соответствует глубине слоя-разделителя на границе свободной порово-трещиноватой циркуляции подземных вод и области закрытия трещин и развития уже сублитостатических давлений флюида [1]. Следующий максимум на 40-50 км отвечает границе возможности реализации обычных землетрясений. Последний максимум – 120-150 км соответствует нижней границе двойных сейсмофокальных зон в зонах субдукции; эти структуры связываются с процессами дегидратации материала погружающейся плиты. Таким образом, этот интервал глубин может отвечать окончанию процессов активной дегидратации. Еще один слабый максимум намечается в области прекращения сейсмичности, на глубинах более 600 км. Таким образом, по данным о механизмах очагов, удается выявить различие и границы реализации различных (пока, однако, более гипотетических) механизмов возникновения землетрясений.

Заключение

При известном парадоксе сейсмичности, о невозможность возникновения обычных землетрясений глубже 40-50 км, и наличии нескольких физических моделей землетрясений для разных глубин, практически отсутствовали указания на реально наблюдаемые различия параметров очагов землетрясений или характера сейсмичности с глубиной.

В работе приведены примеры, указывающие на реализацию парадокса сейсмичности, приуроченности глубоких землетрясений в отдельных зонах субдукции к достаточно узким интервалам глубины, а также указания на различие характера сейсмичности на разных глубинах. Максимумы характерных значений кажущихся напряжений уверенно маркируют глубинные интервалы границ между областями домирования разных физических механизмов сейсмогенеза.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 19-05-00466).

Список литературы

1. *Иванов С. Н.* Непроницаемая зона на границе верхней и средней части земной коры // Физика Земли. 1999. № 9. С. 96–102.

2. *Калинин В.А., Родкин М.В.* Физическая модель глубокофокусных землетрясений. Изв АН СССР, Физика Земли. 1982. 8. С. 3–12.

3. *Калинин В.А., Родкин М.В., Томашевская И.С.* Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука, 1989, 158 с.

4. *Кусков О.Л.* Топология фазовых диаграмм минеральных систем и глубокофокусные землетрясения // Геохимия, 1987. 8. С. 1093–1107.

5. *Пуарье Ж.-П.* Ползучесть кристаллов. Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах. М.: Мир, 1988, 287 с.

6. *Родкин М.В., Д.В. Рундквист.* Геофлюидодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам рудо- и нефтегенеза. Долгопрудный: Интеллект, 2017, 288 с.

7. *Тараканов Р.З., О.В. Веселов.* Полиморфные превращения в верхней мантии для различных тектонических зон // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. 1. 23. С.58-68.

8. *Griggs D.T., Handin J.* Observations on fracture and hypothesis of earthquakes // Geol. Soc. Am. Mem. 79. 1960. P. 347–373.

9. *Green HW 2nd*. Phase-transformation-induced lubrication of earthquake sliding. Philos Trans A Math Phys Eng Sci. 2017 Sep 28;375(2103):20160008. doi: 10.1098/rsta.2016.0008. PMID: 28827426; PMCID: PMC5580448.

10. *Iidaka T., Furukawa Y.* Double seismic zone for deep earthquakes in the Izu-Bonin subduction zone // Science. 1994. 263(5150). P. 1116–1118.

11. *Jian Wang,Dapeng Zhao,Zhenxing Yao.* Seismic anisotropy evidence for dehydration embrittlement triggering intermediate-depth earthquakes // Scientific Reports, 2017. 7: 2613. doi:10.1038/s41598-017-02563-w.

12. *Julian B.R., Angus D. Miller, G. R. Foulger.* Non-double-couple earthquakes 1. Theory // Reviews of Geophysics. 1998. Vol.36. Is.4. P. 525–549.

13. *Kalinin V.A, Rodkin M.V.* The quantitative deep earthquakes model // In: High Pressure Investigations in Geosciences. Academie-Verlag, Berlin. 1989. P. 213–217.

14. *Kirby S.H.* Localizef polymorphic phase transformations in high-pressure faults and application to the physical mechanism of deep earthquakes // J. Geophys. Res. B. 1987. 92(13). P. 13789–13800.

15. *Kirby, S. H., W. B. Durham, and L. A. Stern.* Mantle phase changes and deep earthquake faulting in subducting litho- sphere // Science. 1991. 152. P. 216–225.

16. *Savage JC, Svarc JL, Prescott WH* Geodetic estimates of fault slip rates in the San Francisco Bay area // J Geophys Res. 1999. 104. P. 4995–5002.

17. *Shirey, S. B., Wagner, L. S., Walter, M. J., Pearson, D. G., & Keken, P. E.* Slab Transport of Fluids to Deep Focus Earthquake Depths—Thermal Modeling Constraints and Evidence From Diamonds // AGU Advances, 2021. 2(2), e2020AV000304. https://doi.org/10.1029/2020AV000304

18. *Li, J., Zheng, Y., Thomsen, L. et al.* Deep earthquakes in subducting slabs hosted in highly anisotropic rock fabric // Nature Geosci. 2018. 11. P. 696–700. https://doi.org/10.1038/s41561-018-0188-3

19. *Zulian, M.,* A fluid's journey into deep earth may explain deep quakes // Temblor. 2021. http://doi.org/10.32858/temblor.183.

УДК 550.34

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ СЕЙСМИЧНОСТИ СОУС'09: 10 ЛЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА КАМЧАТКЕ

Салтыков В.А.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, salt@emsd.ru

Введение

Информация о текущем состоянии сейсмичности отдельного региона является достаточно широко востребованной. В круг заинтересованных лиц входят не только члены сейсмологического сообщества, но и структуры, по роду своей деятельности связанные с мониторингом природной среды (в частности, МЧС, административные структуры). Отдельной проблемой является предоставление информации о землетрясениях населению сейсмоактивных областей.

Учитывая широкий диапазон потребителей такой информации, используемые характеристики должны иметь, с одной стороны, интуитивно понятный смысл, а с другой – их определение должно опираться на количественные параметры сейсмического процесса. Традиционным решением является создание шкал, переводящих числовые показатели в качественные характеристики.

Формализация данной процедуры позволяет избежать ряда неоднозначностей при описании, оценке и сравнении сейсмического режима различных пространственно-временных объемов. Например, при составлении заключений о состоянии или прогнозе сейсмической обстановки многие исследователи используют понятие «*сейсмического фона*». Как правило, определение «*сейсмического фона*» не приводится, что ведет к недоразумениям при использовании таких заключений.

В государственном стандарте “Мониторинг и прогнозирование опасных геологических явлений и процессов” [1], в разделе, регламентирующем мониторинг землетрясений, присутствует понятие “*уровня сейсмического фона*”, как одного из требуемых параметров. Однако, в этом разделе ГОСТа лишь поясняется о чем идет речь – “*о пространственно-временном распределении слабых землетрясений*”, то есть определение этого понятия не введено. Таким образом, разработка шкалы уровня сейсмичности соответствует потребностям организаций, ответственных за организацию и ведение мониторинга сейсмичности, удовлетворяющего требованиям упомянутого государственного стандарта.

Другая проблема связана с выбором параметра, характеризующего уровень сейсмичности. Представляется, что использование абсолютных параметров, например, таких как активность A_{10}, выделившаяся сейсмическая энергия E и т.д., не является оправданным по ряду причин.

Предлагается для характеристики уровня сейсмичности конкретной пространственно-временной области использовать эмпирическую функцию распределения F суммарной выделившейся сейсмической энергии E (рис. 1). Тогда, задавая пороговые значения F и зная выделившуюся энергию E, можно сделать заключение о повышенной либо пониженной сейсмической активности региона.

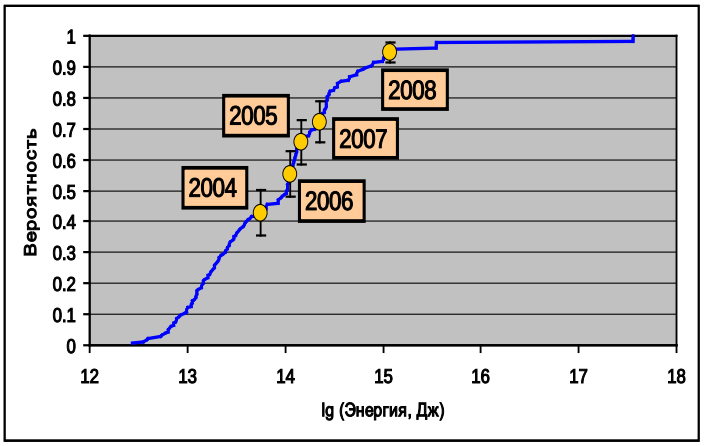


Рис. 1. Функция распределения сейсмической энергии, выделившейся за один год, для Прибайкалья-Забайкалья. Отмечены значения функции распределения для 2004–2008 гг.

Выбор сейсмической энергии как исходного параметра обусловлен ее более высокой устойчивостью по отношению к качеству каталога. Использование в тех же целях числа землетрясений N или активности A_{10} предъявляет достаточно высокие требования к однородности и

полноте используемого каталога. Энергия E ведет себя гораздо более устойчиво, так как практически вся выделившаяся энергия определяется наиболее сильными землетрясениями.

Учитывая статистический характер базового параметра, предложенная методика получила название *Статистическая Оценка Уровня Сейсмичности* – «СОУС'09».

Алгоритм «СОУС'09» [2]

Задачей является оценка уровня сейсмичности заданной пространственной области в интервале времени (T_1, T_2).

По данным однородного каталога землетрясений строится эмпирическая функция распределения для выделившейся сейсмической энергии во временном интервале $T=T_2-T_1$. Длительность каталога определяет точность оценок.

Используя набор функций распределения F для различных временных интервалов ΔT, можно получить зависимость любого квантиля распределения энергии $K(F)$ от временного окна ΔT. В качестве опорных квантилей предлагается использовать $K(0.995)$, $K(0.975)$, $K(0.85)$, $K(0.15)$, $K(0.025)$, $K(0.005)$. Рассчитанные значения квантилей для набора значений ΔT аппроксимируются монотонной кривой. Представленные на едином графике аппроксимации формируют номограмму (рис. 2), которая позволяет дать качественную оценку сейсмического режима в любой конкретный отрезок времени (T_1, T_2). Для этого необходимо знать лишь сейсмическую энергию E, выделившуюся за это время.

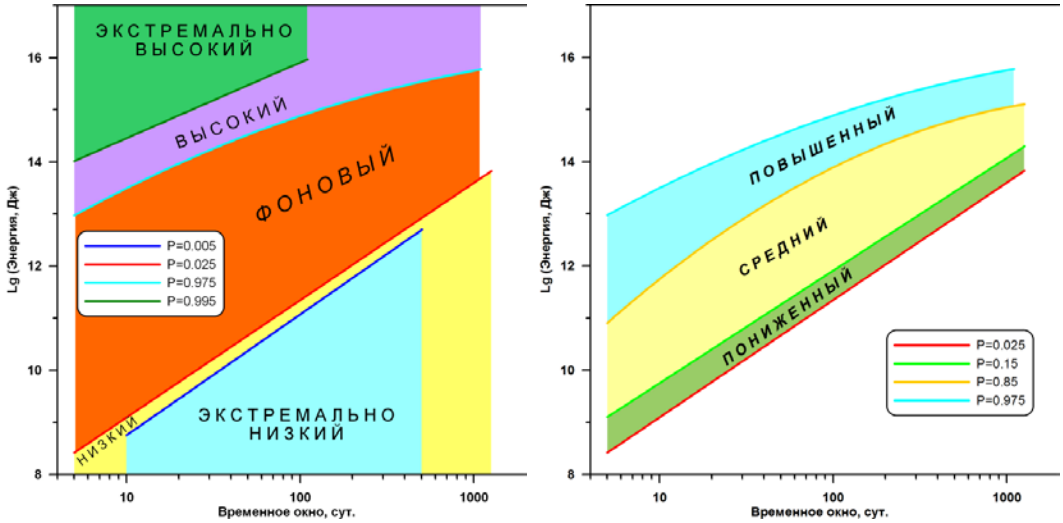


Рис. 2. Номограмма «СОУС'09» для Прибайкалья и Забайкалья: *слева*: для основной шкалы в пять градаций уровня сейсмичности; *справа*: разбиение «фонового» уровня на три подуровня.

Предлагается следующая шкала уровней сейсмичности:

- экстремально высокий – $K(0.995) \le \lg E$,
- высокий – $K(0.975) \le \lg E < K(0.995)$,
- фоновый – $K(0.025) < \lg E < K(0.975)$,
- низкий – $K(0.005) < \lg E \le K(0.025)$,
- экстремально низкий – $\lg E \le K(0.005)$.

Согласно такой градации в 95% случаев сейсмичность находится на фоновом уровне. При необходимости его можно разбить на три подуровня:

- фоновый (пониженный) – $K(0.025) \le \lg E < K(0.15)$,
- фоновый (средний) – $K(0.15) < \lg E < K(0.85)$,
- фоновый (повышенный) – $K(0.85) \le \lg E < K(0.975)$.

Данная методика имеет определенные ограничения применения, связанные с нижним уровнем энергии используемых землетрясений, с величиной анализируемого временного интервала и с длительностью каталога землетрясений.

Примеры использования методики СОУС'09

1. Оценка уровня сейсмичности региона или конкретного объекта (например, вулкан, разлом и т.п.)

В качестве примера (рис. 3) показана СОУСграмма, отражающая в цветовых кодах временной ход уровня сейсмичности для Камчатской сейсмоактивной области (КСО). Диапазон временных окон – от 5 до 365 сут. Здесь следует обратить внимание на то, что произошедшее сильное землетрясение переводит сейсмичность на высокий уровень на коротких временных интервалах, оставляя ее на

среднем фоновом уровне для длинных интервалов. То есть оценка СОУС всегда должна сопровождаться указанием величины временного интервала.

Обнаруженный эффект – относительно кратковременное предвестниковое затишье всей сейсмоактивной области, не выявленное другими методами. Сейсмические затишья, предваряющие сильные землетрясения, являются одним из часто встречающихся предвестников. Нами было многократно обнаружено кратковременное сейсмическое затишье – снижение регионального уровня сейсмичности до низкого, а иногда до экстремально низкого уровня в коротких (до 1 месяца) окнах перед землетрясениями магнитуды M=6–7. На рис. 3 представлены такие затишья перед землетрясениями 23.05.2018, 06.07.2018, 14.11.2018, 20.12.2018.

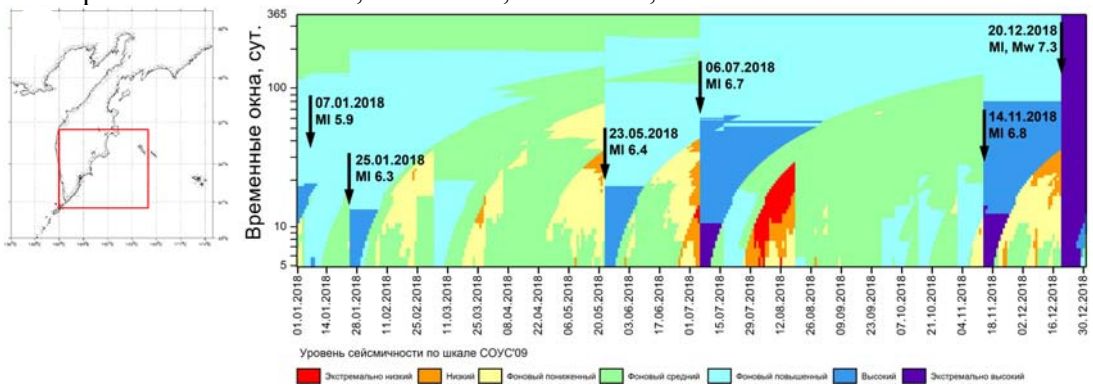


Рис. 3. Диаграмма СОУС для Камчатской сейсмоактивной области (КСО) в различных временных окнах.

2. Мониторинг состояния вулканов.

Методика СОУС'09 используется при мониторинге состояния активных вулканов Камчатки, где плотные сейсмические сети обеспечивают приемлемый уровень представительности каталога землетрясений, учитывая существенно более низкую энергетику вулканических землетрясений (по сравнению с тектоническими).

Вулкан Безымянный

Рис. 4. Осредненное по 19 извержениям вулкана Безымянный 1999-2014 гг. поведение уровня сейсмичности во временной окрестности извержения ($\Delta t = 0$).

Разработана методика прогноза извержения вулкана Безымянный [3] на основе использования шкалы СОУС'09. Предвестник определен как превышение порогового значения функции, связанной с текущим значением уровня сейсмичности и его характерным видом перед извержением (рис. 4). Определен полный набор параметров, характеризующих предвестник: достоверность, надежность, эффективность, вероятность реализации прогноза. Создана номограмма вероятности в зависимости от длительности прогноза и значения прогностического параметра.

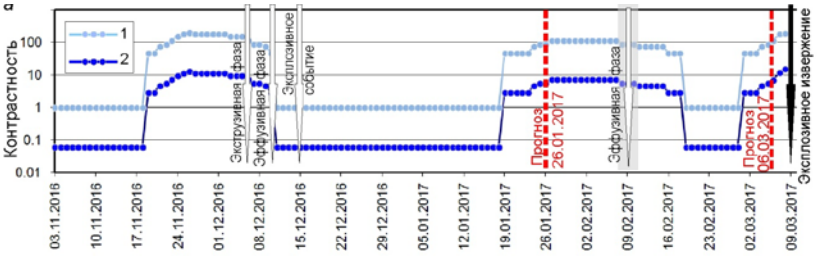


Рис. 5. Предвестниковые ситуации перед извержениями вулкана Безымянный в конце 2016 – начале 2017 гг.: отношение вероятности извержения вулкана при появлении предвестника к вероятности извержения в его отсутствие (1) и к среднемноголетней вероятности извержения (2).

С 2017 г. методика применяется в рабочем режиме в КФ ЕГС РАН (Рис. 5). На ее основе получены и переданы в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений предупреждения о семи извержениях 2017-2020 гг.

Вулкан Удина [4]

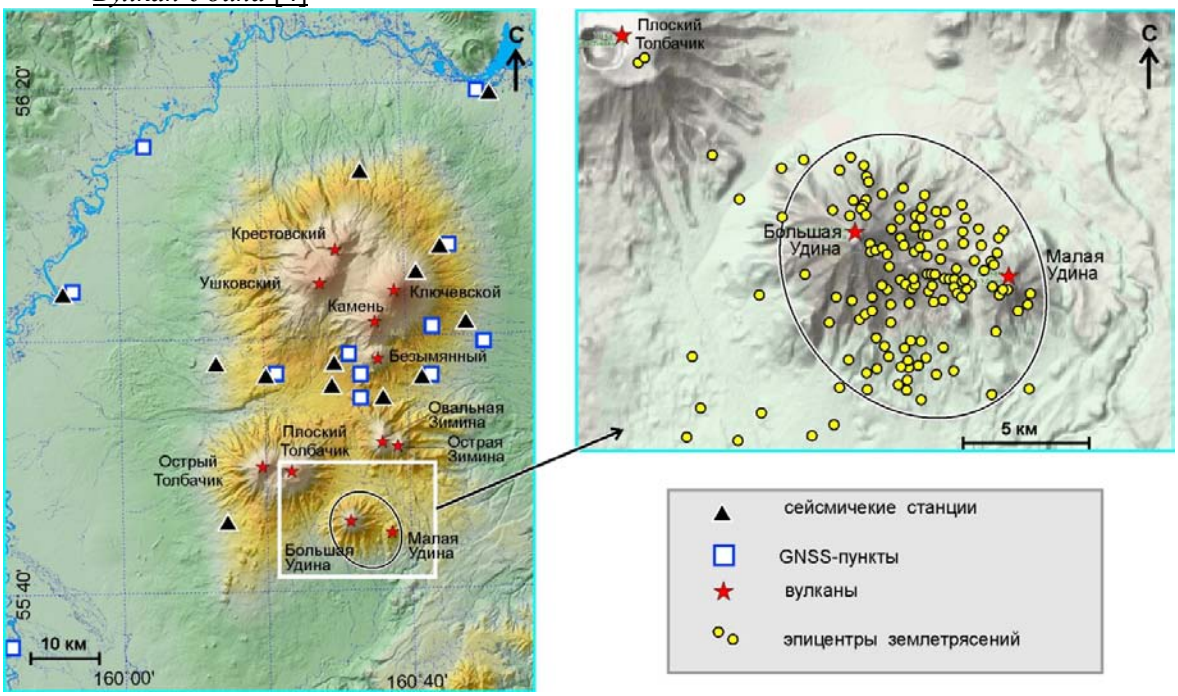


Рис. 6. Удинская сейсмическая активизация 2017–2018 гг. Сеть сейсмологических и геодеформационных наблюдений в районе Ключевской группы вулканов (слева). Карта эпицентров землетрясений в районе Удинских вулканов с 01.10.2017 г. по 22.03.2018 г. (справа).

С октября 2017 г. в районе Удинской группы вулканов наблюдается сейсмическая активизация (Рис. 6, 7). Ранее ничего подобного в этом районе не отмечалось.

В последние годы в мире повысился интерес к геоиндикатору volcanic unrest, который рассматривается как отклонение от обычного поведения вулкана. Индикаторами volcanic unrest выступают активизация сейсмичности, аномалии деформации земной коры, изменения газового состава фумарол, появление новых термоаномалий и др. По [5] 64 % различных зафиксированных на вулканах аномалий, рассматриваемых как volcanic unrest, заканчиваются извержениями.

Извержение нельзя исключить и в нашем случае, так как длительная Удинская сейсмическая активизация свидетельствует о нарушении стационарного состояния среды, что может быть связано с внедрением магмы под Удинские вулканы.

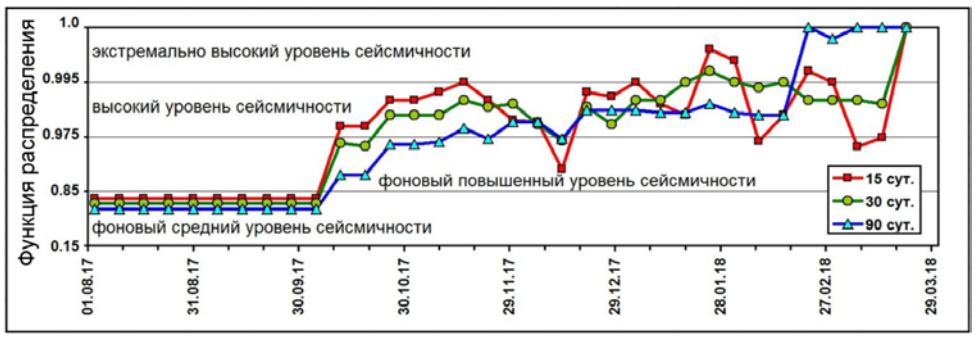


Рис. 7. Временной ход уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 в скользящем временном окне указанного размера. Расчеты проведены для области, оконтуренной эллипсом на рис. 6.

3. СОУС-карты различного масштаба

Сканирование пространства единичными кругами позволяет перейти от усредненной оценки к детальному представлению. Построение СОУС-карт заданного разрешения (рис. 8), определяемого радиусом единичного круга, позволяет оценивать уровень сейсмичности при различном пространственном масштабе ее вариаций, что дает возможность выявления как региональных, так и локальных эффектов. Это актуально при мониторинге объектов с неоднородной структурой сейсмичности – например, Камчатка с прилегающими островами и акваторией. Также применяется при априори неизвестном объекте (зона затишья, зона активизации и т.д.), что позволяет локализовать его. Как пример, на рис. 9 показаны зоны различного радиуса, в которых наблюдается

экстремально низкий или низкий уровень сейсмичности в течение интервала времени от 7 до 160 сут., на юге Камчатки.

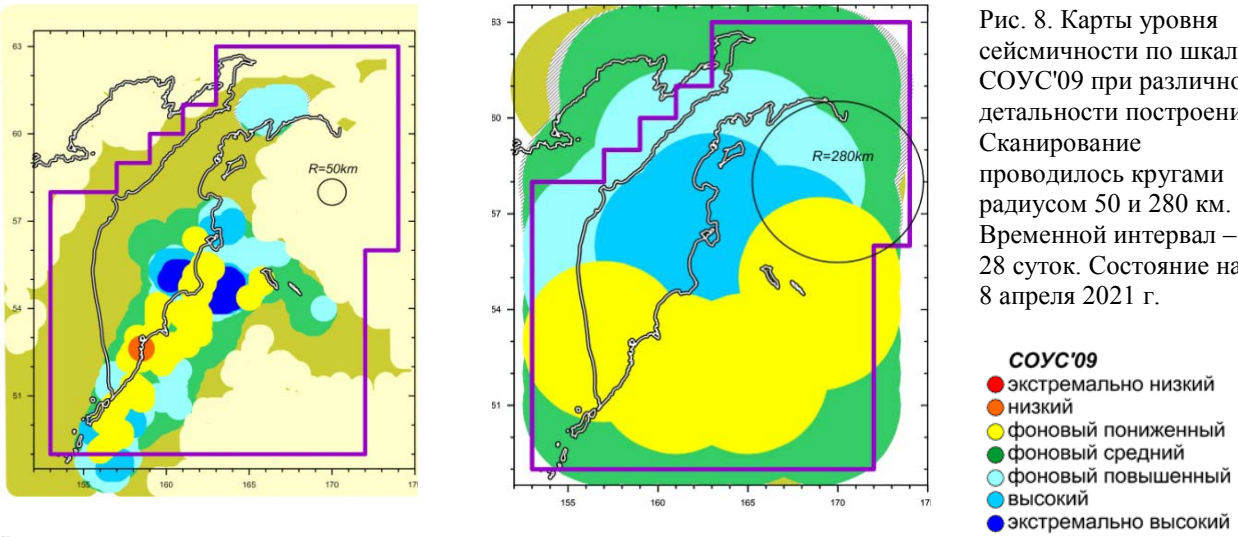


Рис. 8. Карты уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 при различной детальности построения. Сканирование проводилось кругами радиусом 50 и 280 км. Временной интервал – 28 суток. Состояние на 8 апреля 2021 г.

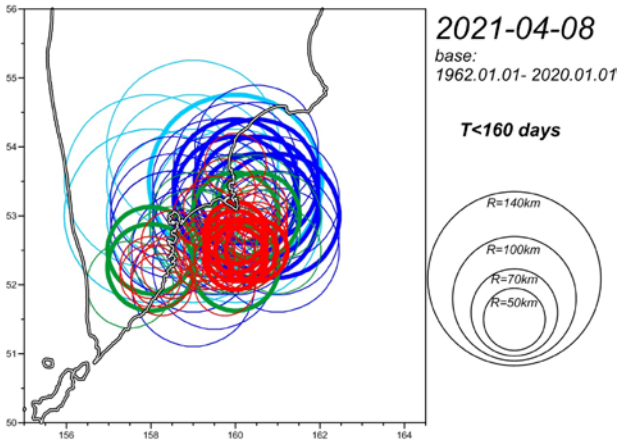


Рис. 9. Положение зон сейсмического затишья на юге Камчатки по состоянию на 8 апреля 2021 г. Продолжительность интервалов низкого (тонкие линии) или экстремально низкого (толстые линии) уровня сейсмичности от 7 до 160 сут.

Заключение

Представлена методика «СОУС'09», позволяющая в качественных терминах определить уровень сейсмичности в заданной пространственно-временной области, основываясь на количественном параметре – значении функции распределения сейсмической энергии.

Показаны примеры применения этой методики.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

Разделы работы, касающиеся мониторинга состояния вулканов, выполнены при частичном финансировании Российским фондом фундаментальных исследований (грант РФФИ №19-05-00204).

Список литературы

1. ГОСТ Р 22.1.06-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных геологических явлений и процессов. Общие требования. М: Госстандарт России, 1999. 16 с.

2. *Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.

3. *Салтыков В.А.* Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. № 3. С. 45–59.

4. *Салтыков В.А., Воропаев П.В., Кугаенко Ю.А., Чебров Д.В.* Удинская сейсмическая активизация 2017-2018 гг. // Вестник КРАУНЦ. 2018. № 1. Вып. 37. С. 5–7.

5. *Phillipson G., Sobradelo R., Gottsmann J.* Global volcanic unrest in the 21st century: An analysis of the first decade // Journal of Volcanology andGeothermal Research. 2013. V. 264. P. 183–196.

УДК 550.34

КАТАЛОГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ СЕТИ KISS В 2015-2016 гг.

Сенюков С.Л.[1,2], Дрознин Д.В.[1,2], Дрознина С.Я.[1], Шапиро Н.М.[2,3], Нуждина И.Н.[1], Кожевникова Т.Ю.[1], Соболевская О.В.[1], Назарова З.А.[1], Должикова А.Н.[1], Толокнова С.Л.[1], Карпенко Е.А.[1]

[1]Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия, ssl@emsd.ru
[2]Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия
[3]Институт наук о Земле, г. Гренобль, Франция

Введение

Главной целью установки сети сейсмических станций в рамках проекта KISS (Klyuchevskoy Investigation - Seismic Structure of an extraordinary volcanic system) было изучение глубинного строения Земной коры и верхней мантии в районе Ключевской группы вулканов (КГВ) [6]. Сеть KISS была установлена летом 2015 г. на период времени протяженностью один год. КГВ является одним из самых больших и активных вулканических кластеров в мире, который расположен в восточной части России на полуострове Камчатка, вблизи места стыка северной оконечности Курило-Камчатской зоны субдукции, западной части Алеутской дуги и северо-западного конца Гавайско-Императорской цепи подводных гор. КГВ включает в себя 13 действующих и потухших вулканов. Средний объем изверженных пород во времени за последние 10 000 лет оценивается примерно, как один кубический метр в секунду [1]. За последние десятилетия наибольшую активность проявляли вулканы: Ключевской, Безымянный и Плоский Толбачик. Подробное описание КГВ и существующих научных проблем в изучении ее строения приводится в статьях [3-5, 7].

Для решения поставленных задач по установке сети станций, сбору и обработке данных и получению новых моделей среды был создан международный консорциум, включающий ученых из разных научных организаций России, Франции и Германии. Предлагаемая работа освещает особенности обработки непрерывных сейсмических записей и отдельных землетрясений по станциям временной сети. Основным итогом обработки являются каталог и станционный бюллетень. Также в работе приводится анализ полученных результатов. Обработка данных, в основном, выполнялась в Камчатском филиале (КФ) ФИЦ ЕГС РАН (г. Петропавловск-Камчатский, Россия), а также в лаборатории сейсмической томографии ФГБУН Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН) (г. Новосибирск, Россия).

Сеть станций

Сеть постоянно действующих сейсмических станций Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН (международный код KAGSR) в районе КГВ состоит из 23 пунктов регистрации сейсмических сигналов, 16 из них оснащены короткопериодными приборами и 7 - широкополосными, рисунок 1. Летом 2015 г. в рамках проекта KISS было дополнительно установлено 77 временных станций. В итоге сейсмическая сеть покрыла площадь размером 150 на 150 км с шагом примерно 10-15 км. Информация о расположении, аппаратурном оснащении, и продолжительности работы станций представлена на рисунке 1. Более подробные сведения о проекте KISS даны в работах [5-6]. Волновые формы доступны на сайте данных GEOFON: https://geofon.gfz-potsdam.de/ под кодом X9.

Обработка данных

За основу были взяты окончательный каталог и станционные бюллетени КФ ФИЦ ЕГС РАН, которые составляются в оперативном режиме с задержкой обработки не более суток. Из каталога были выбраны землетрясения, представляющие интерес для последующих томографических исследований. Далее данные первичной обработки по станциям сети KAGSR дополнялись информацией со станций KISS. Обработка сигналов сейсмических станций, расчет параметров гипоцентров и энергетических характеристик землетрясений проводились в программе DIMAS [2]. На рисунке 2 приведены примеры записей тектонического и вулканического землетрясения на станциях временной сети KISS и карты с их эпицентрами.

Кроме стандартной обработки, был проведен дополнительный анализ непрерывных данных эксперимента KISS. В рамках этого анализа созданы алгоритм и программное обеспечение для выделения событий, которые не были локализованы по данным постоянной сети KAGSR.

Алгоритм выделения пропущенных событий реализован в несколько этапов:

1) Полосовая фильтрация вертикальных каналов суточных записей с диапазоном пропуска 1-10 Гц.

2) Выделение сейсмических событий с помощью *STA/LTA* детектора с параметрами STAlength=1сек, LTAlength=60 сек, THreshould=8, MinDuration=3 sec, LTAhold=On during event. В итоге зафиксировано 754025 срабатываний по всем станциям эксперимента KISS.

3) Группирование срабатываний с использований времен пробега P волн между станциями, взятыми из годографа (*TMaxP*). Предполагалось, что разница времен вступлений *Tp* волн P на двух станциях от реальных событий всегда меньше, чем *TMaxP*. Группирование проводилось по принципу: поиск минимум 6-ти срабатываний на разных станциях удовлетворяющих условию *fabs(tp(i)-tp(j))<TMaxP(i,j)* для каждой пары станций из набора. В итоге выделено 6374 событий, зарегистрированных шестью и более станциями.

4) Удаление известных событий, содержащихся в каталоге Камчатского филиала (12986 тектонических и вулканических землетрясений) и каталога NEIC с M>5 (1528 событий, лоцированных за пределами зоны ответственности Камчатского филиала). События удалялись, если для одного из детектированных вступлений принадлежащих одному из потенциальных событий разница ABS (времени вступления – (T в очаге-Tfirst пробега из годографа IASP91)) меньше 10 секунд. После перечисленных операций осталось 2526 событий.

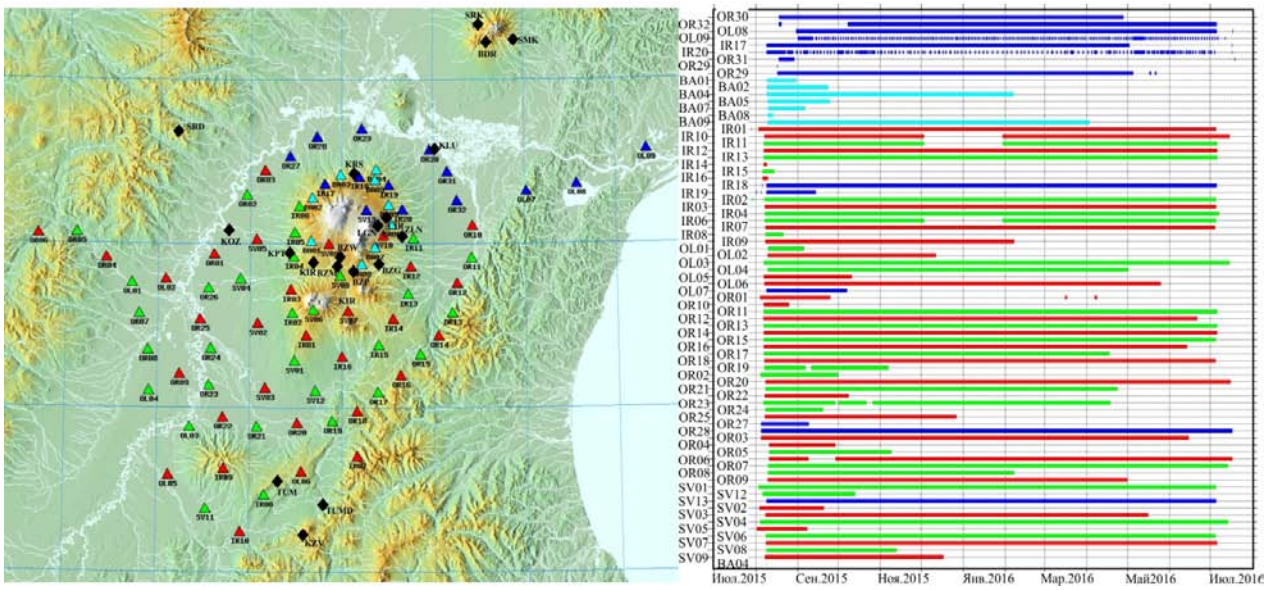


Рис. 1. Расположение станций Камчатской региональной сети KAGSR (черные ромбы) и станций эксперимента KISS (разноцветные треугольники) (слева). Периоды работы станций (справа). Цветом показано разное техническое оснащение станций: Trillium Compact с периодом до 120 сек. (красный); Guralp CMG‑6T и Guralp‑CNG‑6TD с периодом 30 сек. (синий); CME‑4111 с периодом 30 сек. (голубой); Mark L‑4C‑3D с номинальным периодом 1 сек., который может быть увеличен до 20 сек. (зеленый).

В пределах отведенного времени для обработки записей эксперимента KISS, сотрудниками была проанализирована большая часть волновых форм автоматически выделенных событий. В основном это слабые вулканические и тектонические землетрясения, для обработки которых было не достаточно данных постоянной сети КФ. Кроме этого встречались вулканические события в постройках вулканов без четких вступлений объемных волн, вторичные фазы от далеких землетрясений и помехи. В результате анализа в каталог добавлено 155 землетрясений, обработка которых по сети KAGSR была невозможна.

Результаты

В итоге финальный каталог содержит основные параметры для 2136 землетрясений. Из них 1206 региональные землетрясения, в основном из зоны субдукции и 930 локальные вулканические события, в том числе 155 вновь обработанных землетрясений. Карты эпицентров тектонических и вулканических землетрясений и проекции гипоцентров на вертикальный разрез приведены на рис. 3. Каталог в формате «xlsx» и станционный бюллетень в формате «isf» с пояснениями доступны на сервере КФ ФИЦ ЕГС РАН.

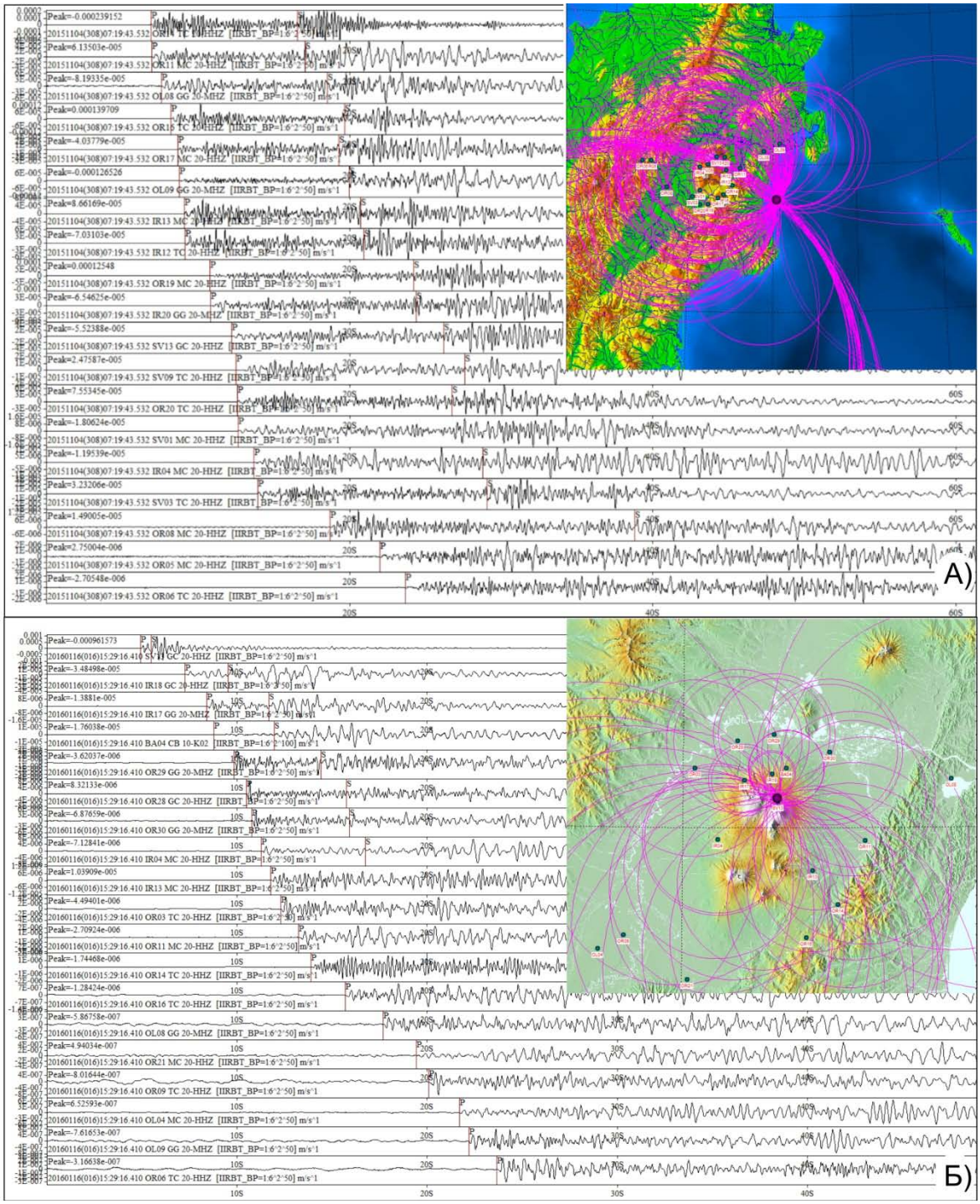


Рис. 2. Пример записи землетрясений на нескольких станциях KISS (вертикальные компоненты). Процесс обработки в программе DIMAS – фиксирование вступлений P и S волн. Надо отметить, что вступления S-волн отмечаются на горизонтальных каналах, которые здесь не представлены. А) Тектоническое землетрясение 4 ноября 2015 г. в 07^h19^m в Камчатском заливе на глубине ~40 км. Б) Вулканическое землетрясение 16 января 2016 г. в 15^h29^m в постройке Ключевского вулкана на глубине ~ (-1 км). На врезках показаны карты с эпицентрами и станциями, записи которых представлены.

Проведен анализ совместных решений из каталогов, полученных только по данным станций постоянной сети KAGSR и более плотной сейсмической сети, включающей станции проекта KISS и станции KAGSR. На рисунке 4 приведена разница параметров вулканических землетрясений, определенных разными сейсмическими сетями. По графикам можно оценить точность определения при существующей сети сейсмических станций Камчатского филиала. Параметры разброса решений «KAGSR+KISS» - «KAGSR» (среднее значение±средне квадратичное отклонение): *T0*=-0.11±0.43 сек; *LAT*=0.45±2.06 км; *LON*=0.50±4.05 км; *DEP*= -0.63±5.13 км; K_S=0.06±0.30. На рисунке 5 приведены

гистограммы распределения количества станций, использованных при обработке землетрясений при наличии сейсмических сетей разной плотности. В среднем число станций при сети «KAGSR+KISS» – 24, сеть «KAGSR» - 7.

Первые результаты по построению томографической модели КГВ с использованием данных времен вступлений для 1122 землетрясений опубликованы в работе [5].

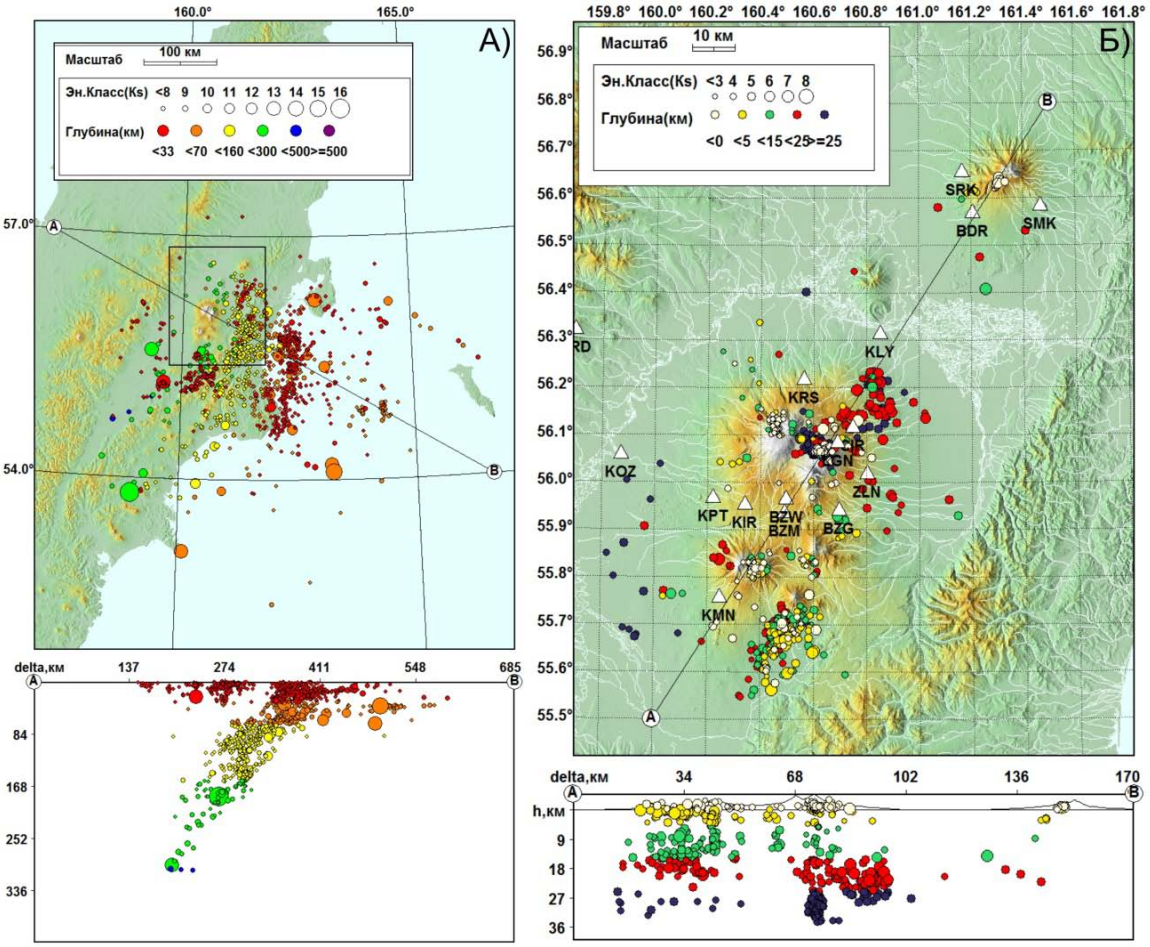


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений, обработанных по сети станций «KAGSR+KISS» и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии АВ. А) Тектонические землетрясения. Б) Локальные вулканические землетрясения (район, выделенный на карте А)

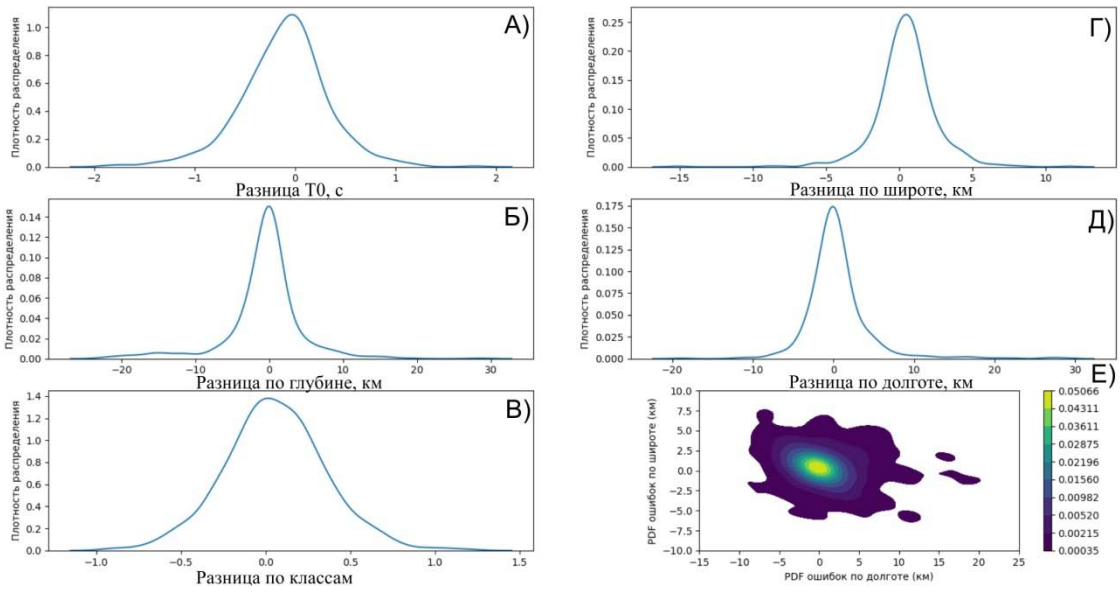


Рис. 4. Плотности распределения разницы параметров землетрясений, определенных по станциям сети «KAGSR+KISS» и станциям «KAGSR». А) Разница значений T_0. Б) Глубина. В) Энергетический класс. Г) Широта. Д) Долгота. Е) Плотность распределения ошибок в плане.

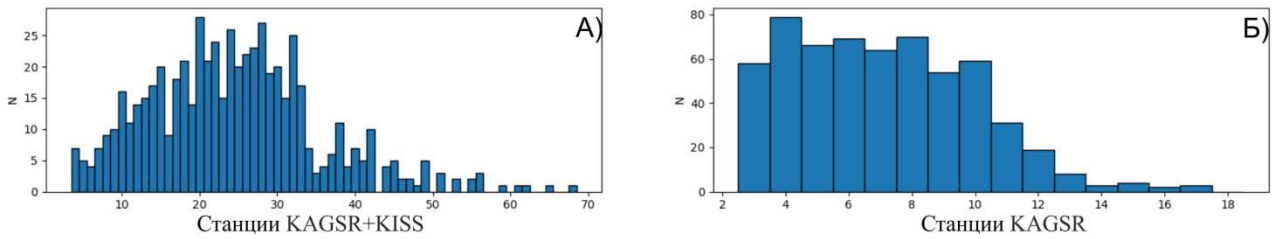


Рис. 5. Гистограмма распределения количества станций, участвующих в обработке землетрясений. А) Обработка по данным плотной сети станции «KAGSR+KISS». Б) Обработка по данным постоянной сети станций KAGSR.

Заключение

КГВ является одним из самых больших и активных вулканических кластеров в мире, который расположен в восточной части России на полуострове Камчатка. Для детального изучения КГВ летом 2015 г на период времени протяженностью один год была установлена сеть временных сейсмических станций KISS в рамках международного сотрудничества ученых из разных научных организаций России, Франции и Германии. Одной из важных задач проекта было получение каталога зарегистрированных землетрясений и станционного бюллетеня с временами вступлений P и S волн для построения новых томографических моделей среды под КГВ.

В результате обработки был получен итоговый каталог, включающий 2136 событий. Из них 1206 региональных землетрясений, в основном из зоны субдукции и 930 локальных вулканических событий, в том числе 155 вновь обработанных землетрясений. Каталог в формате «xlsx» и станционный бюллетень в формате «isf» с пояснениями хранятся на сервере КФ ФИЦ ЕГС РАН. Проведенный анализ совместных решений из каталогов, полученных только по данным станций постоянной сети KAGSR и более плотной сейсмической сети, включающей станции проекта KISS и станции KAGSR позволил оценить разброс параметров землетрясений. Полученные средние систематические отклонения не превысили ошибки определения по существующей сети.

Первые результаты по построению томографической модели КГВ с использованием данных времен вступлений по 1122 землетрясениям опубликованы в работе [5].

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки № 14.W03.31.0033 «Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ». В работе использованы сейсмологические данные, полученные в рамках темы НИР АААА-А19-119031590060-3 госзадания № 075-00576-21 ФИЦ ЕГС РАН на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. Действующие вулканы Камчатки // отв. ред. С.А.Федотов и Ю.П. Масуренков, М.: Наука, 1991, Т.1, 302 с.

2. *Дрознин Д.В., Дрознина С.Я.* Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов «DIMAS» // Сейсмические приборы. М.: ИФЗ РАН, 2010. 46. № 3. С. 22–34.

3. *Егорушкин И.И., Кулаков И.Ю., Шапиро Н.М., Гордеев Е.И., Яковлев А.В., Абкадыров И.Ф.* Структура верхней коры под вулканами Ключевской группы по данным шумовой томографии // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 1. С. 85–102. DOI: 10.15372/GiG2020184

4. *Green R.G., Sens-Schönfelder C., Shapiro N., Koulakov I., Tilmann F., Dreiling J., et al.* Magmatic and sedimentary structure beneath the Klyuchevskoy Volcanic Group, Kamchatka, from ambient noise tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020. V.125. e2019JB018900. https://doi.org/10.1029/2019JB018900

5. *Koulakov I., Shapiro N.M., Sens-Schönfelder C., Luehr B.G., Gordeev E.I., Jakovlev A., et al.* Mantle and crustal sources of magmatic activity of Klyuchevskoy and surrounding volcanoes in Kamchatka inferred from earthquake tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020. V.125. e2020JB020097. https://doi.org/10.1029/2020JB020097

6. *Shapiro N.M., Sens-Schönfelder C., Lühr B.G., Weber M., Abkadyrov I., Gordeev E.I., Koulakov I., Jakovlev A., Kugaenko Y.A., Saltykov V A.* Klyuchevskoy volcanic group experiment (KISS) // GFZ Data Services. Other/Seismic Network. 2015. doi:10.14470/K47560642124

7. *Shapiro N.M., Sens-Schönfelder C., Lühr B., Weber M., Abkadyrov I., Gordeev E.I., Koulakov I., Jakovlev A., Kugaenko Y., Saltykov V.* Understanding Kamchatka's Extraordinary Volcano Cluster // EOS, 2017. DOI: 10.1029/2017eo071351.

УДК 550.34

СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНА АВАЧИНСКИЙ В 1994-2020 гг.

Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, ssl@emsd.ru

Введение

Действующий вулкан Авачинский (φ=53.24°N; λ=158.88°E) расположен в 30 км от наиболее густонаселенных городов Камчатки – Петропавловск-Камчатский и Елизово. Город Петропавловск-Камчатский построен на примерно 200 метровой толще пород, выброшенных при извержении Авачинского вулкана около 30 тыс. лет назад [8], именно поэтому его извержения могут иметь самые опасные последствия. Сводка об извержениях Авачинского вулкана в историческое время (с 1737 г.) приводится в «Каталоге действующих вулканов Камчатки» [1] и в книге «Действующие вулканы Камчатки» [5]. В литературе достоверно найдены сведения о 14-ти последних извержениях 1737, 1772, 1779, 18 27, 1855, 1878, 1881, 189 4-1895, 1901, 1909, 192 6-1927, 1938, 1945 и 1991 гг. Извержения преимущественно эксплозивные (взрывного характера), всегда сопровождались лавинами раскаленного рыхлого материала. Иногда горячие лавины вызывали возникновение грязевых потоков, которые имели характер горячих лахаров длиной до 18 км (1938 г.). Шесть извержений из 14-ти закончились излиянием небольших лавовых потоков, длина которых не превышала 5 км (например, в 1991 г.).

Первые детальные сейсмические наблюдения за вулканом Авачинский начались с открытия стационарной сейсмической станции «Авача» (недалеко от современной станции «AVH» на рисунке 1) в 1963 г. Регистрация и обработка землетрясений с 1964 г. по 1970 г. проводились под руководством В.И. Горельчик (Институт вулканологии ДВО РАН) [3, 4]. В это время вулкан Авачинский находился в спокойном состоянии, и были отмечены следующие особенности его сейсмического режима: 1) большинство землетрясений в районе Авачинского вулкана с классом $K_S = 4.0\text{-}6.0$ (K_S - энергетический класс по номограмме С.А. Федотова [16]) лоцированы в постройке вулкана до глубины не более 2 км ниже уровня моря; 2) на графике ежемесячного количества землетрясений отмечается чередование максимумов и минимумов сейсмической активности: максимумы – июль-август и сентябрь-январь, минимумы – март-май; 3) отмечена тенденция к уменьшению угла наклона графика повторяемости в 1964-1970 гг., что может свидетельствовать о росте напряжений в постройке вулкана Авачинский и приближении нового извержения.

Телеметрическая сеть сейсмических станций в районе Авачинской группы вулканов была установлена в 1975-76-х годах [2]. Но в конце 80-х гг. из-за финансовых проблем все станции, кроме одной, были законсервированы. Поэтому во время извержения Авачинского вулкана в январе 1991 г. в районе вулкана работала только одна телеметрическая станция AVH (рис. 1). Отсутствие сети станций и недостаток опыта наблюдений за сейсмической активностью вулкана не позволили зафиксировать период подготовки и начало извержения 13 января 1991 г. Начиная с 16 января 1991 г., и в течение 1992 г. были установлены или расконсервированы три сейсмостанции (UGL, SMA и SDL). Все работы по обработке землетрясений в районе Авачинской группы вулканов за 1963-1994 гг. проводились в Институте вулканологии ДВО РАН, где и сейчас хранятся каталоги и бюллетени сейсмических событий.

Сотрудники отдела радиотелеметрических сейсмических станций (РТСС) Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН (http://www.emsd.ru/) начали определять в оперативном режиме параметры вулканических землетрясений в районе Авачинской группы вулканов по данным радиотелеметрической сети в ноябре 1992 г. Незнание скоростного строения среды при локации очагов землетрясений приводило к существенным ошибкам, которые были устранены в 1996 г. с введением новой одномерной скоростной модели для расчета положений гипоцентров [11]. Начиная с 1997 г., все землетрясения Авачинской группы вулканов обрабатываются в оперативном режиме с задержкой не более суток. При этом параметры событий считаются окончательными. Землетрясения за 1994-1996 гг. были переобработаны в соответствии со сложившейся методикой [11] в отложенном режиме. Записи землетрясений на магнитных лентах за 1991-1993 гг. восстановить не удалось. Таким образом, к настоящему времени в КФ ФИЦ ЕГС РАН имеется каталог землетрясений Авачинского вулкана с 1994 г. по настоящее время. Следует отметить, что после создания в 2001 г. лаборатории

исследований сейсмической и вулканической активности (ИСВА) на базе отдела РТСС вся обработка вулканических событий стала проводиться в рамках этой лаборатории.

Начиная с 01.01.1994 г. и до 01.01.2020 г. можно условно выделить 12-ть эпизодов повышенной сейсмической активности, согласно принятой классификации. Классификация была принята в 2000 г. (http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm), а для периода времени с 1994 г. до 2000 г. изучение сейсмичности проведено ретроспективно. При этом только в трех эпизодах повышенная сейсмичность предваряла или сопровождала внешнее проявление вулканической активности:

1) 04.10.2001 в 18:50 UTC произошел визуально наблюдавшийся парогазовый выброс с пеплом на высоту до 1000 м над кратером и продолжительностью 2 минуты [9, 12].
2) Слабая термальная аномалия в ноябре 2005 г.
3) С 27.10.2019 по 17.03.2020 – свечение на западной кромке кратера. Наиболее яркие вспышки наблюдались ночью 8 декабря 2019 г. в 12:11 UTC.

Несмотря на отсутствие за последние 26 лет на Авачинском вулкане извержений, представляющих реальную опасность для населенных пунктов, подробное описание зарегистрированной сейсмичности имеет большое значение для оценки вулканической опасности в будущем.

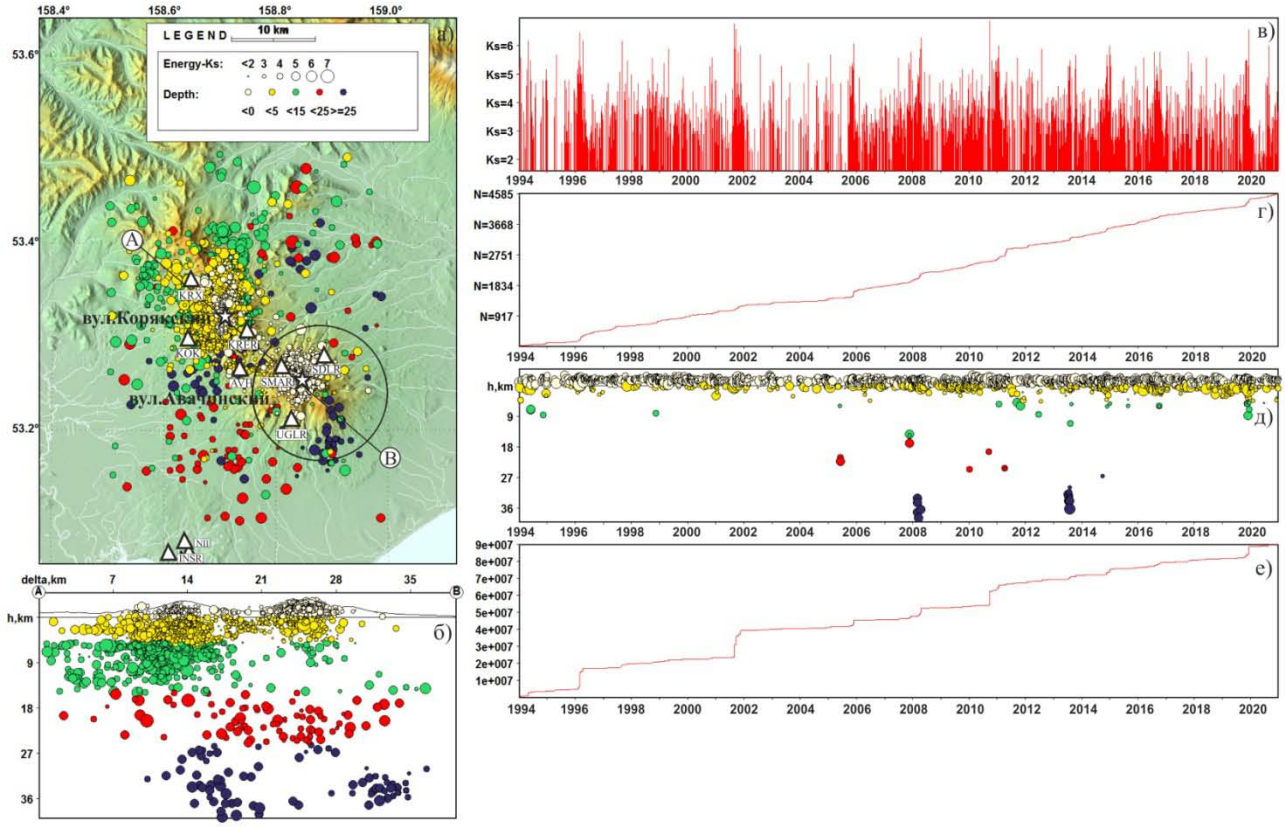


Рис. 1. Для периода наблюдений 1994-2020 гг.: а) карта эпицентров землетрясений района вулкана Авачинский; б) проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии АВ; в) энергетический класс по S-волне; г) кумулятивное количество землетрясений; д) глубина гипоцентров, км; е) кумулятивная энергия, Дж.

Мониторинг

Камчатский филиал (КФ) ФИЦ ЕГС РАН начал проводить мониторинг вулканов Камчатки в режиме близком к реальному времени в 2000 г. по трем видам наблюдений: 1) сейсмологический мониторинг; 2) визуальные и видео наблюдения; 3) спутниковый мониторинг. Среди них ведущим является сейсмологический мониторинг, т.к. видео и спутниковые наблюдения значительную часть времени не столь эффективны из-за частой плохой погоды на Камчатке.

Для сейсмологического мониторинга важно отметить следующее. С 1994 г. по 2009 г. все землетрясения в районе Авачинского вулкана обрабатывались с помощью программы Ю.Ю. Мельникова HIPO [10] с использованием одномерной скоростной модели Авачинского вулкана [11]. Для сейсмических событий, расположенных вне этого вулкана, приблизительно по изолинии 400 м, использовался в расчетах обычный региональный годограф [7]. Если события не удавалось

лоцировать, то для них велся количественный подсчет за сутки без разделения по типам. Такие землетрясения условно назвали «микросейсмичностью», и начали вести их подсчет и заносить в таблицы с 01 мая 1994 г. В связи с активизацией вулкана Корякский в январе 2009 г. на его склоне в 3.2 км от вершины была установлена новая станция «Коряка-Восток» (KRER), а в августе в 5.9 км – станция «Арик» (KRX). Также в 2009 г. в связи с переходом [18] на обработку землетрясений по новой программе «DIMAS» [6] расчет параметров землетрясений района Авачинской группы вулканов проводился по двум программам «DIMAS» и «HIPO» с использованием одного Авачинского годографа. Анализ расхождений параметров землетрясений, полученных по новой программе «DIMAS» и прежней «HIPO» для выборки из 100 событий показал, что систематический сдвиг эпицентров по широте составил примерно 0.4 *км* на юг, по долготе – 0.4 *км* на восток и по глубине гипоцентры землетрясений поднялись на 1.4 *км* [14]. Полученные систематические сдвиги находятся в пределах ошибок определения.

Таким образом, к настоящему времени в КФ ГС РАН имеется однородный каталог землетрясений Авачинского вулкана для периода с 1994 г. по настоящее время. Данные по землетрясениям публикуются с задержкой не более суток на информационных ресурсах Камчатского филиала [19, 20]: http://www.emsd.ru/ts/, в «Единой информационной системе сейсмологических данных (ЕИС СД), http://www.emsd.ru/sdis/main.php, а также в фактографической базе данных «Активность вулканов Камчатки» (свидетельство о государственной регистрации №2014620148 от 20 января 2014 г., http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm). Каталоги землетрясений и сопровождающие их статьи за 1994-2019 гг. опубликованы в сборниках ФИЦ ЕГС РАН «Землетрясения Северной Евразии» и «Землетрясения России».

Большое значение для наблюдений за вулканической активностью имеют визуальные данные. Качественный скачок в обеспечении визуальными данными произошел с появлением системы непрерывного видеонаблюдения в реальном времени с точной привязкой к абсолютному времени (точность ± 1 сек обеспечивается GPS-приемником). Первая камера наблюдает за Авачинским вулканом с Мишенной сопки с 2 апреля 2013 г. Вторая камера была установлена 27 июля 2015 г. в районе перевала между вулканами Авачинский и Корякский на сейсмической станции AVH (~ 7 км на юго-запад от вершины Авачинского). Впоследствии произошла модернизация системы видеонаблюдения с переходом от аналоговых видеокамер к цифровым IP-камерам. Новая камера с высоким разрешением в районе перевала заработала 05 апреля 2017 г. Архив видеоснимков с частотой 1 кадр в минуту хранится на сервере КФ ФИЦ ЕГС РАН. В КФ за видео наблюдения отвечают отдел РТСС и отдел информационных технологий.

Спутниковый мониторинг проводится благодаря соглашению об обмене информацией между КФ ФИЦ ЕГС РАН и Аляскинской вулканологической обсерваторией (АВО). В последние годы в рамках этого соглашения АВО предоставляет доступ к серверу со спутниковыми данными (https://volcview.wr.usgs.gov/), которые обрабатывают сотрудники лаборатории ИСВА. Ежедневно проводится контроль температуры поверхности в районе вулканов и слежение за пепловыми вулканическими облаками.

Для каждого вулкана с 2000 г. ежесуточно выставляется цветовой код активности по сейсмическим, видео, спутниковым наблюдениям и помещается в Интернет по адресу: http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm. Индивидуальные особенности шкалы каждого вулканического объекта связаны как с уникальностью его эруптивной деятельности в историческое время и на современном этапе, так и со сложившейся системой наблюдений. При оценке цветового кода активности вулканов учитываются сейсмические события, зарегистрированные в Земной коре в пределах окружности определенного радиуса вокруг вулкана, а также данные спутниковых и видео наблюдений. Радиус окружности подбирался индивидуально для каждого вулкана с учетом расположения соседних вулканических объектов. Для вулкана Авачинский радиус выборки землетрясений равен 8 км, и он ограничивается расположением соседнего вулкана Корякский. Для оценки активности вулкана Авачинский приняты следующие параметры:

Белый - нет сейсмологических данных ≥12 час.

Зеленый - количество землетрясений N($Ks \geq 2.0$) <50 или количество землетрясений N ($Ks \geq 4.0$) <5 или N($Ks \geq 5.0$) <2.

Желтый - количество землетрясений N($Ks \geq 2.0$) ≥50 или N($Ks \geq 4.0$) ≥ 5 или N($Ks \geq 5.0$) ≥ 2 или N($Ks \geq 6.0$) ≥ 1; или вулканическое дрожание с $A/Tmax \geq .2$ мкм/сек на сейсмостанции "AVH"; или общее количество поверхностных землетрясений в постройке вулкана (2-3 тип+4 тип+низкочастотные серии)≥ 100; или наличие термальной аномалии (Тан.-Тфон) > 5 ^{0}C; или пепловый выброс на высоту < 1 км над вершиной.

Оранжевый - пепловый выброс на высоту ≥ 1 км над вершиной или лавовый поток.
Красный - пепловый выброс на высоту ≥ 8 км над уровнем моря.

Результаты

На рисунке 1 а) и б) представлены карта с эпицентрами и проекция гипоцентров на вертикальный разрез для наблюдений за период 1994-2020 гг. А на рисунках 1 в)-е) приведены графики сейсмической активности для землетрясений, выделенных окружностью с радиусом 8 км вокруг Авачинского вулкана на рисунке 1 а). При оценке сейсмичности для определения суточного цветового кода дежурные сотрудники используют данные о количестве и энергетическом классе *Ks* произошедших событий, т. е. примерно оценивают суммарную энергию событий в радиусе 8 км. Напомним, энергия события в Джоулях равна 10 в степени *Ks*. Более точные оценки можно получить с помощью параметра «центра сейсмической энергии» (ЦСЭ) [13, 17], который определяется как одно эквивалентное землетрясение с координатами очага, вычисленными как среднеарифметическое из координат землетрясений зарегистрированных за выбранные сутки с учетом веса, пропорционального энергии события. Энергия этого эквивалентного землетрясения равна сумме энергий выбранных событий. В настоящей работе рассматривается только энергия ЦСЭ выраженная в классе, и она представлена на рисунке 2 а). Значение *Ks* (ЦСЭ)≥6 соответствует «желтому» коду. На рисунке 2 а) скобками с порядковыми номерами отмечено 12 эпизодов повышенной сейсмической активности. Здесь необходимо отметить, что эпизод отмеченный «?» следует убрать из рассмотрения, так как «желтый» код был выставлен только по наличию термальной аномалии на дневном снимке, что является ошибкой дежурного сотрудника. Также по ошибке был поставлен «зеленый» код вместо «желтого» для эпизода 8.

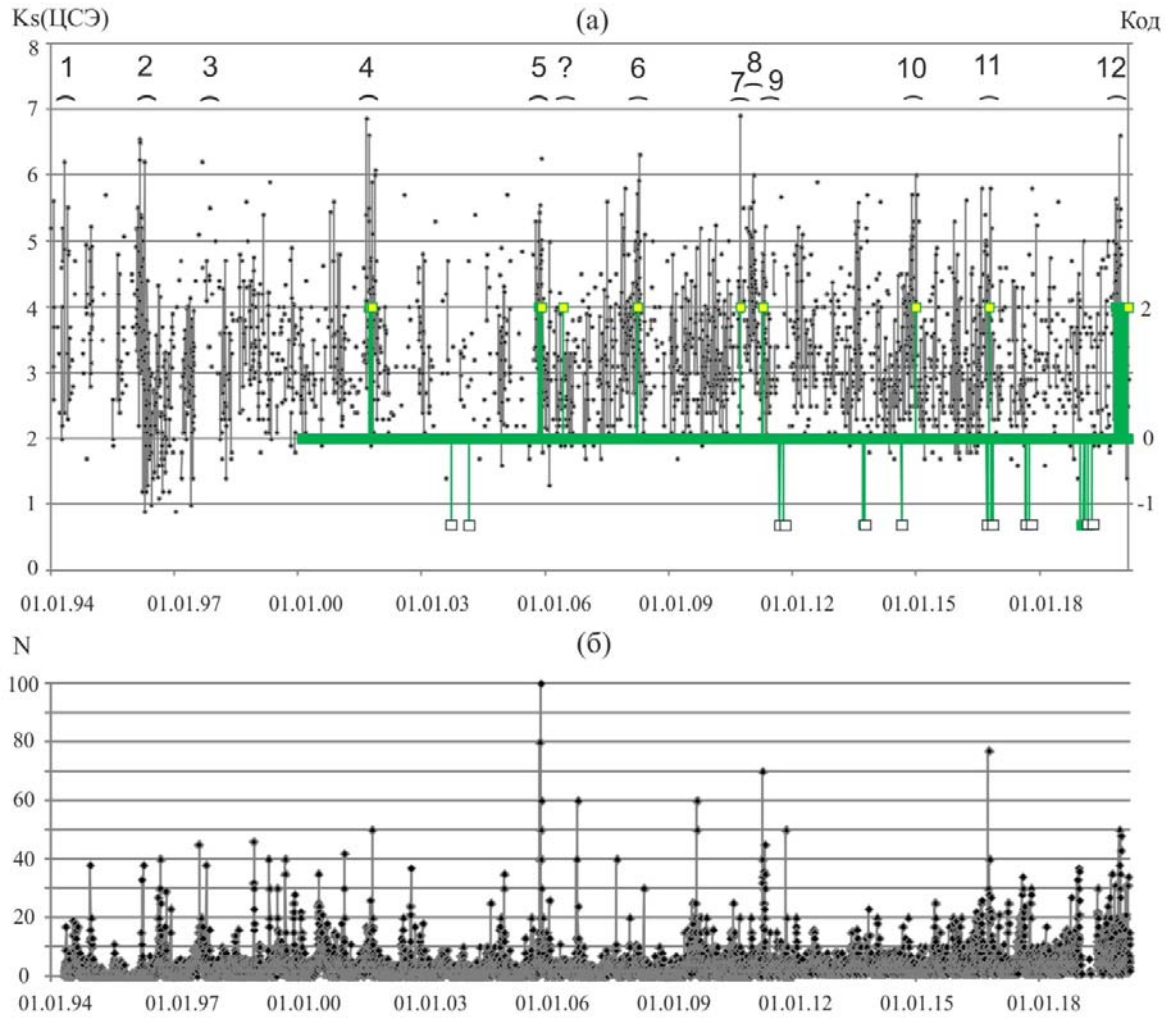


Рис. 2. Графики изменения параметров активности за период 1994-2020 гг.: а) - код активности (правая шкала, зеленый – «0», желтый – «2», белый – «-1.5») и *Ks* (ЦСЭ) - левая шкала; пронумерованными скобками вверху рисунка отмечены эпизоды повышенной активности; б) – микросейсмичность (суточное количество слабых землетрясений).

В таблице 1 сведены все наиболее важные данные по 12-ти эпизодам активности вулкана Авачинский в 1994-2019 гг. Для будущей оценки возможности извержения здесь важно отметить следующие факты:

- в 10-ти случаях из 12-ти были зарегистрированы землетрясения с классом 6.0 и выше, и 2-х оставшихся случаях (эпизоды № 9 и 11) количество слабых землетрясений за сутки превысило 50;
- в 6-ти случаях повышенная сейсмическая активность фиксировалась только по регистрации одного землетрясения с классом 6.0 и выше, и поэтому ее продолжительность не превышала сутки;
- все три эпизода (№ 4, 5 и 12) с зарегистрированным внешним проявлением вулканической активности произошли в осенний период, продолжались более 20 суток и в течение периода активизации были зафиксированы как землетрясения с классом 6 и более, так и количество слабых землетрясений за сутки превысило 50.

Таблица 1. Эпизоды повышенной сейсмической активности на вулкане Авачинский в 1994-2019 гг.

Номер эпизода	Даты эпизода	N(*Ks* ≥ 6.0)	*Ks* max/дата	N max/дата	Проявления вулканической активности	Код max
1	03.05.1994	1	6.2/03.05	1/03.05	нет	нет
2	29.02-11.04.1996	4	6.5/01.03 и 04.03	38/01.04	нет	нет
3	04.09.1997	1	6.2/04.09	7/04.09	нет	нет
4	31.08-17.11.2001	4	6.8/31.08	50/18.10	пепловый выброс до 1000 м, 04.10 в 19:50 UTC	желтый
5	07.11-29.11.2005	1	6.1/28.11	370/21.11	Слабая ночная термальная аномалия: 07, 20, 21 и 29 ноября	желтый
-	10.06.2006	Нет	-	2/10.06	дневная термальная аномалия?	желтый
6	17.04.2008	1	6.3/17.04	5/17.04	нет	желтый
7	23.09.2010	1	6.9/23.09	10/23.09	нет	желтый
8	21.01.2011	1	6.0/21.01	1/21.01	нет	зеленый
9	10-11.04.2011	Нет	-	70/10-11.04	нет	желтый
10	29.12.2014	1	6.0/29.12	1/29.12	нет	желтый
11	06.10.2016	Нет	-	77/06.10	нет	желтый
12	27.10.2019-17.03.2020	1	6.3/09.12	50/10.12	свечение на западной кромке кратера в ночтое время с 27.10.2019 по 17.03.2020, максимальное – 08.12.2019	желтый

Рассмотрим более подробно последний 12-й эпизод. На рисунке 3 приведены графики сейсмической активности для землетрясений, выделенных окружностью с радиусом 8 км вокруг Авачинского вулкана на рисунке 1а). На рисунке 3 а), б) и г) виден существенный рост сейсмичности с начала ноября до середины декабря 2019 г., после чего уровень сейсмичности вернулся к фоновому. Также важно отметить, что примерно с середины ноября и до середины декабря 2019 г. зафиксированы землетрясения с глубин 5-10 км ниже уровня моря, что является достаточно редким событием (см. рис. 1 д). Возможно, что именно они спровоцировали или сопровождали подъем газов, вызвавших свечение на кратере вулкана.

Несколько слов о свечении на западной части кромки кратера вулкана Авачинский. По данным видеонаблюдения оно впервые было отмечено 02 декабря 2019 г. (Ящук В.В., заведующий отделом РТСС). Внимательное изучение архива снимков позволило обнаружить, что в 2019 г. первое слабое свечение в западной части кратера появилось 27 октября, и оно периодически продолжало наблюдаться до середины марта 2020 г. Также удалось зафиксировать очень слабое свечение в том же месте в ноябре-декабре 2017 г. Такое проявление свечения именно в ноябре-декабре, возможно, связано с резким температурным контрастом в это время года при малом количестве снега. Свечение приурочено к западной части трещины, пересекающей лавовую пробку и верхнюю кромку кратера с запада на восток.

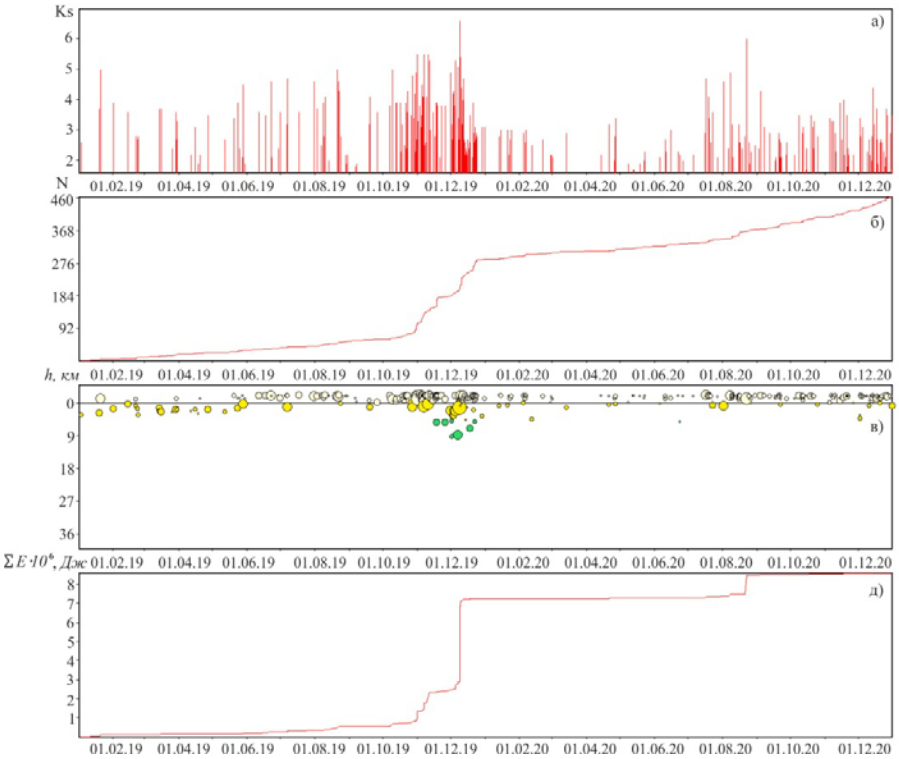


Рис. 3. Период наблюдений 1 января 2019 гг. – 28 февраля 2020 г. Распределение во времени различных параметров сейсмической активности для землетрясений, лоцированных в радиусе 8 км (рис.1б) от вулкана Авачинский: а) энергетический класс по S-волне; б) кумулятивное количество землетрясений; в) глубина гипоцентров, км; г) кумулятивная энергия, Дж.

Заключение

По данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, начиная с 01.01.1994 г. и до 01.01.2020 г. повышенный уровень сейсмической активности, согласно принятой классификации, наблюдался в 12 эпизодах, включающих кратковременные периоды повышенной сейсмичности. При этом только в трех эпизодах повышенная сейсмичность предваряла или сопровождала внешнее проявление вулканической активности. Первый случай произошел 5 октября 2001 г. в 7 ч 50 мин местного времени и проявился в виде парогазового выброса, содержащего пепел, высотой до 1000 м над кратером и продолжительностью примерно 2 минуты. Во втором случае фиксировалась слабая термальная аномалия в ноябре 2005 г. В третьем случае активность проявилась в виде ночного свечения на кромке кратера, которое зафиксировали IP-камеры. Свечение связывают с повышенной эмиссией газов. Наиболее яркие вспышки наблюдались ночью 8 декабря 2019 г. Анализ данных по 12-ти эпизодам активности вулкана Авачинский в 1994-2019 гг. позволил сделать следующие выводы:

- в 10-ти случаях из 12-ти были зарегистрированы землетрясения с классом 6.0 и выше, и 2-х оставшихся случаях (эпизоды № 9 и 11) количество слабых землетрясений за сутки превысило 50;
- в 6-ти случаях повышенная сейсмическая активность фиксировалась только по регистрации одного землетрясения с классом 6.0 и выше, и поэтому ее продолжительность не превышала сутки;
- все три эпизода с зарегистрированным внешним проявлением вулканической активности произошли в осенний период, продолжались более 20 суток и в течение периода активизации были зафиксированы как землетрясения с классом 6 и более, так и количество слабых землетрясений за сутки превысило 50. Сезонная осенняя активизация вулкана Авачинский была впервые отмечена в работах В.И. Горельчик [4].

Представленные результаты позволяют предполагать, что активизация вулкана с последующим сильным извержением начнется с сейсмической подготовки в виде землетрясений с классом 6.0 и выше и микросейсмичностью более 50 событий в сутки. Перед извержением с большой вероятностью будет наблюдаться свечение и термальная аномалия на кратере вулкана. Поэтому разработанная и используемая в настоящее время шкала оценки активности вулкана Авачинский позволяет достаточно объективно оценивать состояние вулкана и, возможно, поможет спрогнозировать будущее извержение. Приведенные выше факты свидетельствуют о необходимости продолжения и расширения круга геофизических наблюдений в режиме реального времени, тем

более что в соответствии с долгосрочным прогнозом П.И. Токарева [15] новый цикл активности вулкана Авачинский начался в 2019 г. (2025 г. ± 6 лет). Этот прогноз основывается на выделении среднего периода цикла активности P=40 ± 6 лет по изучению исторических сведений о деятельности вулкана. П.И. Токарев взял извержение 1945 г. за начало нового цикла активности, поэтому следующие циклы активности прогнозировались на 1985 г. ±6 лет (вспомним извержение 1991 г.) и на 2025 г. ± 6 лет.

Работа выполнена в рамках темы НИР АААА-А19-119031590060-3 госзадания № 075-00576-21 ФИЦ ЕГС РАН на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Влодавец В.И., Пийп Б.И.* Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюл. Вулканол. Станций. 1957. №25.

2. *Гаврилов В.А., Малкин А.П., Чебров В.Н., Сорокин В.В.* Радиотелеметрическая система сбора сейсмической информации на Авачинско-Корякском полигоне // Бюл. Вулканол. Станций. 1978. №54. С.22–26.

3. *Горельчик В.И., Фарберов А.И.* О характере записи близких землетрясений на Авачинской сейсмической станции // Бюл. Вулканол. Станций. 1966. №41. С. 20–24.

4. *Горельчик В.И.* Сейсмический режим Авачинско-Корякской группы вулканов в связи с проблемой прогноза извержений // автореферат диссертации на соискание ученой степени канд.геол.-мин.наук. 1973. Москва. 23 с.

5. Действующие вулканы Камчатки // отв. ред. С.А.Федотов и Ю.П.Масуренков, М.: Наука. 1991. Т.2. 413 с.

6. *Дрознин Д.В., Дрознина С.Я.* Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов «DIMAS» // Сейсмические приборы. М.: ИФЗ РАН, 2010. 46. № 3. С. 22–34.

7. *Кузин И.П.* Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М.: Наука, 1974. 145 с.

8. *Мелекесцев И.В., Литасова С.Н., Сулержитский Л.Д.* О возрасте и масштабе катастофических извержений типа направленного взрыва вулкана Авачинский (Камчатка) в позднем плейстоцене // Вулканология и сейсмология. 1991. № 2. С. 3–12.

9. *Мелекесцев И.В., Селиверстов Н.И., Сенюков С.Л.* Информационное сообщение об активизации в октябре 2001 г. вулкана Авачинский на Камчатке и проведенных исследованиях // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 79–80.

10. *Мельников Ю.Ю.* Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. 1990. № 5. С. 103–112.

11. *Сенюков С.Л.* Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.

12. *Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю.* Сейсмичность Авачинского вулкана в 1994-2005 гг. // Материалы научно-технической конференции «Геофизический мониторинг Камчатки», Петропавловск-Камчатский, ГС РАН, 2006. С.101–105.

13. *Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Гарбузова В.Т., Кожевникова Т.Ю.* Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами с 01.01.2001 г. по 31.07.2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. №3. С. 50–59.

14. *Сенюков С.Л., Нуждина И.Н.* Сейсмический мониторинг вулканов Камчатки // Землетрясения Северной Евразии, 2010 год. Обнинск: ГС РАН, 2016. С. 382–395.

15. *Токарев П.И.* О долгосрочном прогнозе извержений Авачинского вулкана // Бюл. Вулканол. Станций. 1971. №47. С. 33–36.

16. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.

17. *Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И.* Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. №2. С. 3–42.

18. *Чебров В.Н., Левина В.И., Ландер А.В., Чеброва А.Ю., Сенюков С.Л., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я.* Региональный каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов 1962–2010 гг.: технология и методика создания // Землетрясения Северной Евразии, 2010 год. Обнинск: ГС РАН, 2016. С. 396–406.

19. *Чебров В.Н., Бахтиарова Г.М., Дрознин Д.В., Дубровский Н.И., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Пантюхин Е.А., Сенюков С.Л., Сергеев В.А.* Информационные ресурсы Камчатского филиала Геофизической службы РАН в Internet // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды II научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский 11–17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 302–305.

20. *Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеенко Е.А.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. том 21. № 3. С.66–91. https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5.

УДК 550.34

СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ В 2021 г. В СВЯЗИ С ПОБОЧНЫМ ПРОРЫВОМ ИМЕНИ Г.С. ГОРШКОВА

Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я., Кожевникова Т.Ю., Назарова З.А., Соболевская О.В.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, ssl@emsd.ru

Введение

Вулкан Ключевской – самый активный и мощный базальтовый вулкан Курило-Камчатской вулканической области. Координаты вершины в программе «Google Планета Земля» - 56° 04' (56.062) с. ш. и 160° 38' (160.630) в. д. Абсолютная высота вулкана – 4750 м. Диаметр вершинного кратера, венчающего конус, составляет около 700 м [12]. Ключевской вулкан – типичный стратовулкан с конусом правильной формы. Это самый высокий из действующих вулканов Европы и Азии. Он сложен базальтовыми, андезибазальтовыми потоками лав и пирокластическим материалом. В результате геологических исследований (методом тефрохронологии) определен возраст вулкана ~ 7 тыс. лет [3]. Формирование вулкана началось в голоцене отложениями мощных толщ лав и пирокластики базальтового и андезибазальтового составов на склоны более древних вулканов-гигантов Камень и Крестовский. Ключевской вулкан очень активен. Средний расход магмы 60 млн. т/год составляет половину ювенильных продуктов извержений всего Курило-Камчатского региона. Для эруптивной деятельности вулкана характерны вершинные и побочные извержения. Вершинные извержения обычно более продолжительные и имеют главным образом эксплозивный или эксплозивно-эффузивный характер.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая службы РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) (http://www.emsd.ru) проводит мониторинг активности вулканов Камчатки в режиме близком к реальному времени с 2000 г. [6]. Исследования ведутся по трем направлениям: 1) сейсмический мониторинг; 2) визуальные и видео наблюдения; 3) спутниковый мониторинг. В настоящее время ежедневно проводимая КФ ФИЦ ЕГС РАН работа по сбору, обработке и представлению информации об активности вулканов позволяет своевременно и обоснованно оценивать их состояние и делать выводы о возможном развитии вулканической активности (http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm).

С 2000 по 2020 гг. по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН на вулкане Ключевской происходили только вершинные извержения. Однако по данным сотрудников Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН [4] 11 октября 2013 г. и 29 апреля 2016 г. образовались боковые прорывы на юго-западном и восточном склонах вулкана соответственно [1, 2]. Здесь нет больших противоречий, т. к. побочное извержение 29 апреля 2016 г. «произошло после обвала на юго-восточном склоне вулкана в Апахончичском желобе в привершинной части конуса, и в центре провала на высоте 4500 м начал работу новый побочный прорыв. Извержения, происходящие на вулкане Ключевской, на высотах выше 4500 м, Б.И. Пийп [5] относил к субтерминальным. Поэтому новый побочный прорыв 2016 г. был назван “Субтерминальный”» [2]. Для извержения 11 октября с 08:16 до 08:24 UTC на юго-западном склоне Ключевского (скрытом конусом вулкана для видеонаблюдений) зафиксированы яркие вспышки и серии мощных выбросов пепла до 9 км над уровнем моря [1], которые также могли быть вызваны обвалом в привершинной части. О том, что 11 октября произошло «субтерминальное» извержение говорит тот факт, что с 01 октября по 19 октября фиксировался постепенный рост амплитуды вулканического дрожания *A/T ср.* с 13.4 до 89.3 мкм/сек (http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm) при нарастающей активности в центральном кратере, который должен был прерваться при побочном прорыве. Это обычно наблюдалось ранее, т. к. при появлении нового центра извержения на высотах ниже 4000 м происходит сброс давления в центральном жерле и амплитуда дрожания резко уменьшается. Возможно, такое деление извержений на вершинные и привершинные, «субтерминальные» важно для вулканологов, но для сейсмологов это не имеет большого значения, т. к. лоцирование по сейсмологическим данным не позволяет разделить источники сейсмических сигналов от вершинных и субтерминальных извержений.

В своей работе П.И. Токарев [8] приводит общую закономерность (сценарий) подготовки побочного прорыва на основе изучения 7-ми побочных прорывов произошедших в 1947-1986 гг. Приведем основные положения этого сценария:

1) все прорывы предварялись роями вулканических землетрясений 2-го типа с классом $K_S \geq 6$ [8], эти рои предваряют побочное извержение за 3-13 дней, глубины очагов не превосходят 5 км, и много очагов располагается в постройке выше уровня моря;

2) наиболее сильные землетрясения ($K_S \geq 9$) происходят в первый или второй день, а затем энергия и частота их быстро снижается, за несколько часов до извержения землетрясения энергетического класса $K_S \geq 6$ прекращаются;

3) среднеарифметический центр эпицентров роя располагается или непосредственно в месте прорыва или выше по направлению к вершине на расстоянии 1-5 км;

4) рои заканчиваются побочными извержениями в 87 % случаях.

Руководствуясь вышеприведенным сценарием, П.И.Токарев сделал успешный краткосрочный прогноз побочного прорыва «Предсказанный» на вулкане Ключевской 08 марта 1983 г. [9].

Последнее вершинное извержение вулкана Ключевской с пепловыми выбросами и излиянием лавовых потоков началось 4 октября 2020 г. и наблюдалось до 7 февраля 2021 г. Необычность этого извержения заключалась в том, что через 10 дней после его резкого завершения и впервые за 30 лет был зафиксирован новый «несубтерминальный» побочный прорыв на расстоянии ~3.5-4.0 км от кратера, который впоследствии назвали именем Г.С. Горшкова. Это побочное извержение не было спрогнозировано в режиме реального времени. Но детальное ретроспективное изучение сейсмических событий и дрожания позволило выявить интересные особенности, которые возможно в будущем позволят успешно прогнозировать «несубтерминальные» побочные прорывы вулкана Ключевской.

Мониторинг

КФ ФИЦ ЕГС РАН проводит сейсмологический мониторинг вулкана Ключевской по данным постоянной сети сейсмических станций с ежедневным представлением результатов с 2000 г. Карта с расположением сейсмических станций представлена на рисунке 1(а).

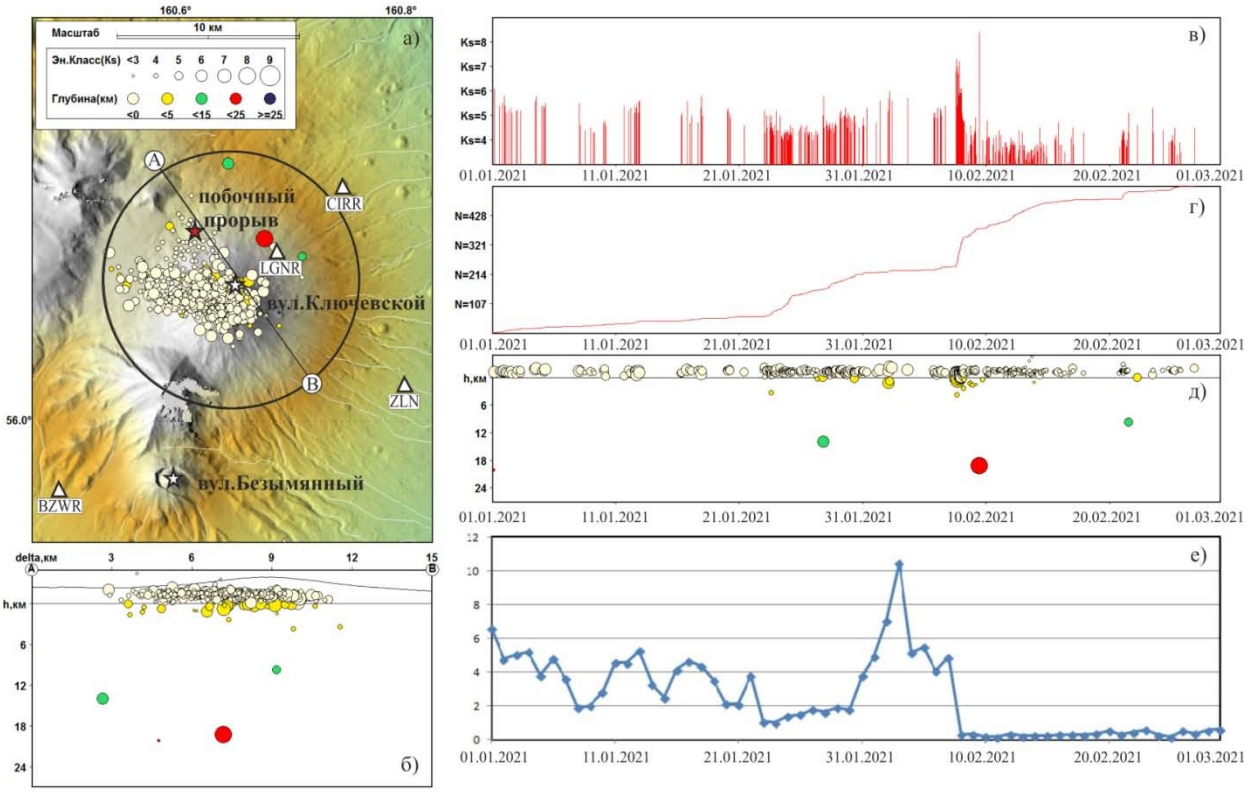


Рис. 1. Для периода наблюдений с 01.01.2021 по 28.02.2021: а) карта эпицентров землетрясений района вулкана Ключевской; б) проекция гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии АВ; в) энергетический класс по S-волне; г) кумулятивное количество землетрясений; д) глубина гипоцентров, км; е) график вулканического дрожания по станции CIR (A/T ср.), мкм/сек. Красная звезда на карте а) обозначает место побочного прорыва им. Г.С. Горшкова, белые звезды обозначают вершины вулканов Ключевской и Безымянный.

В 2021 г. за вулканом наблюдают 4 видеокамеры в режиме реального времени. Две из них установлены в поселках Ключи и Козыревск, а еще две - на автономных полевых станциях BZG (Грива) и KIR (Киришева). Спутниковый мониторинг проводится благодаря соглашению об обмене информацией между КФ ФИЦ ЕГС РАН и Аляскинской вулканологической обсерваторией (AVO). В последние годы в рамках этого соглашения AVO предоставляет доступ к серверу со спутниковыми данными (https://volcview.wr.usgs.gov/), которые обрабатывают сотрудники лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности (ЛИСВА). Ежедневно проводится контроль температуры поверхности в районе вулканов и слежение за пепловыми вулканическими облаками. Все результаты наблюдений ежедневно представляются в Интернет по адресу: http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm.

В рамках ежедневной обработки данных сотрудники ЛИСВА выполняют следующие виды обработки сейсмической информации:

1) Лоцирование локальных землетрясений с определением координат очагов и оценкой выделенной энергии. Составление каталогов вулканических землетрясений.
2) Обработка локальных событий, для которых невозможно определение местоположения источника. События разделяются по типам, оценивается их количество, и определяются возможные энергетические оценки.
3) Для вулканического дрожания определяется амплитуда и продолжительность.

Кроме этого в автоматическом режиме, начиная с 2015 г., ведется обработка непрерывного потока сейсмических данных на вычислительном кластере для определения местоположения источника вулканического дрожания по функциям взаимной корреляции и оценки его интенсивности. Алгоритм и программное обеспечение созданы в КФ ФИЦ ЕГС РАН [13], результаты доступны на служебном сервере.

Результаты исследования землетрясений

Ретроспективное изучение сейсмичности позволило установить следующие факты. 7 февраля средняя амплитуда дрожания резко уменьшилась в 16 раз (рисунок 1 (е)), и это позволило зарегистрировать рой поверхностных землетрясений предваряющий новый побочный прорыв. Всего с 07 по 17 февраля было лоцировано 251 землетрясение в радиусе 7 км от центрального кратера в диапазоне глубин от вершины до глубины 5 км ниже уровня моря. 18 февраля в выбранном диапазоне землетрясений не зарегистрировано. Для этих событий были определены ошибки локации очагов: в плане средняя ошибка получилась ±1.3 км, а по глубине ±1.5 км. Одиннадцать наиболее сильных событий этого роя с классом от 6.1 до 7.3 произошли 07 февраля на удалении в плане не более 2 км от вершины при средней ошибке ±2.2 км. Очаги этих событий располагались в диапазоне глубин от 1.2 км ниже уровня моря до 0.8 км выше уровня моря при средней ошибке ±2.4 км. При этом эпицентры некоторых событий были смещены в северо-западном направлении от вершины в сторону будущего нового побочного прорыва им. Г.С. Горшкова (координаты - 56° 05.5' (56.092) с. ш. и 160° 37.5' (160.617) в. д., абсолютная высота 2800-2850 м). В дальнейшем до 18 февраля уже большая часть эпицентров землетрясений с классом не более 5.0 сместилась в северо-западном направлении от вершины, хотя значение смещений в большинстве случаев не превышало точности локации этих событий в плане. Всего с 07 по 17 февраля в пределах средней ошибки локации ±1.3 км от места нового прорыва зафиксировано 26 землетрясений с максимальным классом 4.7, и 24 из них произошли с 12 по 15 февраля.

Более наглядно представить миграцию сейсмичности можно с помощью параметра «центра сейсмической энергии» (ЦСЭ) [7, 11], который определяется как одно эквивалентное землетрясение с координатами очага, вычисленными как среднеарифметическое из координат землетрясений зарегистрированных за выбранные сутки с учетом веса, пропорционального энергии события. Энергия этого эквивалентного землетрясения равна сумме энергий выбранных событий. Напомним, энергия события в Джоулях равна 10 в степени *Ks*.

На рисунке 2 представлена миграция сейсмичности (ЦСЭ) в плане с 07 по 17 февраля. На этом рисунке хорошо видно, что в феврале:

- 7 и 8 ЦСЭ располагался вблизи вершины;
- 9 и 10 сместился примерно на 3 км к западу от вершины;
- с 11 по 13 располагался между местом нового прорыва и вершиной;
- 14 и 15 февраля - точно на месте нового прорыва;
- 16 и 17 – снова между местом нового прорыва и вершиной.

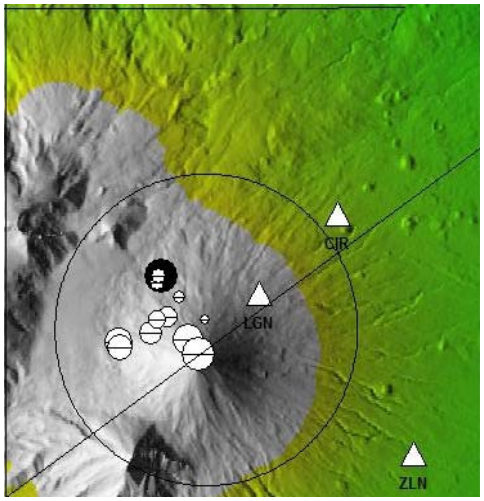


Рис. 2. Карта с эпицентрами ЦСЭ для периода с 7 по 17 февраля 2021 г. Размер кружков эпицентров не соответствует энергии ЦСЭ, а уменьшается с 7 по 17 февраля, т.е. максимальный размер для эпицентра 7 февраля, и минимальный – для 17 февраля. Черный кружок обозначает место нового побочного прорыва им. Г.С. Горшкова.

На рисунке 3 представлены детальные данные по изменению параметров ЦСЭ. Можно отметить заметное смещение на север ЦСЭ с 14 по 16 февраля 2021 г., рис. 3 в.

Результаты локации источников сейсмических сигналов

Интересные результаты получены в рамках ретроспективного анализа посуточной автоматической локации источника вулканического дрожания по функциям взаимной корреляции сейсмических сигналов. Было зафиксировано отчетливое смещение в плане источника вулканического дрожания от вершины Ключевского вулкана в сторону побочного прорыва рис. 4.

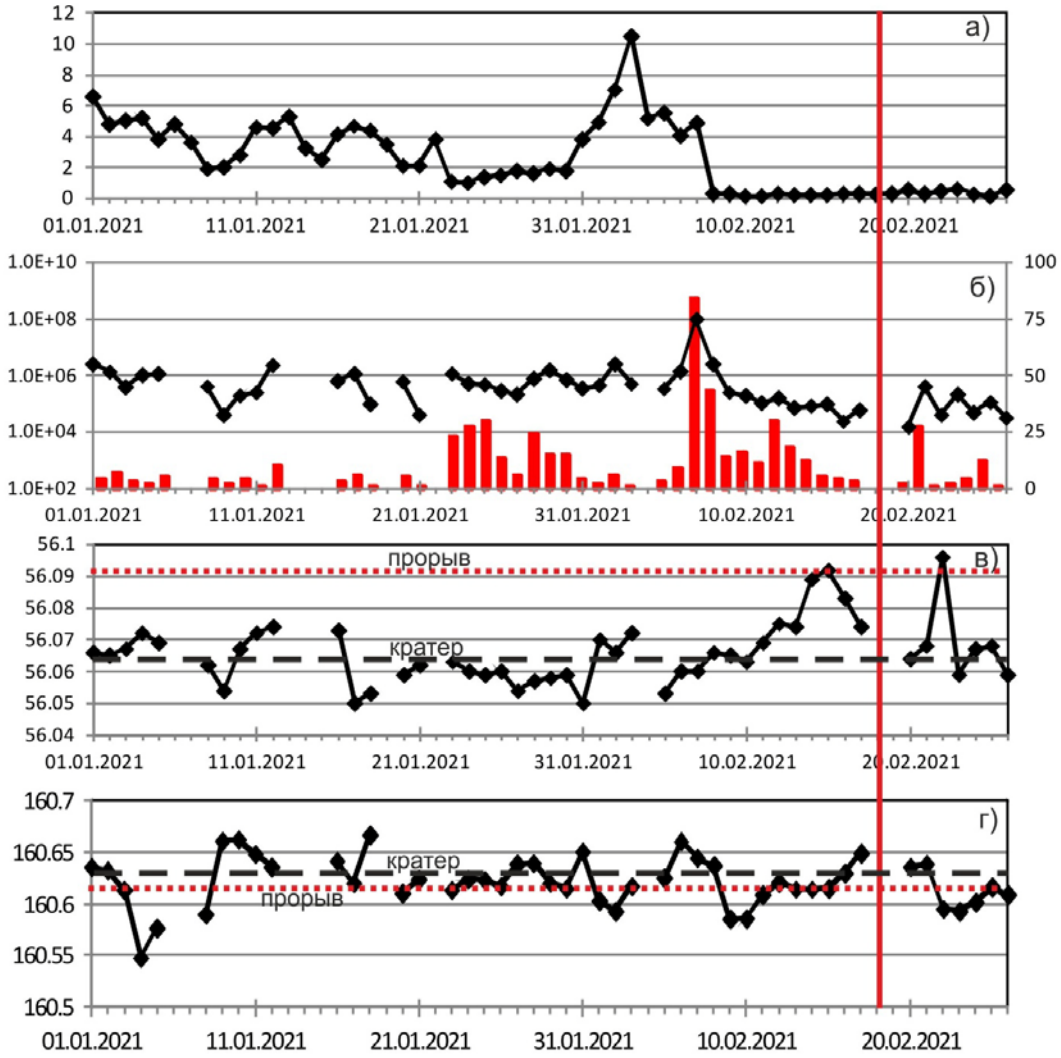


Рис. 3. Для периода наблюдений с 01.01.2021 по 28.02.2021: а) график вулканического дрожания по станции CIR (A/T ср.), мкм/сек; б) красная диаграмма (правая шкала) - количество лоцированных событий в радиусе 7 км и диапазоне глубин от вершины до 5 км ниже уровня моря в районе вулкана Ключевской (рис. 1 а)), график (левая шкала) – энергетический класс ЦСЭ; в) график изменения широты ЦСЭ; г) график изменения долготы ЦСЭ. Вертикальная красная линия обозначает 18 февраля 2021 г. – начало извержения побочного прорыва им. Г.С. Горшкова по видеоданным.

Расстояние между эруптивными центрами около 4 км, что сопоставимо с ошибками определения эпицентров землетрясений и автоматической локации дрожания при существующей сети сейсмостанций. Поэтому было проведено специальное исследование для выявления дополнительных признаков миграции источника вулканического дрожания. Предполагаем, что различие местоположений двух эруптивных центров должно проявиться в следующих параметрах: 1) разница времен прихода волновых пакетов на соответствующие пары станций (за счет изменения расстояний очаг-станция); 2) разница отношений амплитуд волновых пакетов на соответствующих парах станций (за счет изменения расстояний очаг-станция, изменения пути распространения волн и т.д.). Изменение второго параметра не рассматриваем, т.к. для его корректной оценки необходима более плотная сеть, с межстанционными расстояниями сравнимыми с удаленностью эруптивных центров друг от друга.

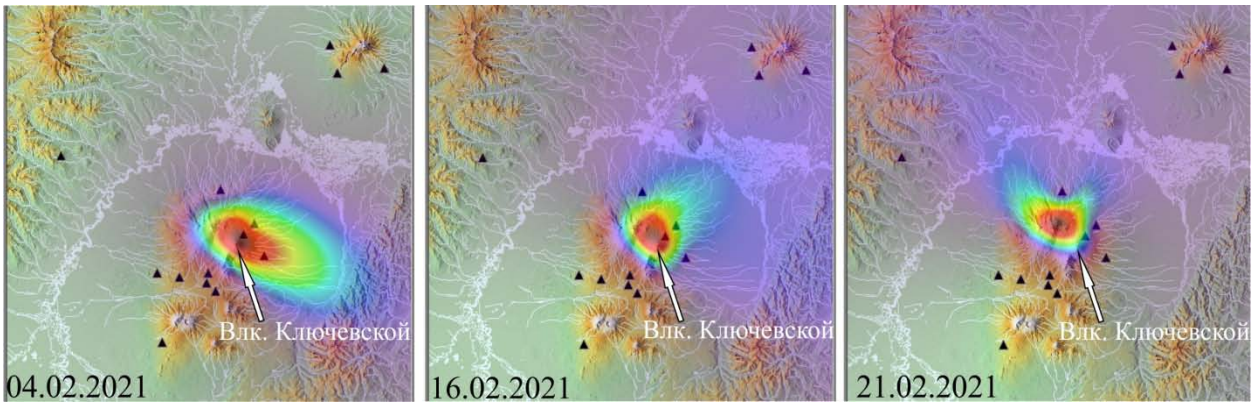


Рис. 4. Результат автоматической локации вулканического дрожания по функциям взаимной корреляции. Слева направо: 4 февраля 2021 г. – вершинное извержение Ключевского вулкана; 16.02.2021 г. – промежуточное положение; 21.02.2021 г. – извержение побочного кратера Ключевского вулкана.

Для оценки временных задержек удобно использовать функции взаимной корреляции (ФВК) на паре станций, в данном исследовании определяются ФВК за одни сутки. На рисунке 5 приведен пример ФВК на станциях CIR и KRS в периоды активизации разных эруптивных центров Ключевского вулкана: 14 октября 2020 г. – вершинное извержение Ключевского вулкана; 4 марта 2021 г. – побочное извержение (http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm).

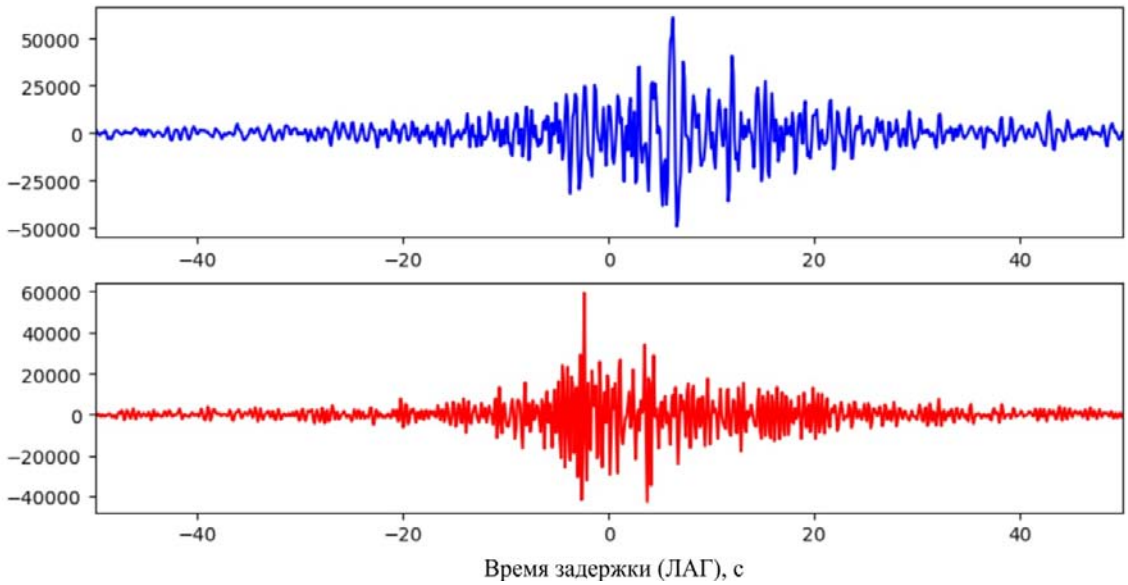


Рис. 5. Функция взаимной корреляции на станциях CIR и KRS. Верхний график: 14 октября 2020 г. – вершинное извержение Ключевского вулкана. Нижний график: 4 марта 2021 г. – извержение побочного прорыва им. Г.С. Горшкова.

По матрице коэффициентов корреляций выделяются три группы - различные фазы сейсмической активности, отмечены цифрами 1-3 на рисунке 6. Для каждой из них ФВК имеет свою характерную форму. Выбрав поочередно за эталонный сигнал ФВК разных фаз, был построен график изменения во времени коэффициента корреляции регистрируемой сейсмичности с эталонными сигналами, рисунок 7.

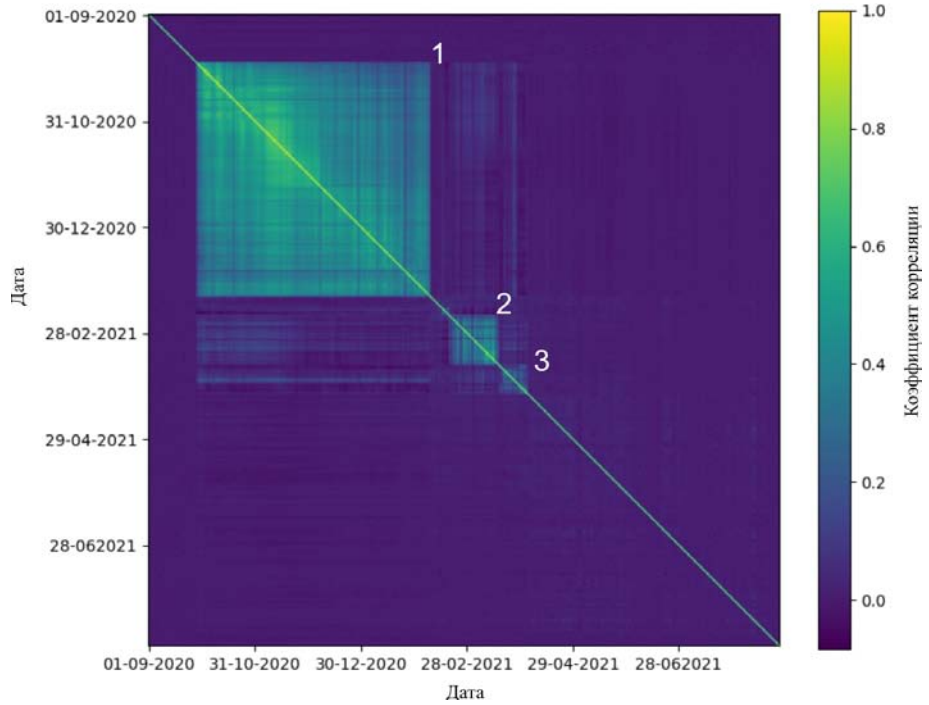


Рис. 6. Матрица коэффициентов корреляции между всеми суточными взаимными корреляциями для пары станций CIR и KRS за период времени с 01.09.2020 по 31.07.2021 гг.

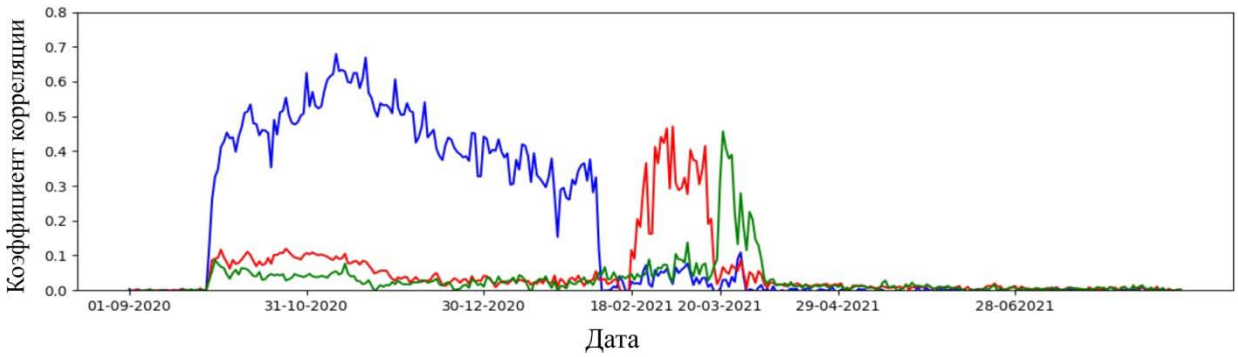


Рис. 7. Корреляция с эталонными ФВК. Эталон 1 (фаза 1 на рис. 6) - период, когда наблюдалось вершинное извержение вулкана Ключевской (синий). Эталон 2 (фаза 2 на рис. 6) - период, когда наблюдалось извержение побочного прорыва им. Г.С. Горшкова (красная). Эталон 3 (фаза 3 на рис. 6) – период регистрации многочисленной афтершоковой последовательности в районе Тумрокских (Верхне-Щапинских) источников (зеленый).

Данная классификация позволяет предполагать, что по сейсмическим данным 18 февраля 2021 г. начался второй период активности, соответствующий побочному извержению. По данным визуальных наблюдений свечение в темное время суток в районе побочного прорыва также было впервые замечено 18 февраля.

Одной из основных характеристик вулканической активности является уровень вулканического дрожания. В отличие от ежедневной (ручной) обработки в данном случае была определена средняя (за 1 час) величина сигнала в полосе 1-6 Гц на четырех станциях сети Камчатского филиала: ZLN, CIR, KRS, BZW. Для наглядности амплитуды на разных станциях были приведены к одному уровню (отнормированы на среднее значение за выбранный участок времени с 2020.10.11 по 2020.11.24), рис. 8.

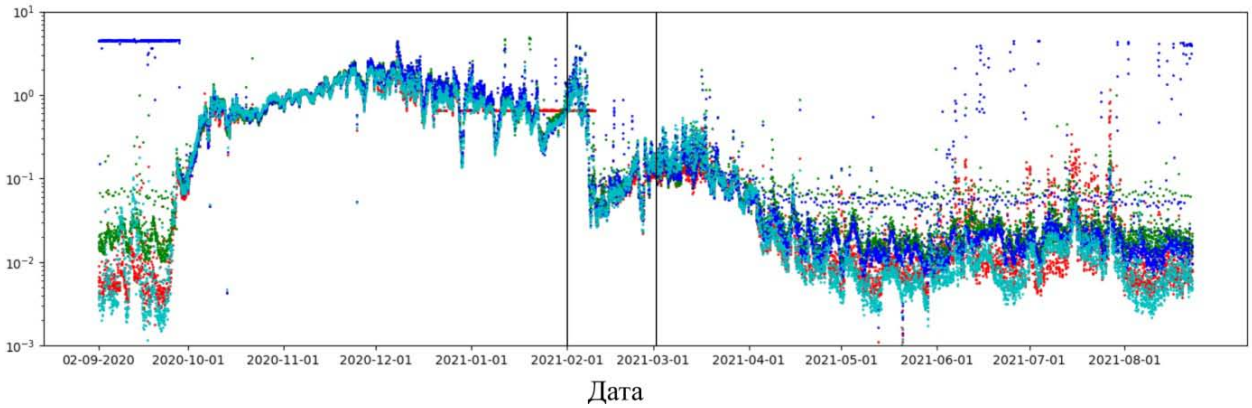


Рис. 8. Средняя амплитуда сейсмического сигнала на станциях: ZLN – красный цвет; CIR – циан; KRS – синий; BZW – зеленый. Вертикальными линиями выделен интервал времени, более детально рассмотренный на рис. 9. Горизонтальные синяя и красная линии обозначают периоды неисправности аппаратуры соответствующей станции.

На рисунке 8 виден резкий спад уровня сигнала от вершинного извержения вулкана Ключевской 7 февраля 2021 г. и последующее увеличение его, начиная с середины февраля 2021 г., вероятно уже от источника в районе побочного прорыва.

Более детальный анализ периода с 1 февраля по 2 марта 2021 г. (рис. 9) позволяет сделать заключение, что по эволюции сигналов ФВК на станциях CIR – KRS, активность менялась следующим образом. С 1 по 6 февраля ФВК имеет одинаковую форму, соответствующую фазе вершинного извержения. С 7 по 13 февраля уровень вулканического дрожания упал, практически до фоновых значений. С 14 по 17 февраля ФВК имеет промежуточную форму, непохожую на эталоны вершинного и побочного извержения. И начиная с 18 февраля, ФВК постепенно приобретает черты фазы побочного извержения. В период с 7 по 17 февраля был зарегистрирован рой землетрясений, возможно связанных с образованием трещин в направлении побочного прорыва.

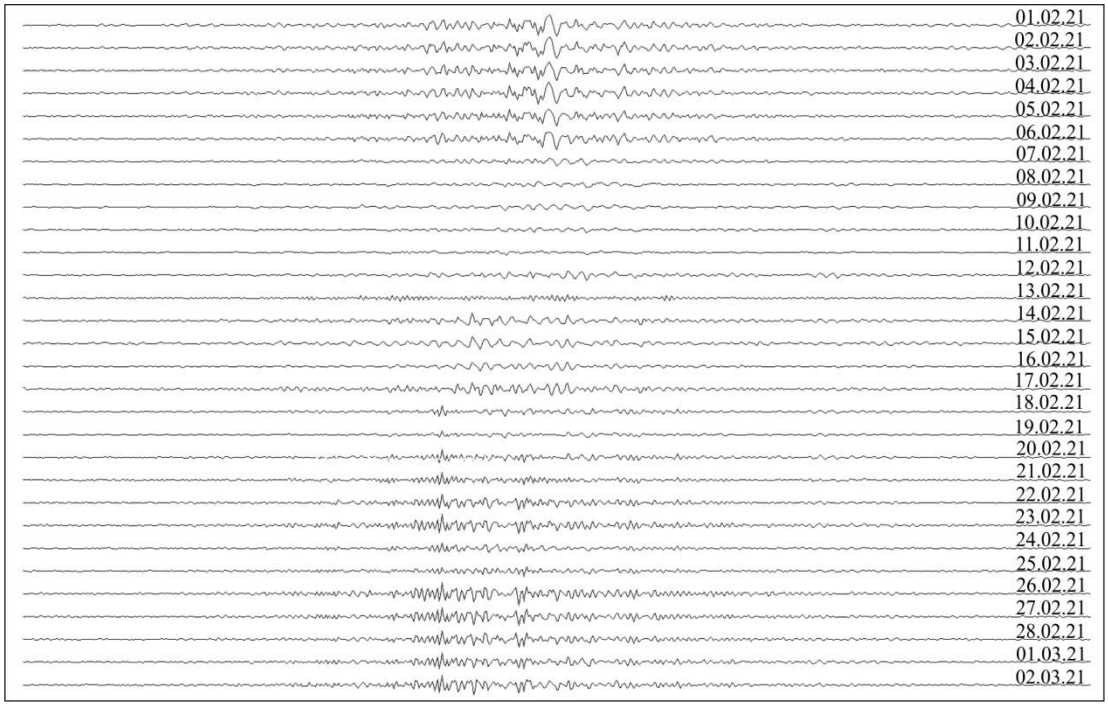


Рис. 9. Функция взаимной корреляции на станциях CIR и KRS за период с 1 февраля по 2 марта 2021 г.

Заключение

Последнее вершинное извержение вулкана Ключевской с пепловыми выбросами и излиянием лавовых потоков началось 4 октября 2020 г. и наблюдалось до 7 февраля 2021 г. Необычность этого извержения заключалась в том, что через 10 дней после его резкого завершения и впервые за 30 лет был зафиксирован новый «несубтерминальный» побочный прорыв на расстоянии ~3.5-4.0 км от

кратера, который впоследствии назвали именем Г.С. Горшкова. Это побочное извержение стало первым в истории наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН, и оно не было спрогнозировано в режиме реального времени. При ретроспективном изучении сейсмичности обращено внимание на следующие факты. 7 февраля средняя амплитуда дрожания резко уменьшилась в 16 раз, и это позволило зарегистрировать 7-8 февраля рой поверхностных землетрясений с классом не более 7.3 под центральным кратером. При этом эпицентры некоторых событий были смещены в северо-западном направлении от вершины. В дальнейшем до 18 февраля уже большая часть эпицентров землетрясений с классом не более 5.0 сместилась в северо-западном направлении от вершины, хотя значение смещений в большинстве случаев не превышало точности локации этих событий в плане. Центр тяжести эпицентров этих событий примерно совпал с местом нового побочного извержения, свечение от которого впервые было отмечено 18 февраля.

Интересные результаты получены в рамках ретроспективного анализа посуточной автоматической локации источника вулканического дрожания по функциям взаимной корреляции сейсмических сигналов. Было зафиксировано отчетливое смещение в плане источника вулканического дрожания от вершины Ключевского вулкана в сторону побочного прорыва. Проведенное специальное исследование для выявления дополнительных признаков миграции источника вулканического дрожания позволило детально проследить изменение активности в период окончания вершинного и начала побочного извержения Ключевского вулкана.

Полученные в рамках ретроспективного анализа новые результаты делают необходимым корректировку сценария П.И. Токарева, и они обязательно будут использованы при прогнозе будущих побочных извержений вулкана Ключевской.

Работа выполнена в рамках темы НИР АААА-А19-119031590060-3 госзадания № 075-00576-21 ФИЦ ЕГС РАН на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В. и др*. Извержения вулкана Ключевской в 2012–2013 гг. // Вулканизм и связанные с ним процессы // Материалы региональной конференции, посвященной Дню вулканолога, 27–28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 46–52. http://www.kscnet.ru/ivs/publication/volc_day/2014/art7.pdf

2. *Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В., Борисов И.А.* Извержения вулкана Ключевской в 2015–2016 гг. // Вулканология и сейсмология. 2018. № 2. С. 3–13.

3. *Мелекесцев И.В.* Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с

4. *Озеров А.Ю., Гирина О.А., Жаринов Н.А., Белоусов А.Б., Демянчук Ю.В.* Извержения вулканов Северной группы Камчатки в начале XXI века // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 3–19.

5. *Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Тр. Лаб. вулканологии. 1956. Вып. 11. 311 с.

6. *Сенюков С.Л.* Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.

7. *Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Гарбузова В.Т., Кожевникова Т.Ю.* Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами с 01.01.2001 г. по 31.07.2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. №3. С. 50–59.

8. *Токарев П.И.* Прогноз побочных извержений вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 47–61.

9. *Токарев П.И.* Прогноз побочного извержения вулкана Ключевского в марте 1983 г // Вулканология и сейсмология. 1983. №5. С. 3–8.

10. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.

11. *Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И.* Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. №2. С. 3–42.

12. *Хренов А.П., Двигало В.Н., Кирсанов И.Т. и др*. Вулкан Ключевской // Действующие вулканы Камчатки (в 2-х томах). Т. 1 / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М.: Наука, 1991. С. 106–153.

13. *Droznin D.V., Shapiro N.M., Droznina S.Ya., Senyukov S.L., Chebrov V.N. and Gordeev E.I.* Detecting and locating volcanic tremors on the Klyuchevskoy group of volcanoes (Kamchatka) based on correlations of continuous seismic records // Geophys. J. Int. (2015) 203, 1001–1010. doi: 10.1093/gji/ggv342.

УДК 550.343

О ВОЗМОЖНОСТИ ВВЕДЕНИЯ ОБОБЩЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КЛАССА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Соломатин А.В.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, alf55@mail.ru.

В статье предложен новый подход к решению проблемы построения обобщенной энергетической шкалы землетрясений. Такая шкала может быть построена на основе существующих магнитуд и классов землетрясений с коррекцией присущих им ограничений, и приведения их к единой «линеаризованной» форме. Создание такой шкалы возможно за счет перенесения акцента с аппаратно-методической проблемы на задачу учета статистических свойств сейсмического процесса, отражаемых законом Гутенберга-Рихтера и представлениями об энергетическом балансе сейсмического процесса.

Введение

Идея построения шкал, определяющих величину землетрясений в виде магнитуды, возникла на заре развития количественной сейсмологии в качестве ответа на вопрос о реальных величинах энергетических процессов, сопровождающих возникновение землетрясения. Будучи достаточно простой в первоначальной постановке, эта задача впоследствии существенно усложнилась, что связано с развитием сейсмических наблюдений, расширением круга задач, решаемых сейсмологией и совершенствовании знаний о свойствах сейсмического излучения. Все это привело к существенному росту числа шкал, определяющих величины землетрясений, отличающихся как методиками построения, так и типом используемой для регистрации сейсмического сигнала аппаратуры. Внушительное количество магнитудных шкал землетрясений, используемых в настоящее время и использовавшихся ранее, привело к нерешенной до сих пор на удовлетворительном уровне задаче их унификации. Предельная сложность этой задачи в первую очередь связана с целым рядом факторов, сопровождающих процесс генерации, распространения и регистрации сейсмического излучения очагом землетрясения. Кроме того, ее дополнительно осложняет необходимость использования данных каталогов, построенных по методикам и с помощью аппаратуру, которые в настоящее время уже не применяются.

Естественный подход решения даже более скромной задачи: построения однородных оценок величин землетрясений на основе регрессионных соотношений между различными шкалами, оказался также не слишком эффективным. Существенная неточность определения магнитуд даже в рамках одной шкалы наряду с ограниченностью и неполнотой данных, а также целый ряд других проблем породили множество регрессионных соотношений, разобраться в которых обычному пользователю сейсмических каталогов становится практически невозможно. И такое положение существенно не вяжется с наличием чрезвычайно обширного сейсмологического материала, а также относительной легкости доступа к нему для исследователей.

Примерно та же ситуация, что и с мировыми магнитудами, но осложненная дополнительно региональными отличиями свойств сейсмического процесса, наблюдается и в случае региональных оценок величин землетрясений, в том числе – энергетических классов K.

Сказанное выше определяет важное и принципиальное ограничение «сейсмометрического» подхода к решению задачи унификации шкал величин землетрясений. Так, все уточнения в методиках определения величины землетрясения в настоящее время доступны лишь при решении узких задач и только профильными специалистами. Несмотря на то, что при получении сейсмологических данных в настоящее используется высококлассная аппаратура, по качеству ответа на простой, но объективный вопрос о величине землетрясения эти данные для пользователя-неспециалиста во многом находятся на уровне оценок первой половины прошлого века.

Значительным продвижением в создании унифицированной шкалы величин землетрясений стала предложенная в 1977 г. магнитуда Mw (шкала Канамори [7]). Это, пожалуй, наиболее значимое к настоящему времени в развитии сейсмометрии продвижение, стало возможным благодаря использованию сейсмического сигнала для определения сейсмического момента в источнике землетрясения M_0. Построенная с использованием этого параметра, определяющего самые общие

характеристики очага землетрясения: его размеров и величины подвижки в нем, магнитуда *Mw*, к настоящему времени является одной из наиболее точных характеристик величины землетрясения.

В то же время, определения магнитуды *Mw* в настоящее время доступны, как правило, только для землетрясений с магнитудами, начиная, как правило, с величин 5-6. Кроме того, уже накоплен весьма значительный сейсмологический материал, который вряд ли можно будет привести к этой шкале непосредственно. Все это существенно ограничивает возможности ее применения.

Таким образом, возможности создания унифицированной шкалы величин землетрясений на основе лишь сейсмометрических методов, без привлечения дополнительных данных к настоящему времени сильно ограничены. Замечание о дополнительных данных неслучайно: идея привлечения дополнительных, несейсмометрических, данных при построении отдельных магнитуд отнюдь не нова. В частности, определения уровня насыщения магнитуд проводится на основе их соответствия закону Гутенберга-Рихтера. Таким образом, в настоящее время фактически признается, что закон повторяемости землетрясений, может играть роль калибровочной функций для шкал величин землетрясений. В этом плане несколько странной является сложившаяся ситуация явно недостаточного использования этого закона как средства построения унифицированной шкалы величин землетрясений.

В настоящей работе:

- предлагается ввести представление о статистических свойствах сейсмического процесса, таких как закон повторяемости землетрясений, в качестве важнейшего несейсмометрического метода построения обобщенной шкалы землетрясений в достаточно широком диапазоне величин землетрясений;
- в качестве примера применения предлагаемой методики будут приведены результаты исследования на основе упрощенного построения такой шкалы для землетрясений различных районов Тихого океана и Юго-Восточной Азии.

Обоснование возможности введения унифицированной энергетической шкалы землетрясений K_F

Возможность определения энергий землетрясений на основе сейсмометрического метода основывается на гипотезах о свойствах сейсмического излучения очага землетрясения, а также о предположениях относительно факторов его затухания при распространении вплоть до сейсмометрической аппаратуры. К сожалению, эти гипотезы бывают достаточно обоснованы далеко не для всего диапазона регистрируемых событий. Более того, вопрос о КПД очагов землетрясений различной величины при излучении сейсмического сигнала изучен только в самых общих чертах.

С другой стороны, достаточно естественное использование коррекции энергетических шкал на основе закона распределения землетрясений ограничено недостаточной изученностью (до сих пор!) этого закона. В качестве попытки продвижения в этом направлении можно привести работу [2]. Представленные в этой работе соотношения связывают суммарную выделенную энергию землетрясений с количеством землетрясений. В отличие от закона Гутенберга-Рихтера интегральные оценки выделенной сейсмической энергии должны привести к более устойчивым результатам. Но наиболее важная проблема, которая не была решена в этой работе, и которая затрудняет применение ее результатов – ограниченность реальных каталогов землетрясений снизу, что приводит к сильной нелинейности найденного соотношения в этом диапазоне.

Эта проблема была решена в [3]. В этой работе было получено, что более естественным определением закона повторяемости землетрясений по сравнению с законом Гутенберга-Рихтера является закон энергетического баланса между энергией землетрясений по различными энергетическим диапазонам. По сути, в ней было введено представление о балансе энергетического спектра сейсмического процесса. Это существенно ограничивает применимость построения закона распределения энергетическими классами, так как закон Гутенберга-Рихтера применим и для магнитудных оценок. Однако, в указанной работе, как и в работе [1], было показано, что закон Гутенберга-Рихтера является приближенным в области наиболее сильных используемых при каждом конкретном построении землетрясений, а также была указана соответствующая ему более точная зависимость с учетом этого фактора.

Важнейшим в рамках данного исследования выводом работы [3] явилось то, что баланс сейсмического процесса достигается при величине наклоне графика повторяемости $\gamma = 1/2$ (в представлении закона Гутенберга-Рихтера для энергетических классов). Именно этот вывод позволяет ввести представление об обобщенном (и унифицированном – при соответствующем изучении не только в локальном, но и глобальном масштабе) энергетическом классе K_F.

Естественно, при этом вопрос о сейсмометрических оценках землетрясений не снимается, но в дополнение к этим оценкам предлагается достаточно мощный инструмент их линеаризации.

Пример построения и использования шкалы K_F

Наиболее простой способ решения задачи построения шкалы K_F на локальном уровне – использование рангового представления выбранных магнитудных оценок. Такой подход не предполагает построения и регрессий и точных количественных оценок сейсмической активности, но при этом позволяет эффективно обобщать данные различных регионов в плане отклонения наклона графика повторяемости γ от его средних значений. Важным является предположение, следующее из результатов [3], что это среднее одинаково для всех представительных выборок, охватывающих достаточно длительный в среднем равновесный период развития сейсмического процесса.

Такая задача, хотя и является достаточно узкой, но она крайне важна в естественном предположении, что именно параметр γ является наиболее прямой характеристикой, определяющей динамические характеристики сейсмоактивной среды.

Все сказанное выше было использовано при построении в [4] обобщенных вариаций параметра γ в областях будущих сильнейших землетрясений на III заключительной стадии сейсмического цикла [5, 6 и др.].

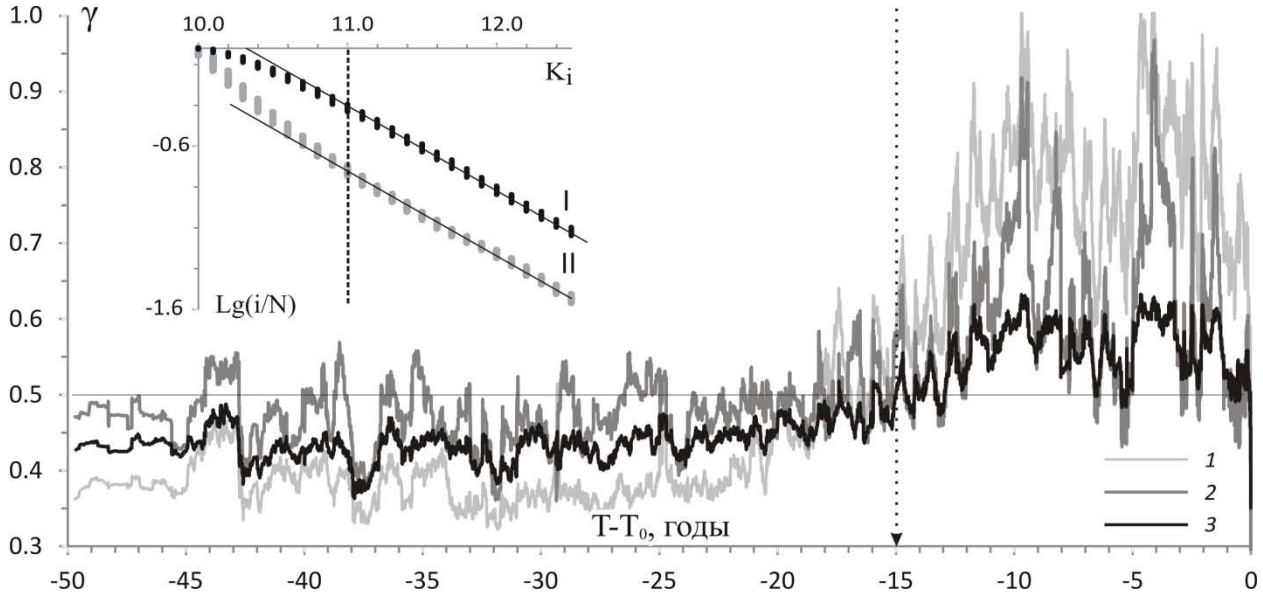


Рис. 1. Обобщенные вариации наклона графика повторяемости γ в очаге готовящегося сильнейшего события. *1-3* – вариации параметра γ при его построении на основе трех различных методов. На врезке – фрагмент графиков повторяемости землетрясений на основе тех же данных: I – в интервале времени за 15 лет до сильнейшего события; II – то же в более ранний период. Эти данные были использованы для выбора нижней границы представительности используемых выборок землетрясений [4].

Полученные в [4] на основе обобщенного параметра K_F результаты, позволили, с одной стороны, определить смысл III стадии сейсмического цикла как стадии высокой неоднородности энергетического спектра сейсмического процесса, а с другой – связать проявления этих неоднородностей с выявленными ранее периодичностями в его развитии.

Оба результата являются важнейшими не только в теоретическом плане – в плане получения новых сведений о подготовке сильнейших землетрясений, но и в практическом – в плане представления нового направления развития методов сейсмического прогноза.

В методическом плане использованная шкала, локальных оценок K_F позволила в указанной работе, во-первых, достаточно простым, без использования регрессионных соотношений, и, в то же время - естественным образом, объединить данные совершенно разных регионов, а во-вторых, исключить нелинейность использованных выборок в плане их представления законом Гутенберга-Рихтера. Последнее из замечаний является особенно важным для построения оценок γ, т.к. найденные закономерности относятся, в основном, к диапазону наиболее слабых землетрясений, что предъявляет достаточно жесткие требования к соответствию выборок закону Гутенберга-Рихтера во всем диапазоне используемых землетрясений.

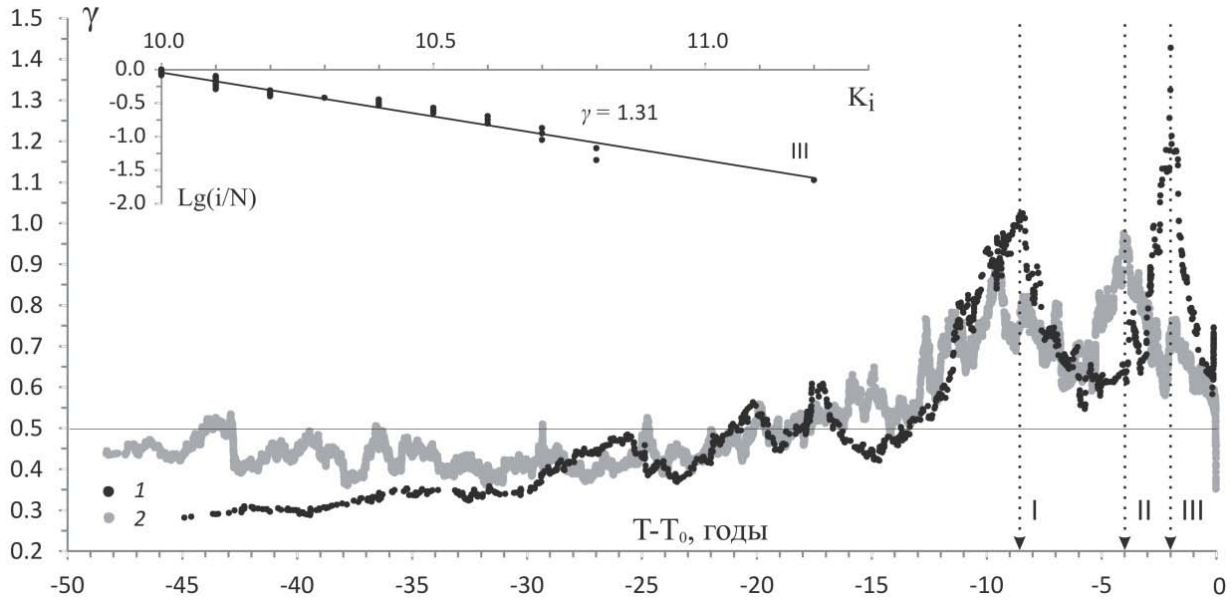


Рис. 2. Обобщенный ход вариаций параметра γ для сейсмического процесса при подготовке сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона и прилегающих областей (1) в сопоставлении с аналогичным графиком для сильнейших землетрясений других районов Тихого океана и Юго-Восточной Азии (2) [4].

Конечно, без тщательного обоснования вводимой шкалы K_F подобные построения, основанные только на ранговых соотношениях величин землетрясений, выглядят рискованными. Однако, полученные результаты были проверены как на основе вариаций нижнего уровня используемых величин землетрясений, так и на основе использования трех различных методов построения величин параметра γ (рис. 1). Дополнительным свидетельством достоверности полученных результатов, а следовательно и применимости шкалы K_F, явилось общее соответствие полученных результатов для двух разных регионов (рис. 2).

Выводы

Очевидно, что применение представления об обобщенном энергетическом классе, в качестве возможности линеаризации обычных, сейсмометрических шкал величин землетрясений, достаточно перспективно даже в его простейшем представлении: оно позволяет обоснованно снять нелинейности, присущие большинству используемых шкал и привести их к общей форме в плане соответствия закону Гутенберга-Рихтера. Вместе с тем, построение действительно унифицированной шкалы K_F требует серьезных исследований, как дополнительных: по ее обоснованию, так и прямого количественного согласования этой шкалы с основными мировыми магнитудами, и прежде всего M_W (возможно и желательно еще - *Me*). Тем не менее, такая работа представляется наиболее перспективным путем унификации всех магнитуд не только для текущих наблюдений, но и наблюдений, сделанных ранее.

Список литературы

1. *Востриков Г.А.* Связь параметров графика повторяемости, сейсмического течения и очага землетрясения / Тр. ГИН. Вып. 482. М.: ГИН РАН, 1994. 292 с.

2. *Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* О параметрах закона повторяемости землетрясений. // Садовский М.А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 1999. С. 266–269.

3. *Соломатин А.В.* Закон повторяемости землетрясений и энергетический баланс сейсмического процесса // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 4. С. 39–48.

4. *Соломатин А.В.* Энергетический спектр сейсмического процесса в приложении к долгосрочному сейсмическому прогнозу и среднесрочно-краткосрочному уточнению сейсмической опасности // Вулканология и сейсмология. 2021. № 2. С. 67–79.

5. *Федотов С.А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.

6. *Федотов С.А.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.

7. *Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // J Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 2981–2987.

Исследование предвестников землетрясений и извержений вулканов

УДК 550.312

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА УДИНСКОМ ВУЛКАНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

Бурмин В.Ю.[1], Салтыков В.А.[2], Коновалова А.А.[2]

[1]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва,
[2]Камчатский филиал ФИЦ «Единая Геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский,
burmin@ifz.ru, salt@emsd.ru

Введение

В 2017–2019 гг. в юго-восточной части Ключевской группы вулканов (КГВ) была отмечена сейсмическая активность, проявившая себя впервые за годы инструментальных наблюдений. Пространственно она связана с Удинским вулканическим комплексом (УВК) и рассматривается как Удинская сейсмическая активизация [14].

КГВ включает в себя как действующие (Ключевской, Безымянный, Ушковский, Плоский Толбачик, поле ареального вулканизма Толбачинский Дол), так и потухшие вулканы (Большую и Малую Удину, Овальную и Острую Зимину, Крестовский, Средний, Острый Толбачик, Горный Зуб). Действующие вулканы КГВ проявляют сейсмическую активность на глубине до ~30–35 км. Увеличение сейсмической активности рассматривается как возможный предвестник извержения вулканов [2, 7, 8, 10, 12, 13, 15, 16]. В 2017–2019 гг. в юго-восточной части КГВ появился новый сейсмогенерирующий объем, проявивший себя впервые за годы инструментальных наблюдений. Пространственно он связан с УВК и рассматривается как Удинская сейсмическая активизация [14]. Однако даже в пределах единой КГВ вулканы исследованы далеко неравномерно. Район УВК можно рассматривать как ее наименее исследованный участок.

Для детального исследования Удинской сейсмической активизации и уточнения положения гипоцентров землетрясений в 2019 г. в дополнении к существующей региональной сети были установлены четыре дополнительные временные сейсмические станции. Результаты исследований, проведенных в 2019 г. в окрестности УВК, приведены в работе [4]. Сейсмические станции в районе КГВ были расположены в основном односторонне по отношению к УВК. Такая конфигурация является неоптимальной для определения положения гипоцентров [3, 6] и накладывает ограничения на изучение сейсмичности в рассматриваемом районе.

Методика исследования

Для оценки качества полученных результатов, представляется важным оценка эффективности сейсмической сети, развернутой в районе УВК. Под эффективностью сейсмологической сети, прежде всего, понимаются минимальные магнитуды или энергетические классы землетрясений, которые регистрируются сейсмическими станциями сети, а также точность определения координат гипоцентров землетрясений. Под магнитудой m мы подразумеваем здесь магнитуду m_b, определяемую по объёмным сейсмическим волнам. В работе [1] предлагается для определения m_{min} формула: $m_{min} = \lg(\gamma a_п/VT) + \sigma(\Delta, h, s(T, \omega)) - \delta m$. В этой формуле $\sigma(\Delta, h, s(T, \omega))$ – калибровочная функция; γ – параметр, равный минимально возможному отношению амплитуды полезного сигнала к уровню помех, достаточного для его выделения (на практике принято полагать $\gamma \approx 1.5$); $a_п$ – амплитуда помех на сейсмограмме в мм; T – соответствующий этой амплитуде период колебаний; V – увеличение прибора в тысячах. Обычно на сейсмических станциях увеличение подбирается таким образом, чтобы $a_п$ было порядка 1 мм. δm – величина, характеризующая систематическое отклонение в оценке магнитуд для данной станции. Здесь мы принимаем поправку δm равную нулю.

Для слабых землетрясений, то есть землетрясений, магнитуды которых меньше 3.0, для оценки их силы удобно пользоваться так называемыми энергетическими классами [11]: $k = \lg E$, где E – энергия землетрясения в джоулях.

Связь между магнитудами землетрясений и их энергетическим классом для Камчатских землетрясений, согласно работе [5] запишется в виде $k = 1.69m + 2.84$.

Обратная зависимость имеет вид $m = (k - 2.84) / 1.69$.

Порог энергетического класса, при котором землетрясение будет зарегистрировано необходимым числом сейсмических станций, определяется калибровочной функцией $\sigma(\Delta, h, s(T, \omega))$,

которая может быть построена на основе амплитудной номограммы. На рис. 1 представлены калибровочные кривые, т.е. зависимости значений минимальных классов от эпицентральных расстояний, для сейсмических станций с увеличением 30 тысяч, рассчитанной на основе амплитудной номограммы для Камчатки [9].

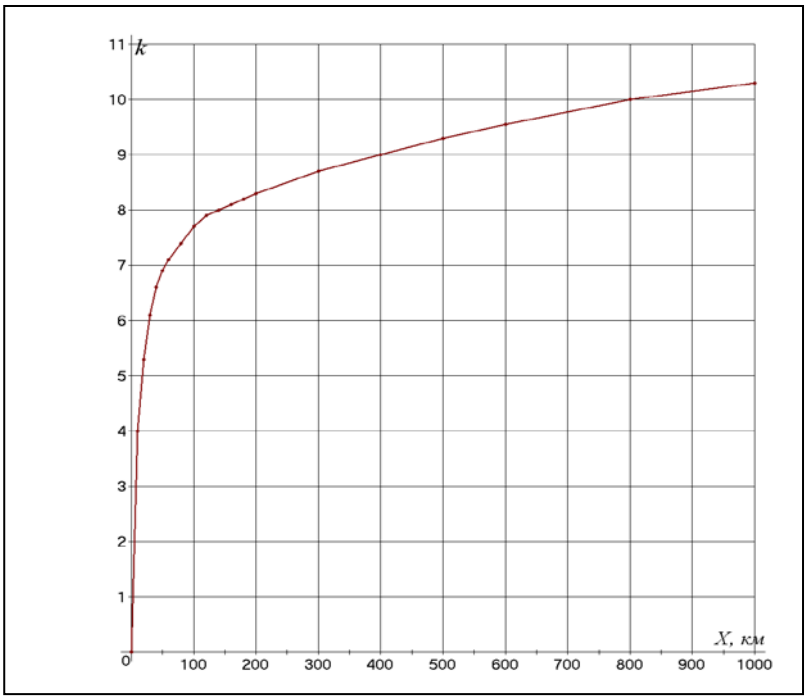


Рис. 1. Калибровочная кривая для определения минимальных классов землетрясений, регистрируемых сейсмическими станциями на УВК с увеличением 30 тысяч.

Обсуждение результатов

На рис. 2 в цилиндрической системе координат показано распределение минимальных энергетических классов для сейсмических станций, расположенных в УВК в предположении, что увеличение станций равно 30000. Нетрудно видеть, что сеть в областях сгущения сейсмических станций регистрирует землетрясения, начиная с энергетического класса 4.5, что соответствует магнитуде ~1.0. На периферии сеть регистрирует события 8-го энергетического класса, что соответствует магнитуде ~3.0.

Для расчетов глубина гипоцентра была задана 10 км, а скоростная модель взята из работы [4]. Ошибки в определении времени пробега сейсмических волн были заданы 0.1 с, а погрешность в задании скоростей распространения сейсмических волн 0.1 км/с. На рис. 3–5 представлены распределения ошибок в определении долготы, широты и глубины для сейсмических станций, расположенных в УВК. Расчеты проводились в соответствии с соотношениями, полученными в работе [3].

Значения ошибок в определении координат эпицентров землетрясений в центре сети составляет по долготе (δλ) и по широте (δφ, км) около 0.4 км. На периферии сети 1.0 км. Значения ошибок в определении глубин очагов землетрясения (*H*, км) системой в центре сети не превышает 1.0 км, на всей территории УВК не превышает 5 км.

Заключение

Сеть сейсмических станций в УВК, включая четыре станции временной сети, состоит из 29 сейсмографов, но расположены они на территории не равномерно. Как упоминалось во Введении, сейсмические станции в районе КГВ расположены в основном односторонне по отношению к УВК. И поэтому в разных точках УВК регистрируются землетрясения разного минимального энергетического класса и с разной точностью.

Проведена оценка эффективности сети сейсмических станций на территории УВК расположенных на территории не равномерно. В разных точках УВК регистрируются землетрясения разного минимального энергетического класса и с разной точностью. Расчет минимальных энергетических классов для сейсмологической сети УВК из 29 сейсмических станций показывает, что при увеличении станций 30 тысяч такая сеть на всей рассматриваемой территории уверенно регистрирует землетрясения в диапазоне 9.0–11.0 минимальных энергетических классов, что соответствует магнитуде ~2.5–4.3.

Значения ошибок в определении координат эпицентров землетрясений по широте (δφ) (км) и по долготе (δλ) (км), внутри сети не превышает 0.4 км. Значения ошибок в определении глубин очагов землетрясения (*H*) (км) в центре сети не превышает 0.2 км, а внутри всей территории УВК не превышает 5.0 км.

Для того чтобы система наблюдений регистрировала события, происходящие в разных точках УВК, с одинаковой точностью и одного минимального энергетического класса необходимо, чтобы сейсмические станции системы были расположены более равномерно по всей территории, то есть система наблюдений должна иметь оптимальную конфигурацию.

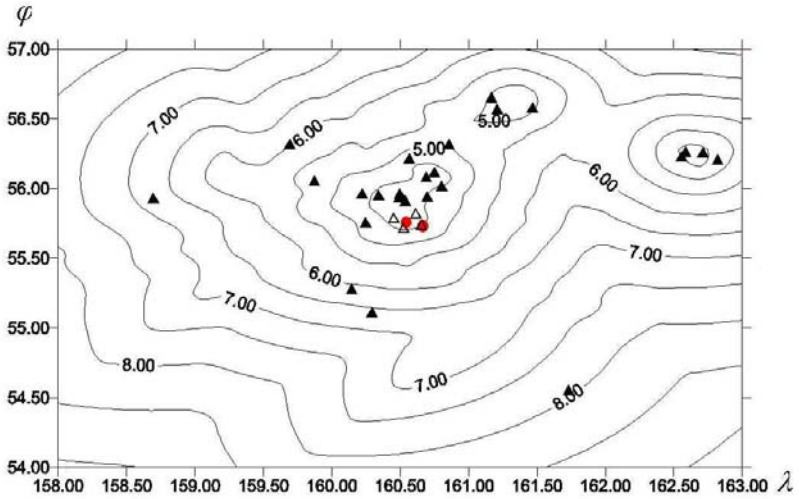


Рис. 2. Распределение минимальных энергетических классов землетрясений, регистрируемых сейсмологической сетью на УВК.

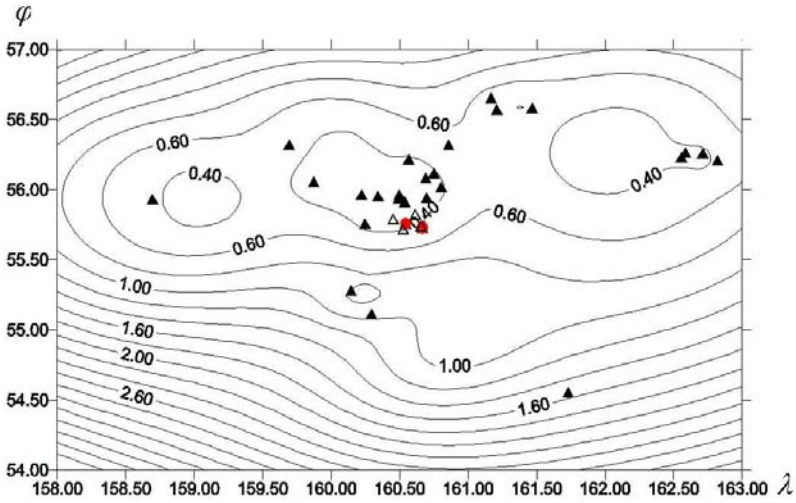


Рис. 3. Распределение ошибок (в км) в определении долгот землетрясений, регистрируемых Удинской сейсмологической сетью.

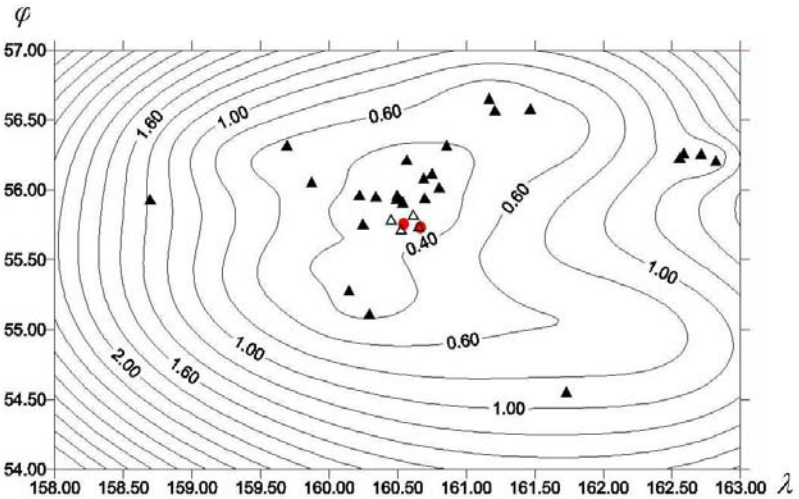


Рис. 4. Распределение ошибок (в км) в определении широт землетрясений, регистрируемых Удинской сейсмологической сетью.

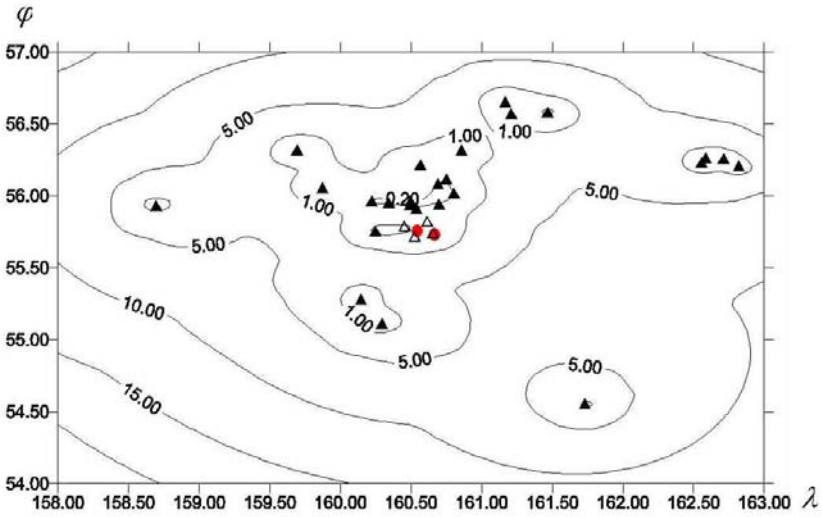


Рис. 5. Распределение ошибок (в км) в определении глубин землетрясений, регистрируемых Удинской сейсмологической

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00204.

Список литературы

1. *Антонова Л.В., Аранович З.И., Кондорская Н.В.* Магнитуда и эффективность станций в связи с проблемой оптимизации сейсмических наблюдений // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Т. 2. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. С. 195–202.

2. Большое трещинное Толбачинское извержение (1975–1976 гг., Камчатка). М.: Наука, 1984. 637 с.

3. *Бурмин В.Ю.* Оптимальное расположение сейсмических станций при регистрации близких землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 5. С. 34–42.

4. *Бурмин В.Ю., Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А.* Регистрация локальных землетрясений под Удинскими вулканами (Камчатка) региональными и временными сейсмическими станциями. Уточнение скоростной модели путём обращения годографа от глубинного источника // Сейсмические приборы. 2020. Т. 55. № 3. С. 48–60. https://doi.org/10.21455/si2019.3-3

5. *Гусев А.А., Мельникова В.Н.* Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.

6. *Дрознин Д.В., Дрознина С.Я., Сенюков С.Л., Чебров Д.В., Шапиро Н.М., Шебалин П.Н.* Вероятностные оценки гипоцентров по данным камчатской сети сейсмических станций // Физика Земли. 2019. № 4. С. 153–165.

7. *Иванов В.В.* Средне- и краткосрочные прогнозы извержений вулканов на Камчатке (1955–2012 гг.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2 (22). С. 98–119.

8. *Иванов В.В.* Сейсмический мониторинг и прогноз извержений вулканов Камчатки // История науки и техники. 2017. № 7. С. 85–96.

9. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях ЕССН СССР / Отв. сост.: *Кондорская Н.В., Аранович З.И., Соловьёва О.Н., Шебалин Н.В.* М.: Наука, 1981. 272 с.

10. *Кугаенко Ю.А., Титков Н.Н., Салтыков В.А., Воропаев П.В.* Анализ подготовки Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. в параметрах сейсмичности и деформаций земной коры по данным системы комплексного мониторинга активности вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 40–58.

11. *Раутиан Т.Г.* Проблемы определения энергии землетрясений – Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Т. 2. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. С. 107–112.

12. *Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В.* Об аномалии сейсмического режима, предварявшей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 16–19.

13. *Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В.* Первое применение в реальном времени методики вероятностного прогноза извержений вулкана Безымянного // Геофизические исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 49–54.

14. *Салтыков В.А., Воропаев П.В., Кугаенко Ю.А., Чебров Д.В.* Удинская сейсмическая активизация 2017–2018 гг. // Вестник КРАУНЦ. Наули о Земле. 2018. № 1. Вып. 37. С. 5–7.

15. *Токарев П.И.* Предвестники вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 108–119.

16. *Федотов С.А., Жаринов Н.А.* Об извержениях, деформациях, сейсмичности Ключевского вулкана (Камчатка) в 1986–2005 гг. и механизме его деятельности // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 3–31.

УДК 550.348

КОНЦЕПЦИЯ ПОДХОДА К КРАТКОСРОЧНОМУ ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ВРЕМЕНИ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНЕ АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА (КАМЧАТКА)

Гаврилов В.А. [1]***, Дещеревский А.В.*** [2]***, Соломатин А.В.*** [1]***, Пантелеев И.А.*** [3]***,***
Пулинец С.А. [4]***, Богданов В.В.*** [5]***,***
[1] *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский,*
vgavr1403@mail.ru
[2] *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, г. Москва*
[3]*Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь*
[4]*Институт космических исследований РАН, г. Москва*
[5]*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн РАН,*
с. Паратунка, Камчатский край

Согласно данным последнего долгосрочного сейсмического прогноза [9] наиболее вероятным местом следующего сильнейшего ($M \geq 7.7$) землетрясения для всей Курило-Камчатской дуги является протяженная сейсмическая брешь в районе Авачинского залива и южной части Камчатки. Неглубокое землетрясение с $M \geq 8.0$ в районе Авачинского залива способно вызвать в г. Петропавловске-Камчатском и расположенных поблизости городов Елизово и Вилючинск сотрясения до девяти баллов и привести к гибели нескольких десятков тысяч человек. По этой причине достаточно надежный вероятностный краткосрочный прогноз такого землетрясения рассматривается авторами как наиболее актуальная и ответственная задача для настоящего момента.

Концептуальные положения подхода к решению этой задачи можно сформулировать следующим образом.

1. Основной целью является краткосрочный прогноз времени сильнейшего ($M \geq 7.5$) неглубокого землетрясения в районе Авачинского залива с «мягкими» требованиями к точности прогнозирования времени и магнитуды землетрясения на основе вероятностной оценки степени текущей сейсмической опасности.
2. Для краткосрочного прогноза времени землетрясения используются данные, отражающие текущие изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды в зоне Петропавловск - Камчатского геодинамического полигона (ПГП).
3. Краткосрочный прогноз времени такого землетрясения основывается на оценке **соответствия текущих данных** комплексного геофизического мониторинга НДС геосреды в зоне ПГП с **ожидаемым сценарием их изменений**, рассчитанного для заключительной стадии подготовки сильного землетрясения в районе Авачинского залива.
4. Расчет такого сценария выполняется методами численного моделирования в рамках используемой *базовой физической модели* подготовки землетрясения, в качестве которой выбрана дилатантно-диффузионная (ДД) модель.

Ниже указанные положения обсуждаются более детально.

О вероятностном краткосрочном прогнозе землетрясений

Фактически все аргументы противников работ по краткосрочному прогнозу землетрясений сводятся к тому, что точный прогноз времени, места и магнитуды землетрясения, а также высокая надежность прогнозов одновременно невозможны, следовательно, такие работы нецелесообразны. Например, в [6] указывается, что допустимые погрешности прогноза времени, места эпицентра и магнитуды землетрясения должны соответственно составлять ± 3 сут, ± 30 км, ± 0.1, а процент успешных прогнозов должен быть не менее 85–90%. Утверждается, что прогнозы с более значительными погрешностями якобы не имеют смысла, поскольку в таких случаях власти не смогут принять обоснованного решения для эвакуации населения, остановки работы ряда промышленных предприятий и т.п. Результаты многолетних исследований в различных сейсмоактивных регионах Земли позволяют, по мнению авторов, сделать два важных вывода. Во-первых, что прогноз землетрясений с указанными выше высокими требованиями к точности параметров землетрясения и надежности прогнозов, по-видимому, в настоящее время, действительно, нереален. Второй и более важный вывод состоит в том, что краткосрочный прогноз сильных землетрясений с «мягкими» требованиями к точности прогнозирования места и магнитуды землетрясения, и с вероятностной

оценкой степени текущей сейсмической опасности не только реален, но и, безусловно, необходим. В большинстве случаев для жителей сейсмоопасного района важна не точность прогноза параметров землетрясения, а оценка вероятности сильных (выше 6 баллов) сотрясений в месте проживания на ближайшие дни – недели. А также обучение правильным действиям при получении прогноза сильного землетрясения и при самом землетрясении. Очевидно, что ставить вопрос об обязательном последующем принятии властями решений по эвакуации населения, остановке работ предприятий и т.п. при получении заключения о повышенной вероятности сильного землетрясения пока преждевременно. При современном состоянии проблемы сейсмического прогноза такой жесткий подход приведет только к его быстрой дискредитации.

Выбор базовой физической модели подготовки землетрясений и основных методов мониторинга НДС геосреды

Ретроспективный анализ данных многолетних комплексных скважинных измерений на ПГП показывает, что подготовка сильных близких землетрясений, как правило, начинает проявляться в среднесрочном масштабе времени (за месяцы, годы до момента землетрясения). Достаточно точное определение начала стадии, *непосредственно предшествующей* землетрясению (за недели, дни до момента главного события), является весьма сложной задачей. Вместе с тем, практика многолетних исследований на ПГП показывает, что в ряде случаев заключительная стадия сложного многостадийного процесса подготовки сильного близкого землетрясения может уверенно проявляться в данных комплексных скважинных измерений. Примером таких результатов, в частности, могут служить данные, полученные во временной окрестности сильного близкого Жупановского землетрясения (30.01.2016, $M_W = 7.2$, $R_e = 104$ км, $H = 178$ км). В этом случае по данным скважинных измерений геоакустической эмиссии (ГАЭ) и электромагнитных измерений (ЭМИ) с подземными электрическими антеннами, проводимых на ПГП, с конца июня 2015 г. наблюдалось резкое снижение влажности геосреды на глубинах до 2500 м в зоне скважины Г-1. Указанные результаты послужили основанием для подачи в октябре 2015 г. в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС) заключения о повышенной вероятности землетрясений с величиной $S \geq 12\%$, где $S = L/R_h*100\%$, L-линейный размер очага землетрясения; R_h – гипоцентральное расстояние. За двое суток до момента землетрясения по данным электромагнитных и геоакустических скважинных измерений были зарегистрированы аномально быстрые и значительные (около 700 %) изменения удельного электрического сопротивления (УЭС) геосреды для глубин до 2500 м в районе ПГП (рис. 1).

Представленные на рис. 1 результаты послужили основанием для подачи в КФ РЭС **за сутки** до момента землетрясения внеочередного заключения о повышенной вероятности достаточно сильного землетрясения.

Отметим, что согласно [3, 16, 17] заключительная стадия подготовки камчатских землетрясений с магнитудами $5.0 \leq M_W \leq 6.4$, как правило, связана с ростом УЭС геосреды в районе ПГП.

К настоящему времени установлено, что удельное сопротивление горных пород очень чувствительно к изменениям НДС геосреды, связанных с подготовкой землетрясений [7, 10, 20, 24]. Результаты, полученные в ходе многолетних непрерывных электромагнитных измерений с подземными антеннами на ПГП, позволяют сделать аналогичный вывод. В качестве примера на рис. 2 представлены результаты, полученные в ходе многолетних измерений с подземной электрической антенной [1] в зоне скважины Г-1 в диапазоне частот 160 ± 20 Гц. Результаты измерений приведены в сопоставлении с моментами сильных землетрясений с величиной $S \geq 19$ %.

Из данных, приводимых на рис. 2, можно видеть, что наиболее значительные изменения УЭС геосреды сопровождали подготовку Жупановского землетрясения – самого сильного сейсмического события по величине параметра S=37% за все время скважинных измерений на ПГП, начатых в 2000 г. Отметим, что благодаря сочетанию значительной магнитуды землетрясения ($M_W = 7.2$) с относительно небольшим эпицентральным расстоянием (около 100 км), на заключительной стадии подготовки этого землетрясения были получены результаты, представляющие большой интерес для развития работ по краткосрочному прогнозу сильных камчатских землетрясений. Как показано в [4], результаты, полученные во временной окрестности Жупановского землетрясения, находят свое объяснение в рамках ДД-модели подготовки землетрясения. Данные, полученные во временных окрестностях других сильных камчатских землетрясений, также показывают их непротиворечивость указанной модели.

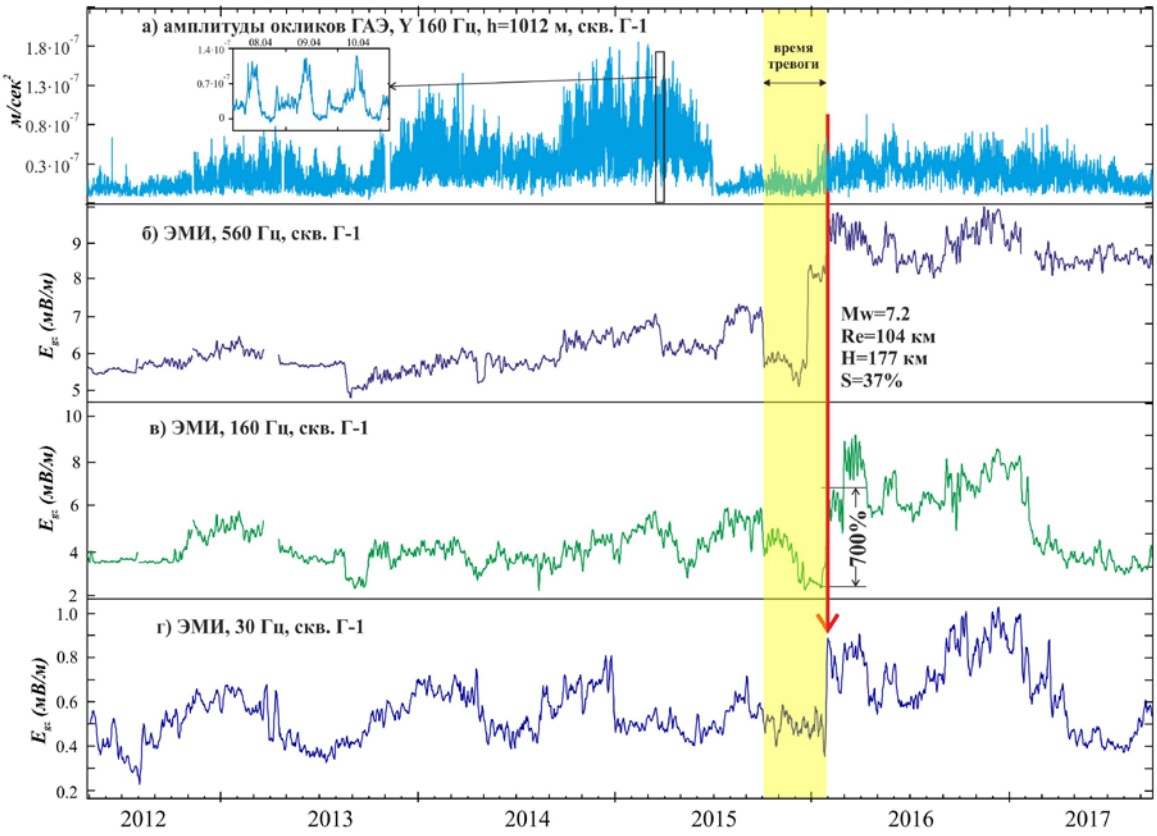


Рис. 1. Результаты скважинных геоакустических и электромагнитных измерений в зоне скважины Г-1 во временной окрестности Жупановского землетрясения: а) – изменения амплитуд откликов ГАЭ на внешнее электромагнитное излучение по данным геофона на глубине 1012 м; б) – изменения УЭС геосреды в интервале глубин до 400 м; в) – изменения УЭС геосреды для интервала глубин до 950 м; г) – изменения УЭС геосреды для интервала глубин до 2200 м.

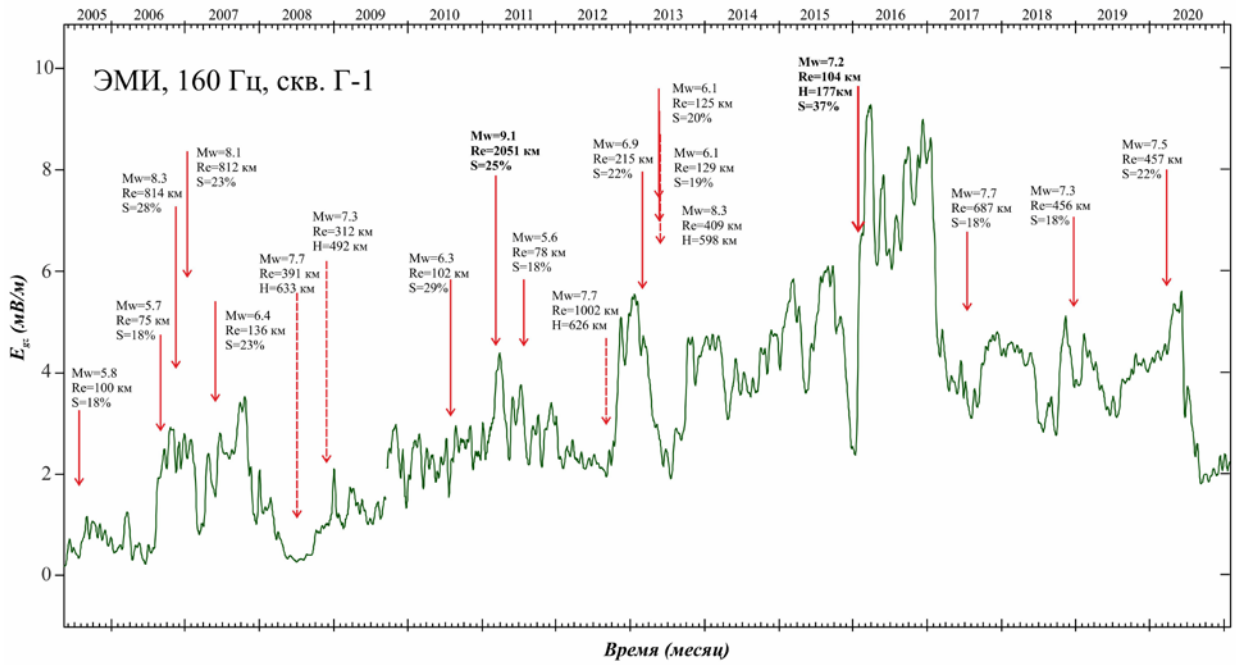


Рис. 2. Изменения среднеквадратичного значения (СКЗ) сигнала на выходе канала электромагнитных измерений с подземной электрической антенной в диапазоне 160 ± 20 Гц в зоне скважины Г-1 в сопоставлении с моментами землетрясений с величиной $S \geq 19\%$. Сглаживание в скользящем окне шириной 10 суток.

Основные положения ДД-модели были разработаны в 1970-х гг. [12, 21–23]. Отметим, что ДД-модель, как любая качественная теория, не свободна от ряда недостатков и не может претендовать на объяснение всего многообразия явлений, наблюдаемых на заключительной стадии подготовки землетрясений (тем более, если речь идет о различных сейсмоактивных зонах и разных глубинах очагов землетрясений). В частности, как отмечено в [5], механизм влияния жидкого флюида на процессы в очаговой зоне, представленный в [22], слишком упрощен и не соответствует современным представлениям. Необходимо учитывать особенности конкретной зоны подготовки землетрясения, которые во многом определяют механизм поступления и влияния жидкого флюида на процессы в зоне будущего очага землетрясения. Решающую роль при этом играет наличие (или отсутствие) вблизи этой зоны систем субвертикальных проводящих разломов, имеющих гидравлическую связь с дилатирующим объемом геосреды в очаговой зоне. Тем не менее, применимость ДД-модели для объяснений предвестниковых аномалий различной природы продолжает подтверждаться. В [15] показано, что вариации электрического сопротивления перед двумя сильными землетрясениями (Wenchuan, 2008, $M = 8$; Lushan, 2013, $M = 7$) соответствуют ДД-модели. За два года до землетрясения в районе города L'Aquila (Италия, $M = 6.3$) в районе будущего эпицентра этого землетрясения с помощью спутниковой интерферометрии (технология InSAR) была обнаружена аномалия деформации земной поверхности с линейным размером 4.6 км, причины которой связываются с дилатансионными процессами в зоне будущего очага землетрясения [11].

В настоящее время ДД-модель предварительно выбрана авторами в качестве базовой модели подготовки сильных камчатских землетрясений, т.е. модели наиболее характерного варианта многостадийного процесса подготовки сильных камчатских землетрясений. Особое внимание уделяется закономерностям изменений НДС геосреды на стадии, непосредственно предшествующей моменту землетрясения. В качестве основных методов мониторинга НДС геосреды в районе ПГП выбраны два метода: метод на основе синхронных скважинных геоакустических и электромагнитных измерений (ГАЭ-метод) и метод, базирующийся на данных электромагнитных измерений с подземными антеннами (ЭМИ-метод). Как можно видеть по данным, приводимым на рис. 1 и рис. 2, эти методы позволяют контролировать интенсификацию процессов дилатансии и флюидизации геосреды в зоне измерений, что в соответствии с концепцией ДД-модели имеет первостепенное значение для выделения заключительной стадии подготовки землетрясения. Достаточно подробная информация, касающаяся указанных методов, содержится в [1–3, 16, 18, 19].

Очевидно, что надежное прогнозирование момента времени землетрясения возможно лишь при условии достаточно точного определения начала заключительной стадии подготовки землетрясения. Как отмечалось выше, подготовка сильных близких землетрясений, как правило, начинает проявляться в данных комплексных скважинных измерений на ПГП за годы – месяцы до момента землетрясения. Однако определение на фоне этих процессов **начала стадии**, **непосредственно предшествующей землетрясению** (за недели, дни до момента главного события), на настоящем этапе исследований вызывает большие трудности и при краткосрочном прогнозе приводит, как правило, к слишком большим значениям «тревожного времени».

Определенный оптимизм в отношении решения указанной задачи авторы связывают с использованием данных высокочувствительного сейсмологического мониторинга в районе Авачинского залива и данных мониторинга состояния ионосферы над указанным районом.

Касаясь сейсмологических наблюдений отметим, что их неоспоримым преимуществом является возможность получения информации о процессах подготовки землетрясения, непосредственно из зоны его будущего очага. Согласно концепции ДД-модели начало дилатансионных процессов в зоне будущего очага предваряется плавным ростом числа слабых сейсмических событий с последующим уменьшением их числа накануне притока жидкого флюида в эту зону [22]. Кроме этого, согласно ключевым положениям ДД-модели, стадия притока флюида в зону будущего очага должна проявляться форшоковой активизацией в этой зоне непосредственно перед главным сейсмическим событием. Отметим, что ретроспективно форшоки с эпицентрами в области очагов последующих сильными землетрясений выделяются достаточно регулярно. В частности, четверть сильнейших ($M \geq 7.7$) тихоокеанских землетрясений примерно за двое суток предварялись сильными ($M \geq 6$) форшоками [8]. Этот факт лег в основу метода краткосрочного прогноза землетрясений «сценарий форшоков» [8], согласно которому при возникновении в области *сейсмической бреши* землетрясения с магнитудой $M \geq 6$ вероятность сильнейшего ($M \geq 7.7$) землетрясения в этой области на ближайшие двое суток возрастает значительно.

Целесообразность использования для краткосрочного прогнозирования сильных камчатских землетрясений данных мониторинга состояния ионосферы связывается с тем, что значимые

изменения параметров ионосферы происходят, в основном, за 1–5 суток до камчатских землетрясений [13]. При этом, как показано в [14], имеет место достаточно высокая коррелированность возникновения аномалий перед сильными камчатскими землетрясениями, регистрируемых по данным вертикального радиозондирования ионосферы, с изменениями комплекса параметров по данным сети скважинных измерений ПГП. Кроме этого также отмечается высокая коррелированность временных рядов изменений УЭС геосреды в районе ПГП с рядами данных по изменениям полного электронного содержания (ТЕС) ионосферы над этим районом, получаемых с использованием глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. В качестве примера на рис. 3 приводятся данные измерений, полученные в период подготовки и реализации сильного (M_W = 7.5) землетрясения, произошедшего 25.03.2020 г. в районе северной части Курильских островов [14].

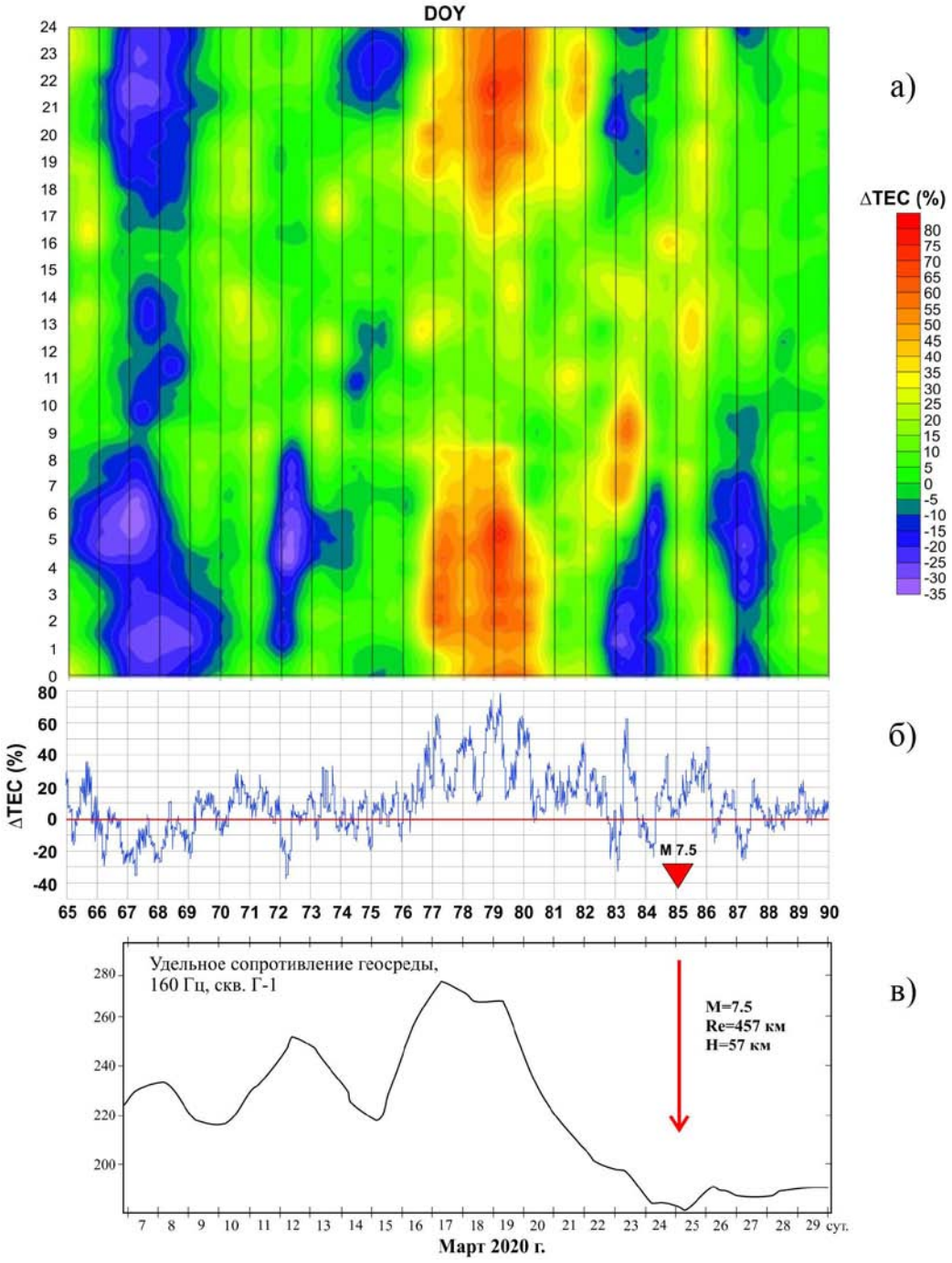


Рис. 3. Сопоставление изменений полного электронного содержания ионосферы ТЕС (а, б) с изменениями удельного электрического сопротивления геосреды в районе ПГП по данным скважинных измерений (в) во временной окрестности сильного (M_W = 7.5) землетрясения в районе северных Курил 25.03.2020 г.

О расчете сценария изменений НДС геосреды в зоне ПГП и данных комплексных геофизических измерений для заключительной стадии подготовки сильного землетрясения в районе Авачинского залива

Для решения указанных задач, в первую очередь, будут использоваться полученные к настоящему времени результаты многолетних комплексных скважинных измерений и данные сейсмологических наблюдений, полученные во временных окрестностях сильных землетрясений, произошедших в районе Авачинского залива и в других районах Камчатки. Это позволит, во-первых, оценить степень соответствия ДД-модели процессов подготовки сильных камчатских землетрясений. При этом, прежде всего, имеется в виду наличие стадийности изменений НДС геосреды и соответствие изменений в характерах данных, зарегистрированных на этих стадиях, ключевым положениям ДД-модели (с учетом эпицентральных расстояний и магнитуд произошедших землетрясений). Примером таких изменений в данных скважинных геоакустических измерений и в данных измерений с подземной электрической антенной могут служить данные, приводимые выше на рис. 1. Для результатов сейсмологических наблюдений соответствие ДД-модели может подтверждаться ростом числа слабых сейсмических событий в зоне будущего очага с последующим уменьшением их числа накануне притока жидкого флюида в эту зону. На основе анализа результатов многолетних измерений во временных окрестностях сильных камчатских землетрясений будут оценены скорости проявления предвестниковых аномалий (изменений характера регистрируемых величин, соответствующих определенной стадии ДД-модели) в данных комплексных скважинных измерений на ПГП для районов восточного побережья Камчатки. Указанные предвестниковые аномалии могут рассматриваться как отклики на изменения поля механических напряжений в районе будущего очага прогнозируемого землетрясения. Данные, полученные в ходе таких исследований, лягут в основу расчетов сценария изменений НДС геосреды в зоне ПГП для заключительной стадии подготовки сильного землетрясения в районе Авачинского залива.

Список литературы

1. *Гаврилов В.А.* О методе непрерывного мониторинга удельного электрического сопротивления горных пород // Сейсмические приборы. М.: ИФЗ РАН, 2013. Т. 49. № 3. С. 25–38.

2. *Гаврилов В.А.* Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы: дис... д-ра физ.-мат. наук. ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 2017. 385 с.

3. *Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В.* Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 52–67.

4. *Гаврилов В. А., Морозова Ю.В., Дещеревский А.В, Бусс Ю.Ю., Пантелеев И.А*. Отражение подготовки сильного близкого Жупановского землетрясения в данных комплексных скважинных измерений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы V Международной конференции, Москва, 04–07 июня 2019 г., под. ред. В.В.Адушкина, Г.Г. Кочаряна, 2019. С. 38–44.

5. *Киссин И.Г.* Флюидный режим очага и области подготовки землетрясения // Физика Земли. 2016. № 5. С. 102–119.

6. *Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А*. Краткосрочный прогноз землетрясений: реальность, научная перспектива или проект-фантом? // Вестник Московского Университета. Серия 4. Геология. 2019. № 3. С. 3–12.

7. *Сидорин А.Я.* Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.

8. *Федотов С.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С.* Оценка сейсмической опасности землетрясений с $M \geq 6$, сопровождающих сильнейшие ($M \approx 8$) тихоокеанские землетрясения // Вулканология и сейсмология. 1993. № 6. С. 3–12.

9. *Федотов С.А., Соломатин А.В.* Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019-V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017–V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 6–22.

10. *Челидзе Т.Л.* Методы теории протекания в механике геоматериалов. М.: Наука, 1987. 136 с.

11. *Amoruso A., Crescentini L.* Limits on earthquake nucleation and other pre-seismic phenomena from continuous strain in the near field of the 2009 L'Aquila earthquake // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. L10307.

12. *Anderson D.L. & Whitcomb J. H.* The dilatancy-diffusion model of earthquake prediction. In Proceedings, Conference on Tectonic Problems of the San Andreas Fault System. Stanford University Publ., Geol. Sci. 1973. V. 13. P. 417.

13. *Bogdanov V.V., Kaisin A.V., Pavlov A.V., Polyukhova A.L., Meister C.V.* Anomalous behavior of ionospheric parameters above Kamchatka peninsula before and during seismic activity // J.Physics and Chemistry of the Earth. 2017. V. 98. P. 154–160.

14. *Bogdanov V., Gavrilov V., Pulinets S. and Ouzounov D.* Responses to the preparation of strong Kamchatka earth-quakes in the lithosphere–atmosphere–ionosphere system, based on new data from integrated ground and ionospheric monitoring, E3S Web Conf., 196 (2020) 03005, https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019603005.

15. *Du X.B., Liu J., Cui T.F.* Repeatability, similarity and anisotropy changes in apparent resistivity recorded by station Chengdu at near distances before two great earthquakes // Chinese J. Geophys. 2015. V. 58 (2). P. 576–588.

16. *Gavrilov, V., Bogomolov, L., Morozova, Yu., Storcheus, A.* Variations in geoacoustic emissions in a deep borehole and its correlation with seismicity // Annals of Geophysics. 2008. 51. 5/6. P. 737–753.

17. *Gavrilov, V. A., Panteleev, I. A., Ryabinin, G. V., Morozova, Yu. V.* Modulating impact of electromagnetic radiation on geoacoustic emission of rocks. Russian Journal of Earth Sciences, 2013. V. 13. https://doi.org/10.2205/2013ES000527.

18. *Gavrilov V. A., Naumov A. V.* Modulation of geoacoustic emission intensity by time-varying electric field // Russian Journal of Earth Sciences. 2017. V. 17. № 1. DOI: 10.2205/2017ES000591.

19. *Gavrilov V.A., Panteleev I.A., Deshcherevskii A.V., Lander A.V., Morozova Yu.V., Buss Yu.Yu., Vlasov Yu.A.* Stress-strain state monitoring of geological environment based on multi-instrumental measurements in boreholes: Experience from of the studies at Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic testing site (Kamchatka, Russia) // Pure and Applied Geophysics. 2020. V. 177. № 1. P. 397–419.

20. *Morrow C., Brace W.F.* Electrical resistivity changes in tuffs due to stress // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. № B4. P. 2929–2934. doi:10.1029/JB086iB04p02929.

21. *Nur A.* Dilatancy, pore fluids and premonitory variations of ts/tp travel times. // Bull. Seism. Soc. Amer. 1972. V. 62. № 5. P. 1217–1222.

22. *Sholz C.H., Sykes L.R., Aggarval Y.P.* Earthquake Prediction: A Physical Basis // Science. 1973. V. 181. № 4102. P. 803–810.

23. *Whitcomb, J. H., J. D. Garmany, and D. L. Anderson*, Earthquake prediction: Variation of seismic velocities before the San Francisco earthquake // Science. 1973. 180. P. 632–635.

24. *Yamazaki Y.* Tectonoelectricity // Geophys. Surveys. 1977. № 3. P. 123–142.

УДК 550.34

ПРЕДВЕСТНИКОВЫЕ АНОМАЛИИ СЕЙСМИЧНОСТИ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ 2016-2019 гг. В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ И АЛЕУТСКОЙ ОСТРОВНЫХ ДУГ

Коновалова А.А., Салтыков В.А., Кравченко Н.М.

Камчатский филиал «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, seismo@emsd.ru

Введение

Региональная сейсмичность Камчатки 2016–2018 гг. находилась на высоком уровне по шкале «СОУС'09» [5]. Основной энергетический вклад внесли сильные землетрясения $M \geq 6.0$, приуроченные к области сочленения Тихоокеанской литосферной плиты, Охотской и Берингии, среди которых два землетрясения с магнитудой выше 7.0: Ближне-Алеутское землетрясение (БАЗ) 17.07.2017 г. с *ML*7.3 ($M_w = 7.8$) − сильнейшее в регионе задуговое землетрясение на трансформном разломе Беринга [8] и землетрясение Углового поднятия (ЗУП) 20.12.2018 г. *ML*7.3 ($M_w = 7.3$) − сильнейшее внутриплитное событие района южнее зоны сочленения Камчатского и Алеутского желобов [9].

При детальном ретроспективном анализе вариаций фоновой сейсмичности, предшествующей серии сильных событий в данном районе, коррелируемое предвестниковое поведение параметров среднесрочных прогностических методик [5]: *RTL*, *Z*-функция, вариации наклона графика повторяемости γ и площади сейсмогенных разрывов *dS*, позволяет рассматривать их в совокупности.

Исходный региональный каталог КФ ФИЦ ЕГС РАН 1962–2019 гг. предварительно очищен от группированных событий с помощью программы Смирнова В.Б. (МГУ им. Ломоносова), реализующей алгоритм Молчан-Дмитриевой [3], ограничен порогом представительности с энергетическим классом $K = 8.5$ по классификации Федотова С.А. и глубиной от 0 до 100 км.

Комплекс среднесрочных прогностических методик

Методика расчета прогностического параметра *RTL* основана на предположении, что в районе готовящегося землетрясения последовательно сменяют друг друга стадии сейсмического затишья и форшоковой активизации, при этом аномальные свойства сильнее выражены вблизи эпицентра и по мере приближения момента землетрясения. Аномалиям затишья по методу *RTL* , свидетельствующим о накоплении сейсмической энергии [6], соответствуют области с отрицательными значениями комплексного параметра – произведения отклонений эпицентральной *R*, временной *T* и энергетической *L* функций от многолетнего тренда. В расчете параметра *RTL* участвуют сейсмические события, удаленные не более чем на 2 года от расчетной даты, не более чем на 100 км от расчетной точки. Аномалия характеризуется минимальным значением параметра *RTL* за время ее существования и длительностью затишья, соответствующего интервалу времени, в течение которого значения параметра *RTL* были меньше -3.

Сейсмическое затишье по методу *Z*-функция [11] определяется как область статистически значимого ($Z > 3$) уменьшения скорости потока землетрясений, характеризуется параметром, определяющим величину различий в скоростях сейсмического потока на двух временных участках: $SRD(t) = 1\text{-}R_{dT}/R_{all}$, где R_{dT} и R_{all} – средние величины скорости потока землетрясений в скользящем временном окне *dT* (12 мес.) и за все остальное время. $SRD = 1$ соответствует сейсмическому молчанию (отсутствию землетрясений выбранного энергетического диапазона). Аномалии выявляются сканированием исследуемого района расчетными ячейками (цилиндрами) переменного радиуса от 30 до 55 км и высотой, определяемой глубиной гипоцентров, до 70 км. Область аномалии определяется пространственно-временным соседством расчетных ячеек с *SRD* не менее заданного.

Используемый подход к выявлению сейсмической активизации построен на анализе площадей сейсмогенных разрывов. Параметр *dS* рассчитывается как разница между накопленной за последний год площадью сейсмогенных разрывов в пределах круговой области радиусом 50 км и средним многолетним значением, нормированная на среднеквадратичное отклонение за все время наблюдений в данной пространственной области: $S = \frac{1}{T_{max}} \cdot \frac{1}{S_{R_{max}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} 10^{2/3 \cdot (K_i - K_0)}$. Площади разрывов *S* оцениваются по формуле, где K_i – энергетический класс текущих событий; $S_{R\max} = \pi R^2_{\max}$

– площадь рассматриваемой круговой области. В данном случае расчеты ведутся для полного (неочищенного от афтершоков) каталога. Повышенные значения *dS*, проявившиеся в окрестности *RTL*-аномалии после окончания сейсмического затишья, могут быть проинтерпретированы, согласно методике Соболева Г.А. [6], как форшоковая активизация.

Определение наклона графика повторяемости γ основано на повторяемости землетрясений как фундаментальном свойстве сейсмического процесса. Перед некоторыми сильными землетрясениями наблюдалось уменьшение величины γ [1, 2 и др.]. Наклон графика повторяемости рассчитывается по методу максимального правдоподобия [10] исходя из непрерывного экспоненциального распределения числа землетрясений по энергетическому классу или магнитуде. Вариации параметра γ оцениваются величиной статистической значимости отклонений текущих значений (γ_2) от его долговременных (фоновых) значений (γ_1), нормированных на стандартную ошибку определения этих величин: $Z_\gamma = (\gamma^2 - \gamma^1)/(\sigma_{\gamma^2}^2 + \sigma_{\gamma^1}^2)^{1/2}$. Аномальная область определяется радиусом области, землетрясения которой сформировали максимальное отклонение параметра от фоновых значений. В качестве предвестников рассматриваются вариации наклона со статистической значимостью уменьшения γ не хуже $\alpha = 0.01$ ($Z_\gamma \le -3$). Расчет величины Z_γ и построение карт Z_γ в рамках ежегодного мониторинга фоновой сейсмичности согласно методике [5] проведены при пространственном сканировании района 51°–57° с.ш. и 156°–167° в.д. с шагом $\Delta\varphi = 0.125°$ с.ш. и $\Delta\lambda = 0.25°$ в.д. цилиндрическими объемами с переменным радиусом $R \le 100$ км при фиксированном числе землетрясений N (100, 200), попадающих в элементарный цилиндрический объем.

Обсуждение результатов

В изменениях сейсмического режима перед сильными событиями неоднократно отмечалась последовательная смена аномалий сейсмического затишья и форшоковой активизации. Такая смена режима является классическим примером развития предвестников сильных землетрясений согласно представлениям авторских методик. В работе [6] и ранее отмечалось, что во время развития в области будущего разрыва стадии активизации в соседних областях проявляется затишье. Похожую картину реализации предвестников перед сильными камчатскими землетрясениями демонстрируют рис. 1–3.

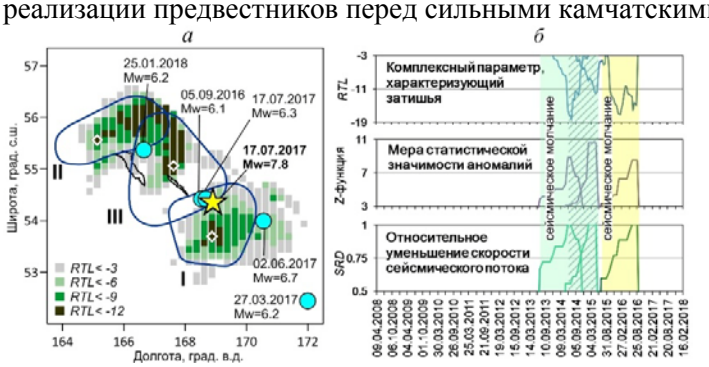


Рис. 1. Сейсмическое затишье перед Ближне-Алеутским землетрясением. *а* – карта минимальных значений *RTL* за время развития аномалий; области абсолютного сейсмического затишья по *Z*-функции (контуры). Эпицентры основного события (звезда), сильнейших форшоков и афтершока (кружки). *б* – временной ход параметров сейсмического режима, *RTL*(*t*) соответствуют характерным точкам аномалий, выделенных ромбами на карте.

Пространственное расположение сейсмических затиший, предваряющих Ближне-Алеутское землетрясение (рис. 1) согласуется с моделью БАЗ – С, предполагающей составной очаг из двух субочагов CI и CII [8]. Согласно данной модели юго-восточная аномалия I охватывает большую часть основного очага CI, а северо-западная аномалия II пространственно совпадает с субочагом CII. Локальную область (именуемой брешью), в пределах которой в первые часы после главного толчка афтершоки отсутствовали, закрывает третья аномалия, проявившаяся за 3 месяца до начала форшоковой активизации в сентябре 2016 г.

Кроме того, в течение 12 месяцев, с мая 2014 г. по май 2015 г., сейсмические затишья юго-восточной и северо-западной аномалий развивались одновременно и завершились за ~2.5 года до БАЗ. Выделяется участок временного снижения сейсмичности, где уровень сейсмического потока более чем в 8 раз ниже фонового (*SRD* > 0.875) отмечается дважды, с мая по октябрь 2014 г. и с января по август 2016 г. в пределах зоны пересечения двух аномалий I и III. Инструментальные эпицентры БАЗ и его сильнейшего афтершока находятся на пересечении аномалий сейсмических затиший, разнесенных во времени.

Аномалии вариаций площади сейсмогенных разрывов *dS* (1–4) развивались в течение года последовательно друг за другом в хронологическом порядке с задержкой 4 месяца (рис. 2).

В незатронутой увеличением площади сейсмогенных разрывов области развивались сейсмические затишья. Эпицентр сильнейшего афтершока БАЗ 25.01.2018 г. *ML*6.3 расположен на

краю сейсмических затиший, выделенных одновременно двумя методами *RTL* и *Z*-функция дважды в 2015 г. и 2016 г., пространственно расположенных между выделенными аномалиями активизаций.

Эпицентры форшоков 05.09.2016 г. *ML*6.3 и 24.11.2016 г. *ML*5.9 расположены наиболее близко к эпицентрам их главных событий БАЗ и ЗУП.

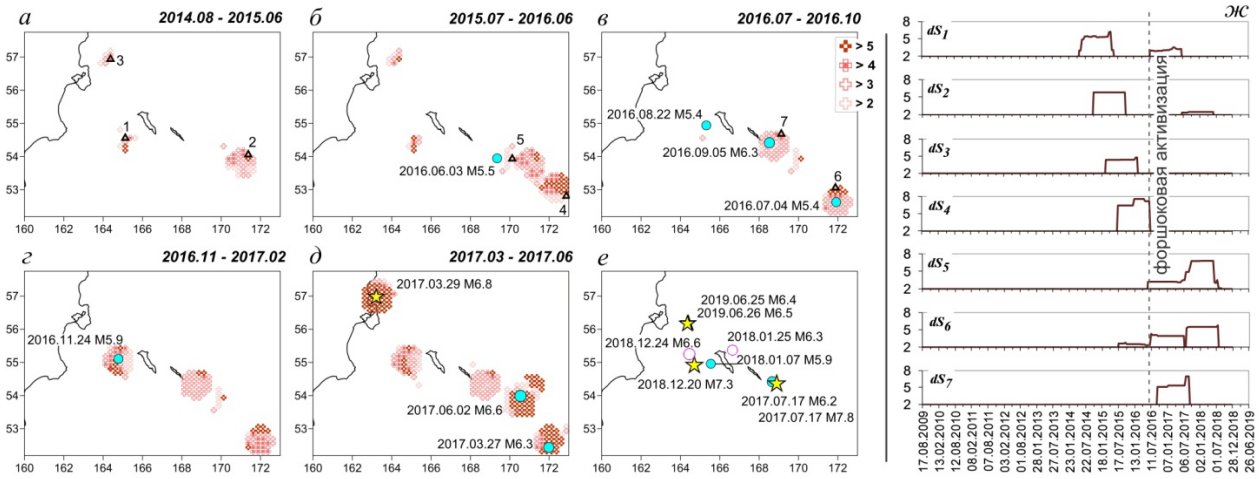


Рис. 2. Карты вариаций площади сейсмогенных разрывов *dS* перед сильными землетрясениями 2016–2019 гг. Кривые *dS*(*t*) рассчитаны для реперных точек (треугольники на карте).

Примечательно, что сильным форшокам предшествовали более слабые события с $ML > 5.0$, приуроченные к аномальным областям по параметру *dS*. Так, в течение 3 месяцев до начала проявления яркой форшоковой активизации произошли 3 события с близкими величинами по энергии: 03.06.2016 *ML*5.5 в районе сильнейшего форшока БАЗ (рис. 2 *б, д*); 04.07.2016 *ML*5.4 в районе удаленного форшока 27.03.2017 г. *ML*6.3 (рис. 2 *в, д*); 22.08.2016 *ML*5.4 перед форшоковой активизацией ЗУП, начавшейся за ~2 года до события (рис. 2 *в, г*).

Первоначально затишье появилось в северо-западном секторе в 2012 г. (рис. 3 *а*), затем на юго-восточной области (I) в 2014 г. (рис. 1), спустя 8 месяцев стало вновь развиваться северо-западное затишье (II) (рис. 1, 3 *в*). В сентябре 2015 г. сейсмическое затишье (III) (рис. 1) проявилось между I и II аномалиями, и было прервано 05.09.2016 г. форшоком БАЗ. Этому же временному интервалу соответствует и *RTL*-аномалия на границе Берингии с Охотской плитой (рис. 3 *а*).

Локальные изменения сейсмического режима в местах подготовки сильных землетрясений прослеживаются и в вариациях наклона графика повторяемости γ. Эпицентр Южно-Озерновского землетрясения (ЮОЗ) 29.03.2017 *ML*6.8 [7] расположен в пределах аномальной области γ_2 (рис. 3 *а*), где минимальные значения γ (0.33 ± 0.06 при $Z_\gamma = -3.42$) отмечены за 15 мес. до события в декабре 2015 г.

Пониженные значения наклона за 3 года до землетрясения Углового Поднятия 20.12.2018 г. *ML*7.3 были сосредоточены преимущественно севернее очаговой области ЗУП. Минимум аномалии γ_4 (0.36 ± 0.04 при $Z_\gamma = -4.59$) отмечен за 1.5 года (рис. 3 *в*) до главного события и последующего за ним сильнейшего афтершока 24.12.2018 *ML*6.6 на северо-западной периферии очага.

Временной интервал, на который приходится максимальное снижение параметра γ перед июньским дуплетом 25.06.2019 г. и 26.06.2019 г. (γ_3) совпадает с отрицательной динамикой наклона аномалии γ_4 (рис. 3 *в*), соотнесенной к ЗУП. Спустя ~3.5 года после минимальных значений γ (0.36 ± 0.05 при $Z_\gamma = -4.36$), приходящихся на февраль 2016 г., с разницей в ~17 часов в пределах аномальной области произошли оба землетрясения с магнитудами *ML*6.4–6.5. Очаговая область локализована вблизи пространства максимально глубокого проявления предвестника. Заблаговременное (1.5–3.5 года) проявление аномалий γ_3 и γ_4 между двух сейсмоактивных очагов на площади, сопоставимой с их совокупной площадью, при интенсивности $Z_\gamma > -5$ может свидетельствовать о наличие схожего процесса подготовки в сейсмическом режиме, предваряющий землетрясение Углового поднятия и июньского дуплета 2019 г.

Пример согласованного проявления аномалий по комплексу среднесрочных прогностических методик демонстрирует рисунок 3 *в*: за ~7 лет до дуплета отмечалось сейсмическое затишье, за 6 лет

значимое снижение величины наклона графика повторяемости (рис. 3 *б*), за ~4.5 лет на северной границе аномалий увеличение площади сейсмогенных разрывов. Кроме того, перед дуплетом в

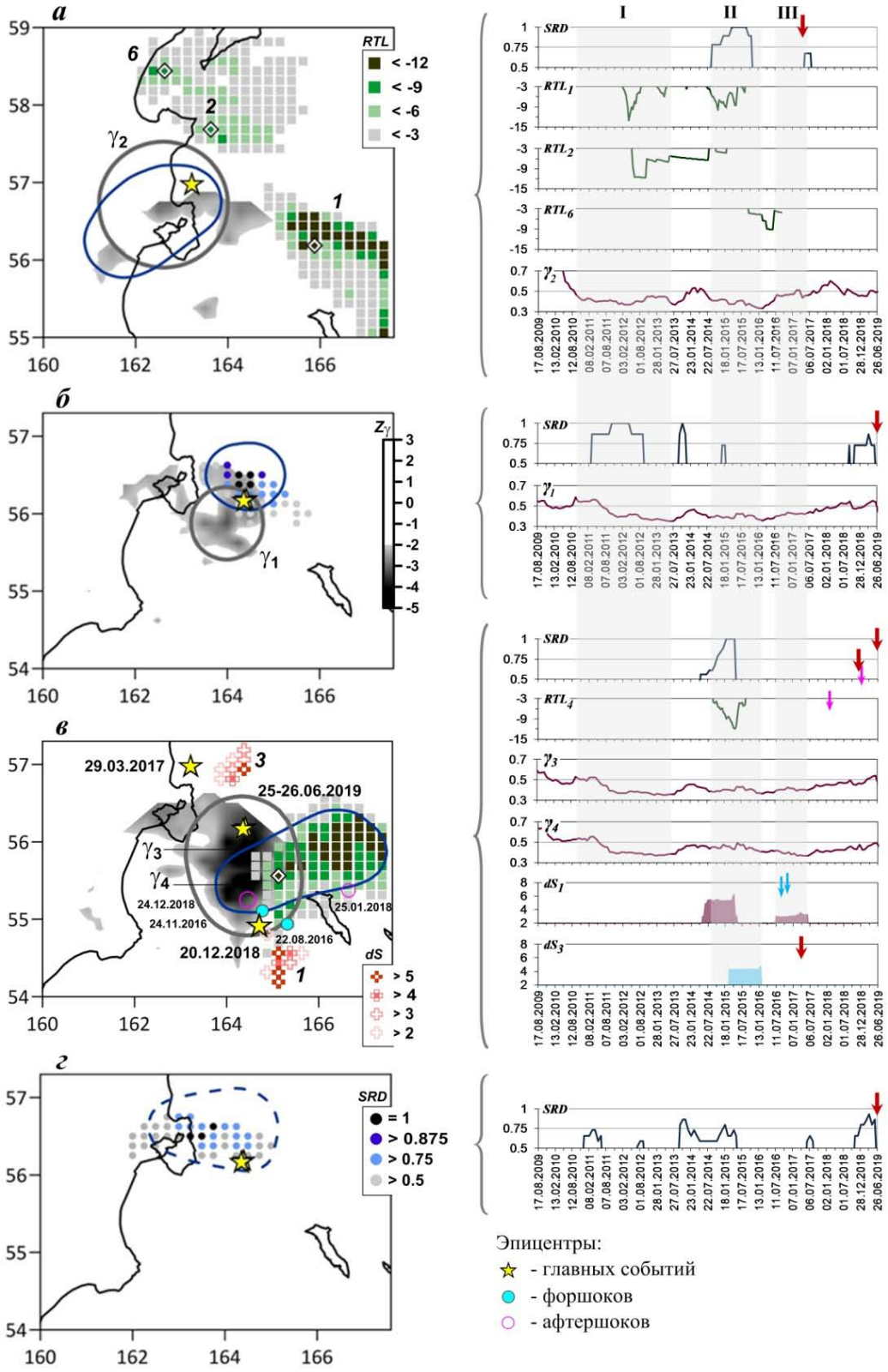


Рис. 3. Взаимное расположение аномалий сейсмического режима по комплексу среднесрочных прогностических параметров. Кривые *RTL*(*t*), *SRD*(*t*), *γ*(*t*) и *dS*(*t*) сгруппированы согласно соотнесенных землетрясениям аномалий: *а* – ЮОЗ 29.03.2017 г. *ML*6.8; *б*, *г* – дуплет 25–26.06.2019 г. *ML*6.4–6.5; *в* – ЮОЗ, ЗУП 20.12.2018 г. *ML*7.3 и дуплет. Заливкой выделены три временных блока, объединяющих проявление предвестников по времени их появления. Стрелки указывают моменты землетрясений. Карты пониженных значений γ рассчитаны в скользящих временных окнах: *б* – 4 года (2011–2014 гг.) относительно многолетних наблюдений при $N = 100$; *а*, *в* – 6 лет (2010–2015 гг.), (2011–2016 гг.) относительно удвоенного временного

интервала, предшествующего расчетному при $N = 100, 200$ соответственно; графики $\gamma(t)$ в 2-летнем временном окне с шагом 90 суток.

реальном времени выделена аномальная область сейсмического затишья по методу *Z*-функция, в пределах которой уменьшение скорости сейсмического потока в 14 раз ($SRD = 0.93$) наблюдалось в течение года и завершилось за 2 месяца до событий (рис. 3 *г*). Основная часть афтершоков ЗУП, относящихся к наибольшему кластеру, выделенного в работе [9], примыкает к аномалии пониженных значений наклона графика повторяемости Z_γ с юго-востока, при этом пространственно закрывает область проявления максимальных значений параметра *dS* на стадии форшоковой активизации [4].

Помимо этого, графики временного хода параметра γ в пределах всех аномалий сопоставимы (рис. 3 *а–в*). В III временном блоке отмечается сниженная тенденция наклона в южной части аномалии (γ_4) во время увеличения его значений на севере. В данном случае снижение наклона в течение года до 07.2017 г. вызвано увеличением числа событий с $M > 5.0$, отнесенных к форшоковой активизации ЗУП. Второй временной блок отличается схожим поведением наклона в течение 1.5 лет по 02.2016 г. во всех трех рассматриваемых зонах аномалий $Z\gamma$; за последние 8 месяцев снижение величины параметра γ происходило одновременно; за последние полгода одновременно наблюдались и повышенные значения параметра *dS* на ЮВ (характерная точка 4) и СЗ (характерная точка 3) окраинах рассматриваемой в работе территории, где сильные землетрясения 2017–2019 гг. вызывали повышение уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 [4] до высокого и экстремально высокого уровня. Данные аномалии увеличения площади сейсмогенных разрывов за ~1 год предваряли землетрясения, произошедшие с разницей в 2 суток: отдаленный форшок БАЗ 27.03.2017 *ML*6.3 и ЮОЗ 29.03.2017 *ML*6.8. А сейсмические затишья в районе Камчатского п-ова и о. Беринга, относящиеся также ко II временному интервалу, сопоставлены ЮОЗ, форшоковой активизации ЗУП и удаленному афтершоку БАЗ 25.01.2018 г.

Авторы выражают благодарность Волович О.Г. за создание компьютерной программы вычисления параметров сейсмичности.

Заключение

Заблаговременное проявление среднесрочных предвестников отмечено перед всеми сильными событиями, рассмотренными в работе. На протяжении 4 лет (2012–2016 гг.) выделяются несколько временных блоков сниженной сейсмичности и активизаций.

Линейный размер совокупной площади смежных аномалий, предваряющих серию сильных землетрясений 2016–2019 гг. в области сочленения Тихоокеанской, Северо-Американской и Евразийской литосферных плит, оценивается как ~900 км на ~250 км. Учитывая также малоглубинную (до 40 км) сейсмичность исследуемого района и риск потенциально цунамигенного землетрясения [8], требуется повышенное внимание к данному региону в связи с возможным здесь землетрясением катастрофического характера.

Наблюдающаяся пространственно-временная корреляция поведения γ с результатами *RTL*, *dS* и *Z*-функцией перед сильными камчатскими землетрясениями свидетельствует о практической важности применения такого комплексного анализа для выявления в режиме реального времени предвестниковых аномалий в развитии сейсмичности, рассматривая смежные места проявления низкой сейсмичности и активизаций в качестве возможной оценки места будущего макроразрыва.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

Список литературы

1. *Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М: Наука, 2006. 254 с.

2. *Моги К.* Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1988. 382 с.

3. *Молчан Г.М.*, *Дмитриева О.Е.* Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Современные методы обработки сейсмологических данных. Вычислительная сейсмология. Вып. 24. М.: Наука, 1991. С. 19–50.

4. *Салтыков В.А., Кравченко Н.М.* Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2017 году. Обнинск: ГС РАН, 2019. С. 84–92.

5. *Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Коновалова А.А.* Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 65–84.

6. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.

7. *Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., и др.* Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. с Mw = 6.6, Ks = 15.0, I = 6 (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 3. Вып. № 35. С. 7–21.

8. *Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., и др.* Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с Mw = 7.8. I. Протяженный разрыв вдоль Командорского блока Алеутской островной дуги по данным наблюдений на камчатке. // Физика Земли. 2019. № 4. С. 48–71.

9. *Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., Абубакиров И.Р., Дрознина С.Я., Митюшкина С.В., Павлов В.М., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К., Титков Н.Н.* Землетрясение Углового поднятия 20 декабря 2018 г. Mw = 7.3 в зоне сочленения Камчатского и Алеутского океанических желобов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 1. Вып. 45. С. 100–117.

10. *Aki K.* Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula log N=a-bM and its Confidence Limits // Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo. 1965. V. 43. P. 237–239.

11. *Wyss M., Habermann R.E.* Precursory quiescence // Pure and Applied Geophysics. 1988. V. 126. P. 319–332.

УДК 550.34

ПРЕДВЕСТНИКОВЫЕ АНОМАЛИИ СЕЙСМИЧНОСТИ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ 2020 г. В ОКРЕСТНОСТИ КРОНОЦКОГО ЗАЛИВА

Коновалова А.А., Салтыков В.А.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, seismo@emsd.ru

Введение

Пространственно-временные изменения фоновой региональной сейсмичности с прогностической целью отслеживаются Лабораторией сейсмического мониторинга КФ ФИЦ ЕГС РАН по нескольким среднесрочным прогностическим методикам [5]. В данной работе речь пойдет о вариациях наклона графика повторяемости $Z\gamma$ региональных землетрясений Камчатки как о параметре, позволяющем в режиме мониторинга выделять такие аномальные зоны.

Методика

Методика выделения предвестников основана на представлении об аномальном уменьшении наклона графика повторяемости до момента приближающегося землетрясения [1 и др.]. Наклон графика повторяемости γ определяется на основе закона Гутенберга-Рихтера и рассчитывается по методу наибольшего правдоподобия [8], исходя из экспоненциального распределения землетрясений по энергетическому классу *K*. В предлагаемом подходе выделения аномалий приоритетной является статистическая значимость изменения γ, а не его абсолютная величина [2].

Аномалия наклона графика повторяемости землетрясений определяется пространственно-временной областью значимого изменения параметра γ, выявленного с помощью *Z*-теста. В качестве предвестников рассматриваются вариации наклона со статистической значимостью уменьшения γ не хуже $\alpha = 0.01$ ($Z_\gamma \leq -3$). Ожидается, что сильное землетрясение с магнитудой $M \geq 6.0$ произойдет в пределах или на периферии аномальных областей в течение временного интервала по предварительным оценкам ~3–5 лет. Заключения передаются в Камчатский филиал экспертного совета по прогнозу землетрясений не чаще 1 раза в полугодие, поскольку данная методика достаточно инерционна. В режиме мониторинга расчет величины Z_γ проводится для площади 51°–57° с.ш. и 156°–167° в.д. при пространственном сканировании цилиндрическими объемами с переменным радиусом $R \leq 100$ км при фиксированном числе землетрясений ($N = 100, 200, 400, 800$) и высотой $H = 0$–100 км. Высота определяется глубиной гипоцентров, используемых при расчете землетрясений. За шаг сканирования сейсмоактивной области Камчатки приняты $\Delta\varphi = 0.125°$ с.ш и $\Delta\lambda = 0.25°$ в.д. Расчеты реализованы в программе вычисления параметров сейсмичности Волович О.Г.

Карты пониженных значений наклона графика повторяемости γ (рис. 1) демонстрируют площадное распределение параметра $Z_\gamma = (\gamma^{dT} - \gamma^{T}) / (\sigma^2_{\gamma^{dT}} + \sigma^2_{\gamma^{T}})^{1/2}$, характеризующего статистическую значимость изменения γ каждой аномалии. Сравниваются значения γ во временных интервалах *dT* со средними значениями (фоновыми) за период наблюдений $T > dT$. Аномальная область образована эпицентральным облаком землетрясений, которые сформировали максимальные отклонения параметра γ от фоновых значений. Временной ход значений γ рассчитан для каталога землетрясений, приходящихся на области максимального проявления Z_γ, во временных окнах, соответствующих длительности аномалий (отмечены на кривых $\gamma(t)$ штриховкой) с шагом 90 суток.

Исходный региональный каталог КФ ФИЦ ЕГС РАН с 1962 г. предварительно очищен от группированных событий с помощью программы Смирнова В.Б. (МГУ им. Ломоносова), реализующей алгоритм Молчан-Дмитриевой [4], ограничен представительным энергетическим классом $K = 8.5$ по классификации Федотова С.А. [7].

Аномалии наклона графика повторяемости

В качестве возможного предвестника сильного землетрясения в течение 2020 г. представляли интерес области γ_1–γ_{12} (рис. 1), в которых были выделены временные промежутки аномального уменьшения наклона при используемом числе землетрясений $N = 100$, за исключением $\gamma_{4\text{-}5}$ (рис. 1 *в*) – $N = 200$.

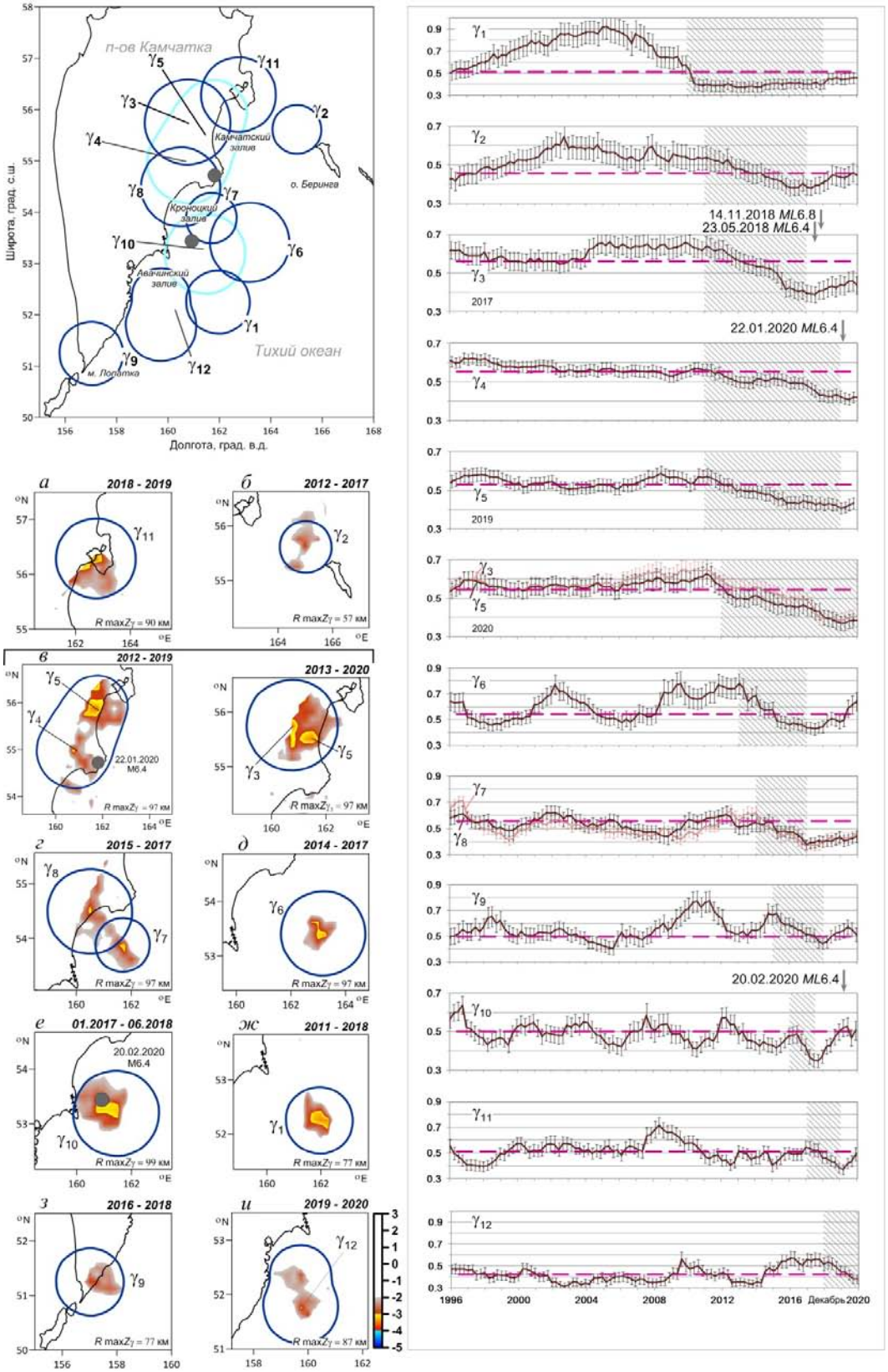


Рис. 1. Схема расположения аномальных вариаций наклона графика повторяемости γ в 2020 г. Голубым контуром обозначены области предваряющих аномалий. Карты пониженных значений наклона графика повторяемости γ, соответствующие выделенным аномалиям, за расчетные временные интервалы: *T* с 1962 г., *dT* – *а* – 2 года (2018–2019 гг.); *в* – 8 лет (2012–2019 гг.) и (2013–2020 гг.); *г* – 3 года (2015–2017 гг.); *е* – 18 месяцев (01.2017–06.2018 гг.); *б* – в течение *dT* = 6 лет (2012–2017 гг.); *д* – 4 года (2014–2017 гг.); *ж* – 8 лет (2011–2018 гг.); *з* – 3 года (2016–2018 гг.); *и* – 2 года (2019–2020 гг.) относительно значений, рассчитанных за *T* = 2*dT*, предшествующие расчетному интервалу *dT*. Уровень фона за весь анализируемый период в каждой области отмечен на графиках γ(*t*) пунктирной линией, временное окно соответствует длительности аномалий (выделена штриховкой), шаг 90 суток. Цветовой шкале соответствуют значения Z_γ, характеризующие статистическую значимость и интенсивность проявления предвестника.

В акватории напротив Кроноцкого залива в пределах области γ_6 (рис. 1 *д*) в течение 4 лет с 2014 по 2017 гг. наблюдалось снижение величины параметра γ относительно средних значений за предыдущий 8-летний временной интервал (2006–2013 гг.).

В районе Кроноцкого залива γ_7 и γ_8 (рис. 1 *г*) аномальные значения относятся к 3-летнему интервалу (2015–2017 гг.) относительно фоновых значений за весь период наблюдений. Аномальная область на побережье Кроноцкого залива γ_8 охватывает большую часть аномалии в районе Кроноцкого полуострова γ_4, предваряющей землетрясение 22.01.2020 г. *ML*6.4, где в течение 8 лет с 2012 по 2019 гг. отмечены значимые вариации наклона графика повторяемости (рис. 1 *в*, 2).

Примечательно, что кривые вариаций параметра γ во времени в пределах частично перекрывающихся аномальных областей $\gamma_{6,\,7,\,8}$ схожи, что позволяет рассматривать в качестве предвестника возможного сильного землетрясения данные области как единую аномальную зону.

На северо-западе от о. Беринга снижение величины наклона графика повторяемости отмечалось в пределах области γ_2 с 2012 года. На рис. 1 *б* представлена аномалия на момент ее развития в 2017 году, когда уменьшение γ в течение 6 лет (2012–2017 гг.) выделено на фоне средних значений за 12 предыдущих лет (2000–2011 гг.).

На побережье Камчатского залива минимальные значения аномалии γ_5 за 8-летний временной интервал 2013–2020 гг. (рис. 1 *в*) сместились относительно своего пространственного расположения, отмеченного в 2019 г. (рис.2 *д*), в область наиболее интенсивного проявления – аномалии γ_3 (рис. 2 *в*), выделенной ранее (2012–2017 гг.), где в течение 6 лет отмечалось снижение наклона относительно 12 предыдущих лет. Примечательно, что сниженные значения γ приходятся на участок аномальной области, выявленной *Z*-функцией [5, 6], где абсолютное сейсмическое затишье отмечалось с 03.2016 по 07.2017 гг. (место пересечения зон 1 и 2, рис. 2 *в*, *г*) и в течение 13 месяцев по октябрь 2019 г. (зона 3, рис. 2 *д*). Аномалия γ_3 (2017 г.) предваряла землетрясения 23.05 и 14.11.2018 г., а γ_4 (2019 г.) землетрясение 22.01.2020 г.

Для смежной с ней аномалии γ_{11} в районе Камчатского п-ова (рис. 1 *а*) уменьшение наклона отмечалось с 2018 г. в течение 2 лет относительно долговременных наблюдений.

В южной части Камчатки значимое снижение параметра γ выделено в пределах аномальных областей $\gamma_{1,\,9,\,10,\,12}$ (рис. 1 *ж*, *з*, *е*, *и*). В районе мыса Лопатка минимальные значения Z_γ не вышли на предвестниковый уровень (Z_γ = -2.94), тем не менее, в течение 3 лет (2016–2018 гг.) в пределах выделенной области γ_9 величина γ (0.45 ± 0.05) понижена относительно средних значений за 6 предыдущих лет – 0.65 ± 0.05 (рис. 1 *з*). В пределах аномальной области γ_{10}, примыкающей к Шипунскому мысу (рис. 1 *е*), 20.02.2020 г. произошло землетрясение с магнитудой *ML*6.4 (рис. 3), аномалия представляет интерес в качестве предвестника и дальше, поскольку предполагаемое время ожидания для нее не истекло.

В настоящее время обращают на себя внимание районы Кроноцкого и Авачинского заливов, объединенных уже успевшей реализоваться аномалией у Шипунского мыса, аномальные области в окрестности Камчатского залива, включая побережье и Камчатский п-ов, на юге Камчатки и северо-западной окраине о. Беринга.

Вариации сейсмичности перед землетрясениями 2020 г.

Перед двумя землетрясениями в 2020 г. с $M > 6.0$ при ретроспективном анализе вариаций наклона графика повторяемости γ выделены предваряющие их аномалии (рис. 2, 3).

22.01.2020 г. на глубине 83 км (161.85° в.д., 54.74° с.ш.) произошло землетрясение с магнитудой *ML*6.4 на Кроноцком полуострове. Перед землетрясением в течение ~10 лет наблюдались предвестниковые вариации величины параметра γ (рис. 2). Аномалия Z_γ начала развиваться в районе мыса Кроноцкий (рис. 2 *а*) – средние значения наклона в пределах указанной области составляли 0.42 ± 0.04 при фоновом значении 0.576 ± 0.017, затем охватила побережье Камчатского залива (рис. 2 *в*) – 0.40 ± 0.04 при величине γ 0.64 ± 0.04 за сравниваемый временной интервал и Кроноцкого полуострова (рис. 2 *б*). К концу 2019 г. в течение 8 лет значимое снижение величины γ (0.43 ± 0.03) относительно фоновых многолетних значений (0.555 ± 0.009) наблюдалось в области, перекрывающей выделенные ранее аномалии (рис. 2 *д*). Эпицентр землетрясения 22.01.2020 г. *ML*6.4 расположен на периферии областей аномального проявления предвестника.

Примечательно, что пространственная область временного сейсмического молчания (отсутствие землетрясений представительного класса в течение не менее года) согласно *Z*-функции [5] с 2016 г. по 2017 г. (зона 1, [5]) идентична аномальной области Z_γ (рис. 2 *б*), где снижение величины γ до значений 0.42 ± 0.03 при среднемноголетнем значении 0.541 ± 0.009 наблюдалось в

течение 6 лет (2012–2017 гг.). Параметр *SRD* определяет величину различий в скоростях сейсмического потока на двух временных участках (один – не менее года, другой – все остальное время) в пределах сейсмического затишья *Z*-аномалии. Максимально низкие значения параметра Z_γ за все время развития аномалии получены для расчетного периода 2012–2017 гг., приведенного к удвоенному временному интервалу (рис. 2 *в*), и соответствуют участку, где зона 1 и 2 пересекаются. При этом аномальная область Z_γ охватывает и область затишья *RTL*-аномалии (рис. 2 *г,* [5]), а характерная точка I расположена рядом с этим участком (минимум *RTL* – 12.2015 г., выход на фоновые значения – 08.2017 г.). Прогностический параметр *RTL* [6] определяется произведением отклонений эпицентральной *R*, временной *T* и энергетической *L* функций от многолетнего тренда. Эпицентры землетрясений в Камчатском заливе 23.05.2018 г. *ML*6.4 и 14.11.2018 г. *ML*6.8, предваряемые сейсмическими затишьями по методикам *Z*-функция и *RTL*, находятся на краю этой области. Минимальные значения γ отмечены в 2017 г. за 6 и 12 месяцев до событий соответственно. Расположение эпицентров относительно аномальной области, а также время и интенсивность проявления Z_γ указывают на предвестниковый характер аномалии.

Одновременно с сейсмическим затишьем (с ноября 2018 г. по октябрь 2019 г.) по *Z*-функции (зона 3), сосредоточенным северо-западнее эпицентра, развивалась *RTL*-аномалия, примыкающая к эпицентру с северо-востока (рис. 2 *е*). *RTL*-аномалия проявилась в Камчатском заливе в сентябре 2019 г. Ее характерная точка III расположена в пределах аномалии I (рис. 2 *г*), являющейся завершенной и реализованной в качестве предвестника перед двумя землетрясениями 2018 г. Экстремально низкие значения параметра *RTL* отмечены в сентябре и ноябре 2019 г. в характерных точках аномалии II и III соответственно. Землетрясение 22.01.2020 г. произошло на краю аномальной области спустя ~2 месяца после выхода параметра *RTL* из минимума (III); 3 месяца и 34 месяцев после завершения сейсмического затишья согласно *Z*-функции в зонах 3 и 1. В результате мониторинга по мере развития аномалии отмечены характерные точки (II и III), представляющие интерес в качестве возможного предвестника, что достаточно условно позволяет рассматривать приуроченные к ним аномальные зоны как отдельные аномалии.

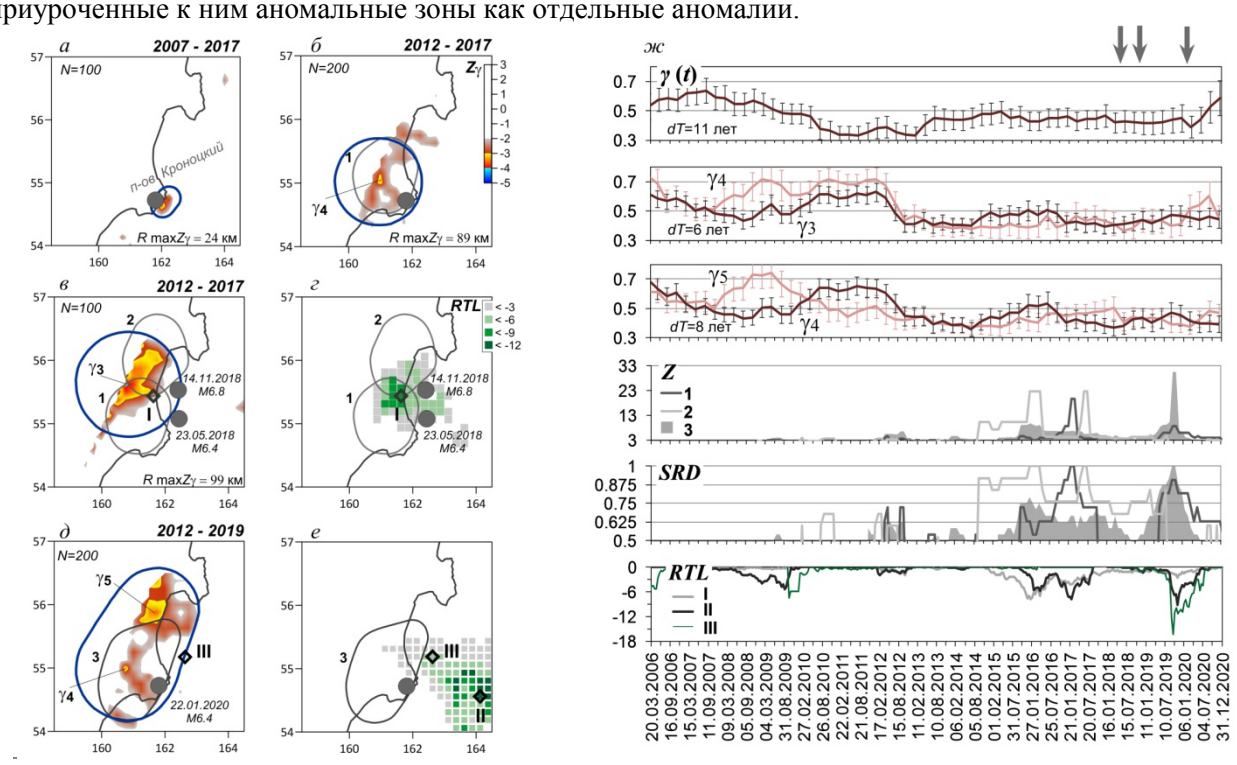


Рис. 2. Сейсмические аномалии перед землетрясением 22.01.2020 г. *ML*6.4. Области сейсмического затишья по прогностическим параметрам *RTL* и *Z*-функция: *г* – 2016–2017 гг., *е* – 2019 г. Карты пониженных значений наклона графика повторяемости γ в течение: *а* – 11 лет (2007–2017 г.); *б*, *в* – 6 лет (2012–2017 г.); *д* – 8 лет (2012–2019 гг.). Фоновые значения получены за весь период наблюдений (*а*, *б*, *д*) и за 12 предыдущих лет (*в*). *ж* – временной ход параметров сейсмического режима в скользящем окне 1 год для *Z*-функции, и 2 года с шагом 90 суток для вариаций γ, за исключением (*а*) – 4 года. На карте обозначены эпицентры землетрясений 2020 и 2018 гг. (кружки), характерные точки *RTL*-аномалии (ромбы), области сейсмического затишья по методу *Z*-функция (серые контуры), аномалий $Z\gamma$ (синие контуры). Стрелками указаны моменты землетрясений.

20.02.2020 г. на глубине 52 км (160.92° в.д., 53.44° с.ш.) произошло землетрясение с магнитудой *ML*6.4 в Кроноцком заливе. Аномалия Z_γ перед землетрясением проявилась в акватории на юге Кроноцкого залива в 2015 г. (рис. 3 *а*), где в течение 4 лет отмечалось значимое снижение величины γ относительно фоновых значений. Наиболее интенсивно аномалия Z_γ проявлялась с января 2017 г. в течение 18 месяцев (рис. 3 *б*). В июне 2018 г. наклон графика повторяемости γ достиг минимальных значений, землетрясение произошло спустя 20 месяцев в пределах области аномального проявления предвестника. Данный пример обосновывает проведение расчетов каждые 6 месяцев для отслеживания динамики локальных временных изменений сейсмического режима с прогностической целью.

Временной интервал наиболее интенсивного проявления аномалии пониженных значений наклона графика повторяемости Z_γ (рис. 3 *б*) соответствует наиболее длительному проявлению абсолютного сейсмического затишья по параметрам *Z*, *SRD*, при этом их пространственные области являются смежными. В окрестности полуострова Шипунский абсолютное сейсмическое затишье с ноября 2016 г. по январь 2019 г. является локальным продолжением аномалии, область которой охватывала восточное побережье Камчатки от Авачинского залива до Кроноцкого полуострова в течение всего 2017 г. [3]. Землетрясение 20.02.2020 г. произошло спустя 13 месяцев после завершения длительного затишья (*dT* = 27 мес.) на удалении ~30 км от края аномальной области.

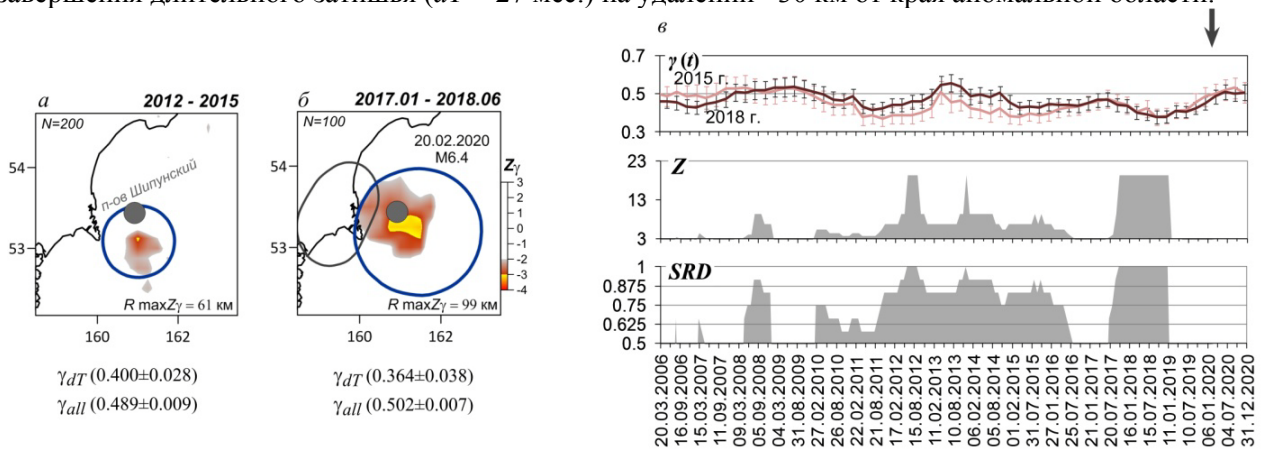


Рис. 3. Сейсмические аномалии перед землетрясением 20.02.2020 г. *ML*6.4. Область сейсмического затишья, выделенного методом *Z*-функция (11.2016–01.2019 г.). Карты пониженных значений наклона графика повторяемости γ в течение: *а* – 4 лет (2012–2015 гг.); *б* – 18 месяцев (01.2017–06.2018 гг.) относительно фоновых значений за весь анализируемый период. *в* – временной ход параметров сейсмического режима. Примечание см. на рис. 2.

Заключение

В зоне ежегодного мониторинга вариаций наклона графика повторяемости землетрясений Камчатки перед сильными событиями 2020 г. отмечены предвестники. Проведение расчетов раз в полгода также показала свою целесообразность.

Динамика развития предваряющих аномалий во времени указывает на заблаговременное (3−5 лет) изменение сейсмического режима в окрестности будущего очага.

Эпицентр землетрясения 22.01.2020 г. расположен на периферии участков, в пределах которых выделены предвестники. Наблюдается пространственное совпадение областей аномалии Z_γ и сейсмического затишья, выделенного по методу *Z*-функция, при этом характерная точка *RTL*-аномалии (III) находится на границе области Z_γ. Перед землетрясением 20.02.2020 г. значимой *RTL*-аномалии не выявлено, отмечается смежное расположение выделенных аномальных областей согласно Z_γ и *Z*-функции.

Землетрясение у полуострова Кроноцкий и севернее п-ова Шипунский можно рассматривать как соответствующие предвестнику, тем не менее, обращает на себя внимание протяженная зона в Кроноцком заливе, образованная одновременно несколькими аномальными эпизодами вкрест простирания сейсмофокальной зоны Камчатки, где отмечается уверенное снижение наклона γ относительно непродолжительного периода (*dT* = 8 лет) и многолетнего тренда.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной

научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

Список литературы

1. *Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М: Наука, 2006. 254 с.

2. *Коновалова А.А., Салтыков В.А.* Мониторинг вариаций наклона графика повторяемости землетрясений: методика и примеры // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 11–17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 235–238.

3. *Коновалова А.А.* Проявление сейсмических аномалий перед сильными землетрясениями Камчатки // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября–5октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2019. С. 227–281.

4. *Молчан Г.М.*, *Дмитриева О.Е*. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Современные методы обработки сейсмологических данных. Вычислительная сейсмология. Вып. 24. М.: Наука, 1991. С. 19–50.

5. *Салтыков В.А., Кравченко Н.М., Воропаев П.В., Коновалова А.А*. Количественный анализ сейсмичности Камчатки // Землетрясения России в 2018 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. С. 89–97.

6. *Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Коновалова А.А.* Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 65–84.

7. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.

8. *Aki K.* Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula log N=a-bM and its Confidence Limits // Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo. 1965. V. 43. P. 237–239.

УДК 556.3+550.34

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ: ОБЗОР МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПОЛУОСТРОВЕ КАМЧАТКА

Копылова Г.Н., Болдина С.В.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru

Введение

Аномальные изменения физико-химических параметров подземных вод перед землетрясениями, называются гидрогеологическими предвестниками (далее ГП). ГП обусловлены процессами подготовки землетрясений и могут использоваться для решения задач сейсмического прогнозирования, в первую очередь, для оценки времени сильных землетрясений [1, 21].

Для изучения ГП проводятся наблюдения на скважинах и источниках за вариациями давления, разгрузки, температуры и химического состава подземной воды и газов. На полуострове Камчатка такие наблюдения были начаты в 1977 г. с периодичностью наблюдений на сети скважин и источников один раз в 3–6 сут. С 1996 г. используются автоматизированные средства регистрации уровня/давления, температуры и электропроводности воды в пьезометрических скважинах Е-1, ЮЗ-5 и в самоизливающейся скважине М-1 [4].

Основной целью изучения ГП является получение достоверных данных о пространственно-временных проявлениях аномалий физико-химических параметров подземных вод перед землетрясениями для разработки методов сейсмического прогноза и создания научно-технического базиса геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае [7]. Данные о ГП также позволяют изучать процессы подготовки землетрясений и сопутствующие им явления в водонасыщенной геологической среде сейсмоактивных регионов [22].

Уникальной особенностью многолетнего эксперимента по регистрации параметров подземных вод в скважинах Камчатки является то, что эти данные используются для составления регулярных сообщений о наличии/отсутствии ГП. По данным наблюдений за вариациями уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 прогностические заключения составляются в Лаборатории геофизических исследований КФ ФИЦ ЕГС РАН под руководством Г.Н. Копыловой с 2002 г. По данным гидрогеохимических наблюдений на скважинах ГК-1, М-1 и Г-1 заключения составляются в Лаборатории гидросейсмологии КФ ФИЦ ЕГС РАН [4, 7, 12, 13, 21]. Сейсмопрогностические заключения передаются в экспертные советы по прогнозу землетрясений, действующие в Камчатском крае. Одной из функций таких советов, в частности Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС), является оценка поданных прогнозов на предмет их соответствия с произошедшими землетрясениями [12, 13].

В последние годы авторами было выполнено обобщение материалов по проявлениям ГП в изменениях уровня/давления и химического состава подземных вод по данным многолетних наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН (1977 г. – наст. время) в пяти глубоких скважинах с естественным режимом самоизлива и формирования напора [4–8, 21, 22]. Основу исследования составили данные наблюдений на скважинах, функционирующих в условиях естественного режима самоизлива и формирования напора, а также материалы ранее опубликованных работ авторов и других исследователей [11, 17, 18]. Все используемые данные находятся в базах данных в составе информационных ресурсов ФИЦ ЕГС РАН.

Выполненное обобщение позволяет рассматривать современное состояние гидрогеологического метода как потенциального элемента научно-технического базиса геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае.

Связь ГП с параметрами землетрясений

В работе рассматривались землетрясения (всего 7 событий) и предшествующие им ГП в изменениях уровня и химического состава воды, которые проявлялись не менее чем в двух наблюдательных скважинах (рис. 1). Было обнаружено, что ГП проявлялись в 2–4 скважинах в течение 1–9 мес. перед наиболее сильными землетрясениями с M_w = 6.6–7.8, которые произошли на эпицентральных расстояниях до скважин 70–320 км. Скважины, в которых проявлялись ГП,

находились в ближней и промежуточной зонах очагов землетрясений, для которых соотношение эпицентрального расстояний и максимального размера очага [10] составляло от 1 до 3.7. В г. Петропавловске-Камчатском такие землетрясения сопровождались сотрясениями с интенсивностью $I_{MSK\text{-}64}$ = 4–6 баллов[1]. В районах скважин расчетные величины удельной плотности сейсмической энергии *e* [16, 21] при таких землетрясениях составляли от 0.1 до 4.5 Дж/м^3.

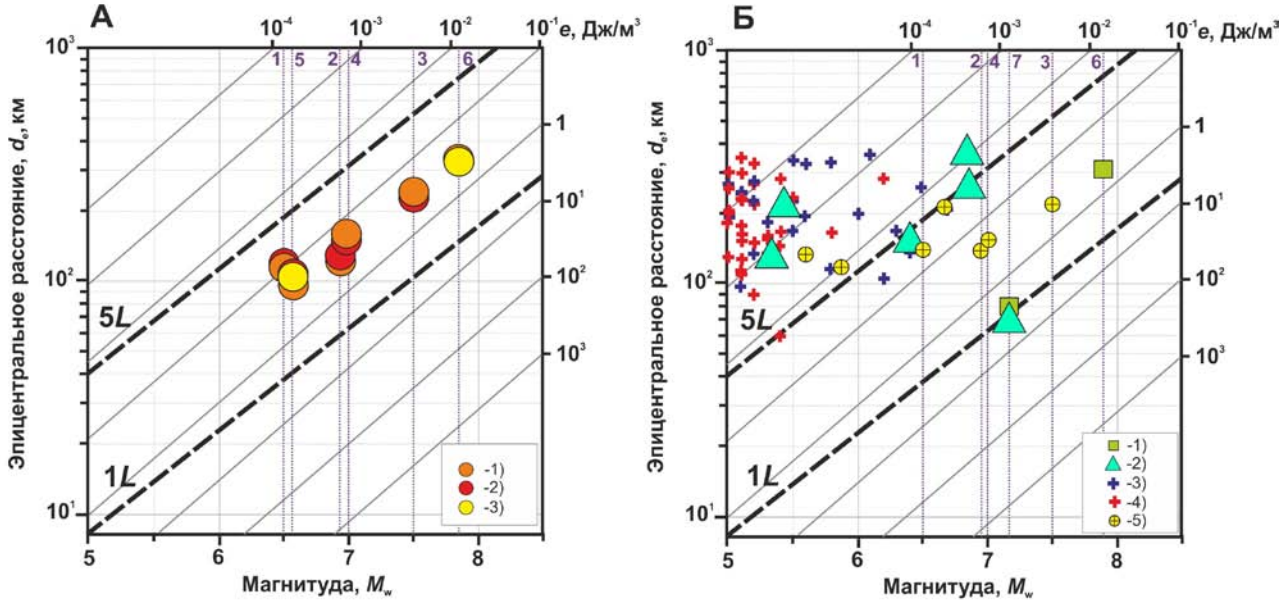


Рис. 1. Распределение гидрогеологических предвестников в наблюдательных скважинах в зависимости от магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e последующих землетрясений (показаны вертикальными линиями, номера соответствуют землетрясениям: 1 – 06.10.1987 г., M_w = 6.6; 2 – 02.03.1992 г., M_w = 6.9; 3 – 08.06.1993 г., M_w = 7.5; 4 – 13.11.1993 г., M_w = 7.0; 5 – 01.01.1996 г., M_w = 6.9; 6 – 05.12.1997 г., M_w = 7.8; 7 – 30.01.2016 г., M_w = 7.2 (эпицентральные расстояния d_e = 90 – 300 км), а также удельной плотности сейсмической энергии *e* [16, 21]: **А** – гидрогеологические предвестники в химическом составе воды в самоизливающихся скважинах: 1 – ГК-1; 2 – М-1; 3 – Г-1; **Б** – гидрогеологические предвестники в изменениях уровня воды в пьезометрических скважинах: 1 – ЮЗ-5; 2–5 – Е-1: 2 – гидрогеологические предвестники выделены в реальном времени с выдачей заключения о возможном землетрясении для КФ РЭС, 3 – гидрогеологические предвестники перед землетрясениями с $M \geq 5$, $d_e \leq 350$ км, выделенные ретроспективно, 4 – гидрогеологические предвестники перед землетрясениями с $M \geq 5$, $d_e \leq 350$ км не проявлялись, 5 – гидрогеологические предвестники перед землетрясениями 1987–1996 гг., выделенные ретроспективно [2]. Тонкими вертикальными пунктирными линиями показаны землетрясения, которым предшествовали проявления гидрогеологических предвестников в двух-четырех скважинах. Линии 1*L*, 5*L* показывают один и пять максимальных линейных размеров очага землетрясения в зависимости от величины магнитуды [10].

Время и заблаговременность проявления ГП перед землетрясениями в отдельных скважинах составляли от 1 до 9 месяцев. Таким образом, оперативная диагностика ГП дает возможность их использования, в комплексе с другими сейсмопрогностическими данными, для осуществления средне-краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений.

Результаты анализа ГП в пяти наблюдательных скважинах Петропавловск-Камчатского полигона также показали, что все скважины являются информативными для обнаружения ГП перед сильными землетрясениями при условии обеспечения их естественного режима, не нарушенного техногенными воздействиями.

О повышенной чувствительности скважины Е-1 к процессам подготовки землетрясений и вулканических активизаций

Скважина Е-1 расположена в 12 и 25 км от действующих вулканов Корякского и Авача вблизи области расположения их магматических очагов [19]. Для нее характерна повышенная чувствительность к процессам подготовки землетрясений на расстояниях до 350 км. В скв. Е-1 ГП

[1] Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: Изд-во МГК АН СССР, 1965. 11 с.

проявлялись как перед сильными ($M_w \geq 6.6$), так и перед средними по силе землетрясениями ($M_w = 5–6.5$) [2–5, 21]. При этом степень связи проявлений ГП перед землетрясениями увеличивается с ростом величины магнитуды: ГП проявляются примерно в 50 % случаев перед событиями с $M_w = 5–6.5$ и в 100 % случаев перед землетрясениями с $M_w = 6.6–7.8$ (см. рис. 1, Б).

По данным наблюдений в скважине Е-1 в режиме реального времени были выделены ГП с выдачей заблаговременных прогнозов шести землетрясений 2001–2016 гг. с $M_w = 5.3–7.2$ (рис. 1, Б). По заключениям КФ РЭС эти прогнозы были признаны оправдавшимися по времени, местоположению и величине магнитуды ожидаемых сейсмических событий [12–15].

За время наблюдений на скважине Е-1 с 1987 г. трижды происходили активизации ближних вулканов, в том числе эксплозивно-эффузивное извержение вулкана Авача в январе 1991 г., гидротермально-магматическое извержение Корякского вулкана в декабре 2008 и 2009 г., а также усиление сейсмичности и фумарольной деятельности вулкана Авача в октябре 2019 – марте 2020 г. [2, 3, 5–7, 9, 20]. В каждом случае перед такими активизациями наблюдалось повышение уровня воды в течение первых лет, показывающее рост давления подземной воды с амплитудами 0.045–0.122 бар (таблица 1).

В качестве причины роста давления рассматривались два гипотетических механизма, инициированных движением гидротермально-магматического флюида: за счет квазиупругой деформации объемного сжатия водовмещающих пород [3] и за счет увеличения газовой разгрузки в ствол скважины [20].

Таблица 1. Параметры трендов повышения давления подземной воды в скважине Е-1 в связи с извержениями и активизациями вулканов Авачинской группы

Время развития тренда повышения уровня; годы, месяцы (сутки)	**Амплитуда повышения уровня, м / средняя скорость повышения, см/сут**	**Амплитуда роста давления подземной воды, бар**	**Объемная деформация сжатия водовмещающих пород $\Delta\varepsilon$, 10^{-6} / скорость, сут$^{-1}$**
Эксплозивно-эффузивное извержение влк. Авачинский 12–26 января 1991 г.			
янв. 1987 – янв. 1991 гг., 3 года 1 мес. (≥1125 сут)	≥ 0.45 / 0.04	≥ 0.045	≥ 3.0 / $2.7\cdot10^{-9}$
Гидротермально-магматическое извержение влк. Корякский в декабре 2008-2009 гг.			
июнь 2006 – дек. 2009 гг., 3 года 6 мес. (1260 сут)	1.22 / 0.10	0.122	8.1 / $6.4\cdot10^{-9}$
Повышение уровня воды с 15 июня 2018 г. – по 14 июля 2021 г.: активизация влк. Авача в октябре 2019 – марте 2020 гг (?)			
Июнь 2018 – июль 2021 гг. 3 года 1 мес. (1126 сут)	0.83 / 0.07	0.083	5.5 / $4.9\cdot10^{-9}$

Заключение

Созданная в КФ ФИЦ ЕГС РАН техническая и информационная инфраструктура наблюдений на скважинах Петропавловск-Камчатского полигона обеспечивает получение, обработку и оперативный анализ данных с выделением ГП в режиме, близком к реальному времени.

Установленные связи проявлений ГП в нескольких скважинах с параметрами наиболее сильных землетрясений совместно с оценками их воздействия в районах наблюдений, а также результаты использования ГП в практике работы экспертных советов по прогнозу землетрясений, составляют научно-технический базис для включения гидрогеологического метода скважинных наблюдений в разработку геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае.

Скважина Е-1, расположенная вблизи действующих вулканов Авачинской группы, также может использоваться для мониторинга вулканической активности и прогнозирования вулканических извержений.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Киссин И.Г., Пиннекер Е.В., Ясько В.Г.* Подземная гидросфера и сейсмические процессы / Основы гидрогеологии. Т. 4. Геологическая деятельность и история воды в земных недрах. Новосибирск: Наука, 1982. С. 57–78.

2. *Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39–52.

3. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Восточная Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008–2009 гг. и сильными ($M \geq 5$) землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 41–54.

4. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977 – 2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20. https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-20.

5. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки: монография. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2019. 144 с.

6. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Изменения давления подземных вод при магматической активизации: на примере скважины Е-1, полуостров Камчатка, Россия // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа (Geothermal Volcanology Workshop 2020): материалы Всерос. науч. конф. с междунар. уч. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 87–90.

7. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Гидрогеологические предвестники землетрясений и вулканических активизаций по данным наблюдений в скважинах полуострова Камчатка // Науки о Земле и недропользование.2021. Т. 44. № 2. С. 141–150. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-141-150.

8. *Копылова Г.Н., Гусева Н.В, Копылова Ю.Г., Болдина С.В.* Химический состав подземных вод режимных водопроявлений Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка: типизация и эффекты сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2018. № 4. С. 43–62.

9. *Копылова Г.Н., Болдина С.В., Чубарова Е.Г.* Проявление активизаций вулканов Авачинской группы в изменениях уровня воды в скважине Е-1 // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы XXIII ежегодной науч. конф., посвящ. Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 99–102.

10. *Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений: сб. стат. / отв. ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1976. С. 9–27.

11. *Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 96–112.

12. *Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.

13. *Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Опыт выявления предвестников сильных ($M \geq 6.0$) землетрясений на Камчатке в 1998–2011 гг. по материалам КФ РЭС // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 85–95.

14. *Чебров В.Н., Абубакиров И.Р., Богданов В.В., Болдина С.В., Бусс Ю.Ю., Власов Ю.А. и др.* Сильные камчатские землетрясения 2013 года / под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. 252 с.

15. *Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Дрознина С.Я., Иванова Е.И., Матвеенко Е.А. и др.* Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_s = 15.7$, $M_w = 7.2$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Науки о Земле. 2016. Вып. 29. № 1. С. 5–16.

16. *Wang C.-Y.* Liquefaction beyond the near field // Seismological Research Letters. 2007. V. 78. Iss. 5. P. 512–517.

17. *Biagi P.F., Ermini A., Kingsley S.P., Khatkevich Y.M., Gordeev E.I.* Groundwater ion content precursors of strong earthquakes in Kamchatka (Russia) // Pure and Applied Geophysics. 2000. V. 157. P. 1359–1377.

18. *Biagi P.F., Ermini A., Cozzi E., Khatkevich Y.M., Gordeev E.I.* Hydrochemical precursors in Kamchatka (Russia) related to the strongest earthquakes in 1988–1997 // Natural Hazards. 2000. V. 21. P. 263–276.

19. *Bushenkova, N., Koulakov, I., Senyukov, S., Gordeev, E. I., Huang, H. H., El Khrepy, S., & Al Arifi, N.* Tomographic images of magmachambers beneath the Avacha and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2019. 124. 9694–9713.

20. *Kiryukhin A., Voronin P., Zhuravlev N., Kopylova G.* Water-methane geothermal reservoirs in a south-west foothills of Koryaksky volcano, Kamchatka // Proceedings, 46th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University. Stanford, 2021. P. 320–325.

21. *Kopylova G., Boldina S.* Hydrogeological earthquake precursors: a cas e study from the Kamchatka peninsula // Frontiers in Earth Science. 2020. V. 8. P. 576017. https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017.

22. *Kopylova, G.; Boldina, S.* Preseismic Groundwater Ion Content Variations: Observational Data in Flowing Wells of the Kamchatka Peninsula and Conceptual Model // Minerals. 2021. 11. 731. https://doi.org/10.3390/min11070731.

УДК 550.34

ОТРАЖЕНИЕ ПОДГОТОВКИ СЕВЕРО-КУРИЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 25.03.2020 И РАЗВИТИЯ ЕГО АФТЕРШОКОВОГО ПРОЦЕССА В ПАРАМЕТРЕ V_P/V_S

Кучай М.С., Славина Л.Б.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия
kuchay@ifz.ru

Введение

Землетрясение 25 марта 2020 г, $M_L = 7.6$, $M_w = 7.5$ произошло на Тихоокеанской плите, юго-восточнее Камчатского мыса Лопатка, к востоку от Северных Курильских островов – Парамушир, Онекотан. Это область так называемого перегиба плиты – начала погружения Тихоокеанской плиты под Камчатку, начала формирования погружающегося фокального слоя – слоя субдукции.

Землетрясение привлекло внимание ряда исследователей [1].

Наблюдения за поведением параметра V_P/V_S для Камчатской фокальной зоны производится длительное время и носит регулярный характер. Ведется мониторинг параметра в режиме близком к реальному времени, по ежедневно получаемым данным из КФ ФИЦ ЕГС РАН в ИФЗ РАН. В последние годы в области погружения Тихоокеанской плиты под Камчатку (области перегиба), наблюдается сейсмическая активизация. Так, на СВ, в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг, 20 декабря 2018 г. произошло сильное землетрясение ($M_w = 7.3$), названное землетрясением «Углового поднятия», афтершоки которого продолжаются до сего дня. Параметр отношение скоростей – V_P/V_S определяется упругими свойствами среды и может быть выражен через коэффициенты Ламе μ, λ. Когда упругие параметры Ламе μ, λ равны, V_P/V_S равно корню из 3, т.е. ~1.73. Значения равные 1.73 ± 0.05 считались нормальными для исследуемой геологической среды. Появление пониженных и повышенных значений свидетельствуют об изменении состояния геологической среды, состава, физических параметров – температуры, давления, а также напряженного состояния. Пониженные значения указывают на развитие процессов растяжения, дилатансии в среде, повышенные – на процесс сжатия, компакции [5, 6, 12]. Параметр V_P/V_S рассчитывается по данным времен пробега *P*- и *S*-волн, и их разности *S*-*P* от землетрясений, зарегистрированных сетью телеметрических сейсмических станций КФ ФИЦ ЕГС РАН. Анализ распределения параметра рассматривался за длительный период времени, с 2009 г. по июнь 2020 г.

Единичные значения параметра рассчитываются аналитически по формуле:

$$V_P/V_S = T_{S\text{-}P} / (T_P - t_0) + 1,$$

где $T_{S–P}$ – разность времен вступлений *P*- и *S*-волн на конкретной станции от *i*-ого землетрясения, T_0 – время в очаге, T_P – время вступления *P*-волны, соответственно $T_P - T_0$ – время пробега *P*-волны. Затем для каждого события рассчитывались осредненные по группе станций значения параметра V_P/V_S. Полученное значение приписывается положению гипоцентра. Таким образом, можно изучать пространственно-временное распределение указанного параметра и делать заключения о напряженно-деформированном состоянии геологической среды [16]. В работе строились карты пространственно-временного распределения афтершоков, вертикальные разрезы в плоскости XZ, при этом значения параметра V_P/V_S кодировались цветом.

Геолого-геофизическая характеристика района возникновения землетрясения

В сейсмотектоническом плане область возникновения землетрясения 25 марта 2020 г. достаточно сложно построена. Это район сочленения погружающейся Тихоокеанской плиты с Южным сегментом Камчатской фокальной зоны и фокальной зоной Курильской островной дуги, с образованием глубоководного желоба. Район исследования с положением главного толчка землетрясения показан на рис. 1.

Можно видеть, что в фокальном слое, при погружении под Камчатку, вдоль материкового склона желоба, вдоль восточных полуостровов Камчатки наблюдаются пониженные значения параметра V_P/V_S. Пониженные значения также наблюдаются на океаническом склоне, в области перегиба Тихоокеанской плиты, включая очаговую область землетрясения «Углового поднятия» на северо-западе плиты. Анализ распределения параметра V_P/V_S при подготовке землетрясения «Углового поднятия» и развитии его афтершокового процесса приведен в работе Кучая М.С. [9]. В районе очага землетрясения 25.03.2020 наблюдается смена знака параметра с пониженных значений

на повышенные. Это явление можно наблюдать как для очагов слабых региональных землетрясений, так и осредненного поля. Исследования рельефа дна и строения верхней части разреза, осадков и коры, на Тихоокеанской плите и вдоль берегов Камчатки проводились методом Непрерывного сейсмического профилирования (НСП).

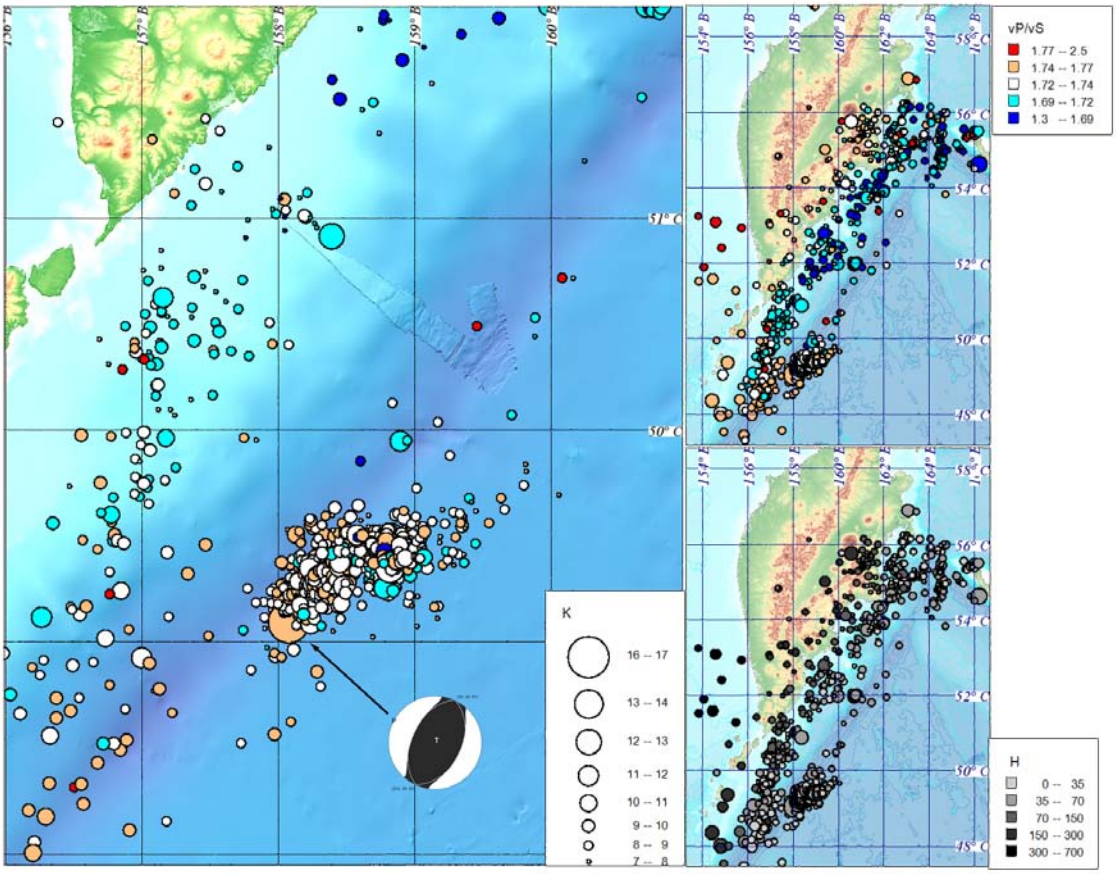


Рис. 1. Карты района и положение очаговой области землетрясения 25.03.2020. Показаны распределения региональных землетрясений по глубине: а) – по параметру V_P/V_S; б) – зарегистрированных КФ ФИЦ ЕГС в Камчатской фокальной зоне за период 30 дней. Раскраска очагов землетрясений по V_P/V_S и глубине согласно условным обозначениям. Механизм очага по данным NEIC.

Результаты и схема отработанных профилей изложены в работах Селиверстова Н.И. [13–15]. На рис. 2 показан разрез по профилю 6, отработанному вблизи очаговой зоны землетрясения.

Землетрясение приурочено к одной из ступеней характерных для этого участка погружающейся Тихоокеанской плиты. Наблюдаемые нами пониженные значения параметра V_P/V_S, свидетельствующие о процессе растяжения – дилатансии в районе возникновения землетрясения подтверждают предположение о наличии раздвигов и раскрытии пор в зонах трещиноватости, высказанные в работах [7, 10, 11]. Наличие «склонов растяжения» Селиверстов Н.И. не связывает с отсутствием обстановки горизонтального сжатия вкрест соответствующих участков дуги. Видимо, этого сжатия недостаточно, чтобы обеспечить изгиб «каменной лестницы» литосферных блоков в обратном направлении, как это предполагается для «склонов сжатия».

Механизм землетрясения 25.03.2020 по данным NEIC, (приведенный на рис. 1) – взброс – соответствует описанной выше «обратной» ступени, с признаками растяжения. Азимут оси растяжения T – 81° т.е. в направлении на СВ, вдоль краевого вала погружения плиты, (вал Зенкевича). Угол падения 88°. Ось сжатия P – вкрест желоба, азимут 292°, угол падения 2°, т.е. почти горизонтально. Развитие афтершокового процесса, рассмотренный ниже, подтверждает полученный механизм.

Поведение параметра V_P/V_S в области «перегиба» Тихоокеанской плиты, ее океанического борта, так и в области погружения фокального слоя под Камчатку, под материковый борт желоба, можно видеть на рис. 3. Пониженные значения параметра, в основном, наблюдаются в районе Камчатских полуостровов, т.е. в погружающемся фокальном слое со стороны материкового склона желоба. Характер распределения параметра в области взаимодействия плит Тихоокеанской, Охотоморской и Курило-Камчатской островной дуги заслуживает более пристального внимания.

Рассмотрено распределения параметра V_P/V_S за длительный период времени, с 2009 г. по 25.03.2020 г. (до землетрясения). Период времени ограничен имеющимися данными региональных землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН. Построено распределение параметра в зоне сейсмической активизации области перехода от Тихоокеанской плиты к Курильскому о-ву Парамушир, по площади, по глубине на разрезе, секущем область перехода вкрест простирания дуги (рис. 3). Рассматривались землетрясения с энергетического класса $K_S \geq 7$ (окраска эпицентров по параметру V_P/V_S). На рис. 3, во врезке квадратом показана область, к которой относится карта распределения параметра по площади. Разрез демонстрирует положение и наклон фокального слоя. Также показан профиль глубин погружения дна Тихого океана, подъем к Курильской островной дуге, о-ву Парамушир и погружение в Охотское море.

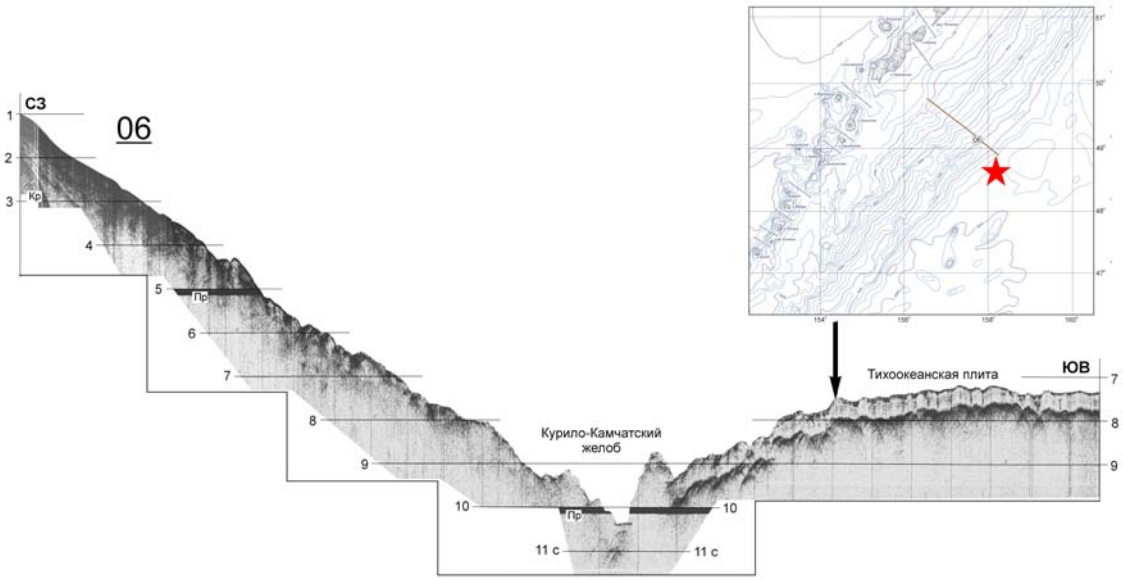


Рис. 2. Акустический разрез методом непрерывного сейсмического профилирования (НСП) в районе юга Камчатки и Северных Курильских о-вов. Стрелкой показано положение Главного толчка землетрясения 25.03.2020, (на разрезах показано удвоенное время, в секундах, скорость распространения волны ~1.8 км/с).

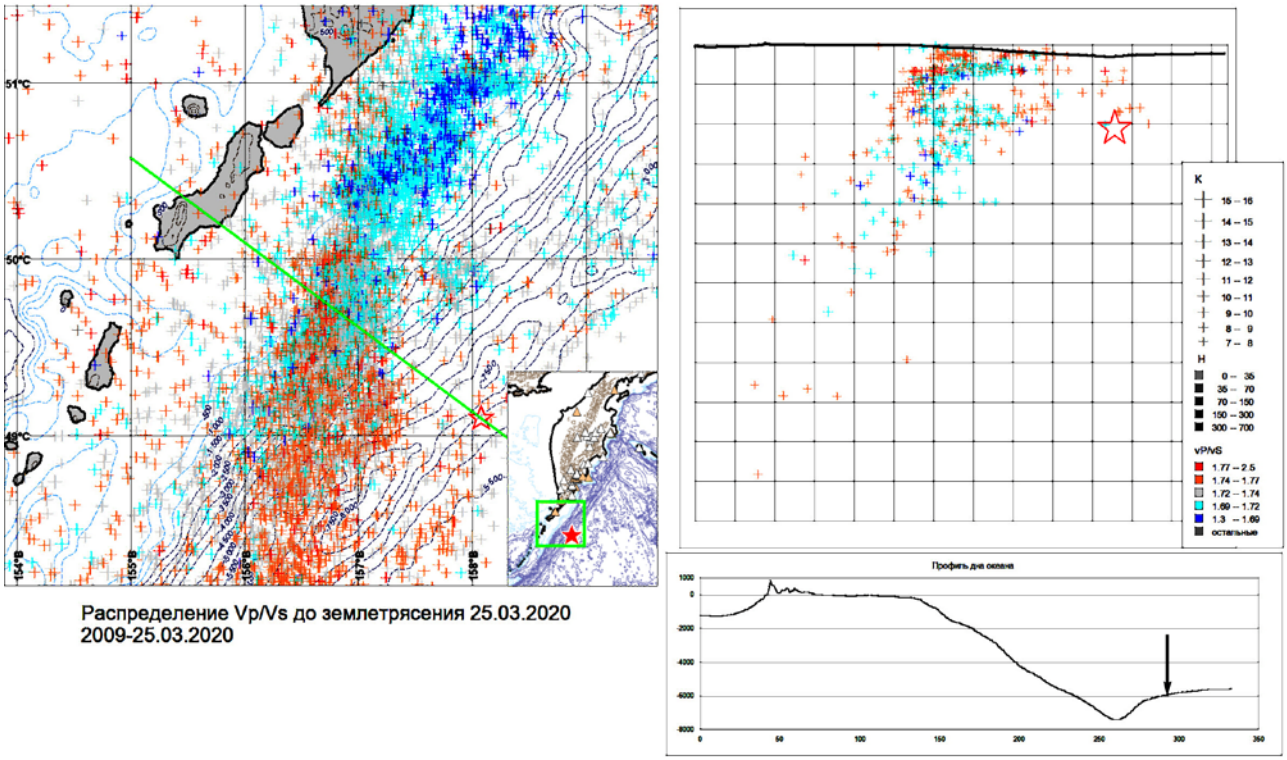


Рис. 3. Распределение землетрясений за период времени 2009 г.–25.03.2020 г. (до землетрясения) области перехода от Тихоокеанской плиты к Курильскому о-ву Парамушир и Охотоморской плите, с окраской в соответствии со значениями параметра V_P/V_S по площади. На разрезе – по глубине, секущем вкрест простирания зон сейсмической активизации (шаг сетки на разрезе 25 км). Данные КФ ФИЦ ЕГС РАН. Показан профиль глубин дна океана в изобатах. Положение главного толчка показано звездами и стрелкой.

Поле параметра V_P/V_S за длительный период времени так же показывает, что в этой сложно построенной в тектоническом отношении области наблюдается смена знака параметра с пониженных значений на повышенные. Сильное землетрясение произошло в градиентной зоне, «смены знака» параметра от пониженных значений к слабо повышенным значениям. Рассмотрим развитие очагового процесса распределения афтершоков во времени по глубине по параметру V_P/V_S. Распределение показано на приведенных ниже рисунках (рис. 4).

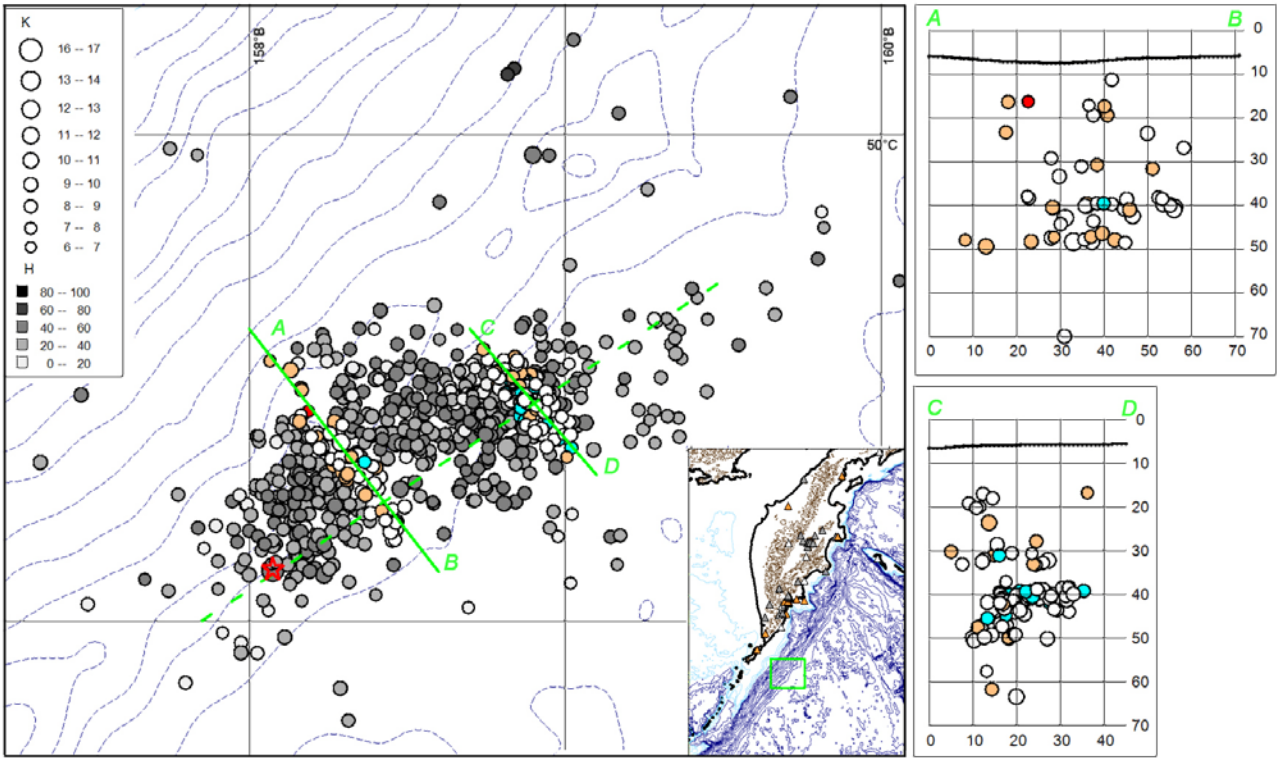


Рис. 4. Карта распределения афтершоков по глубине в очаговой области. Разрезы вкрест распределения афтершоков, окраска гипоцентров на разрезах в соответствии с параметром V_P/V_S (см. условные обозначения рис. 3, 6).

На приведенной карте и разрезах вкрест простирания очаговой области можно видеть, что афтершоки развивались по разрыву ЮЗ-СВ простирания (см. также механизм очага рис. 1). Длина разрыва порядка 90–100 км, что соответствует указанной магнитуде. Интерес представляет тот факт, что разрыв, судя по афтершокам, распространялся только в одном направлении от главного толчка, на СВ вдоль области сгиба плиты. Окраска гипоцентров в соответствии с глубиной (рис. 4а) свидетельствует о приуроченности афтершоков в основном к слою 20–50 км. Построены разрезы, пересекающие очаговую область вкрест простирания афтершоков в средней части (профиль АВ) и в СВ части (профиль CD). На разрезах также можно видеть распределение по глубине. На СЗ конце профиля глубины от ~15–20 км, далее небольшой наклон в ЮВ направлении, заглубление до 50–60 км, т.е. вглубь Тихоокеанской плиты. Параметр слабо повышенный. На СВ профиле CD есть пониженные значения. Рассматривая распределение афтершоков в течение трех суток, можно утверждать, что разрыв сформировался в первые сутки в слое, на глубинах 30–50 км. В дальнейшем происходило заполнение очаговой области афтершоками, при некотором всплывании афтершоков по глубине. Окраска по параметру сохранялась. На северо-восточном крыле разлома преобладали пониженные значения, т.е. растяжение. На ЮЗ крыле слабо положительные значения, т.е. сжатие. Уместно рассмотреть положение очаговой области исследуемого землетрясения и строение геологической среды на стыке таких значимых структур в тектоническом плане по данным работ методом Глубинного сейсмического зондирования ГСЗ [3, 4]. Методом ГСЗ в этом районе были отработаны длинные профиля 7-ОС – Тихоокеанская плита – Камчатка, и 9-0 в направлении Тихоокеанская плита – Северные Курильские о-ва.

На разрезе показаны выделенные по ГСЗ горизонты и границы в коре и мантии, граница Мохоровичича – М, астеносферный слой пониженных скоростей. Указаны скорости распространения волн по данным ГСЗ и полученные по данным землетрясений. Погружающийся фокальный слой с землетрясениями, условно выделена очаговая область главного толчка и афтершоков. В соответствии

с данными КФ и NEIC очаг землетрясения располагается на глубинах ~30–50 км, т.е. в соответствии с данными ГСЗ, приведенными на рис. 5, на границе «коромантийного» слоя и астеносферы.

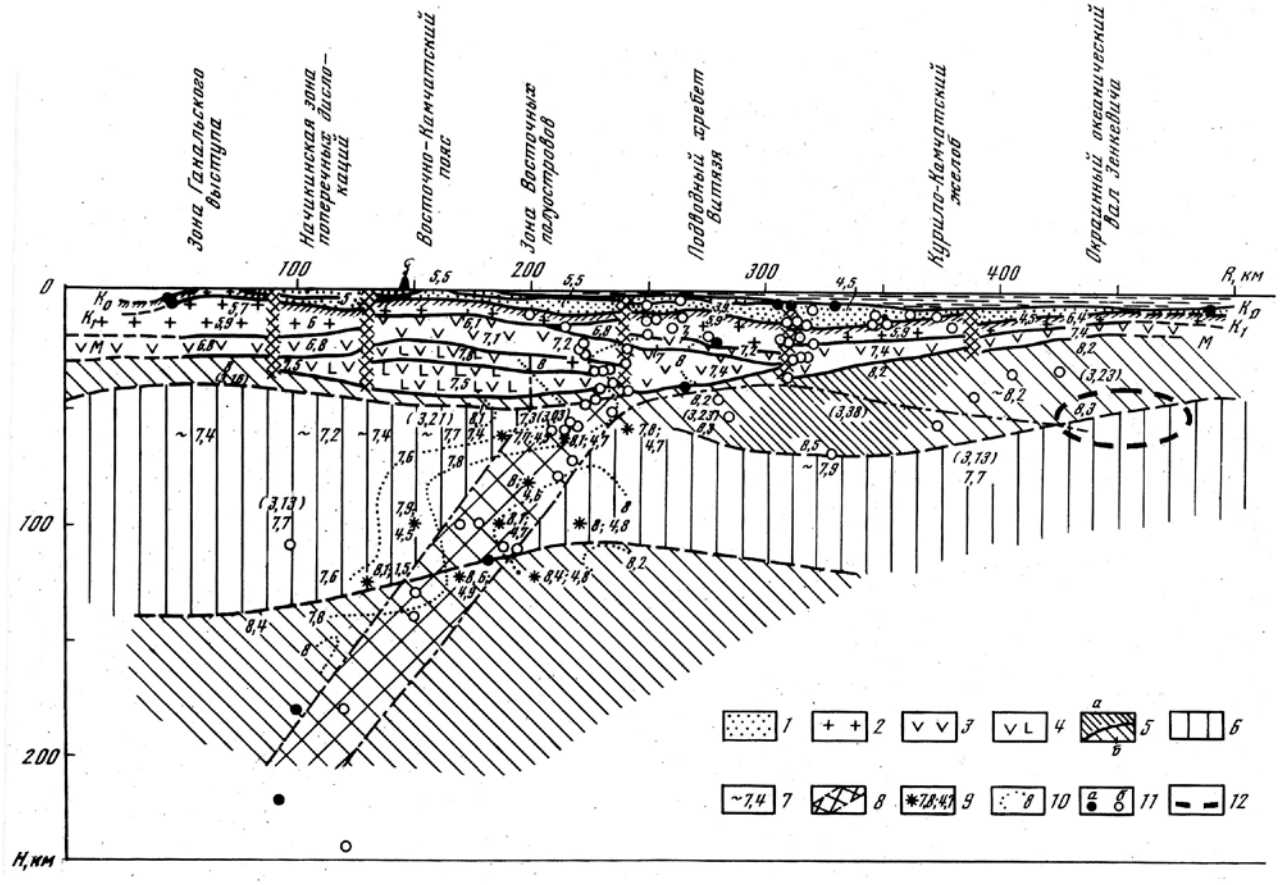


Рис. 5. Обобщенный разрез строения среды по профилю в зоне перехода от южной Камчатки к Тихому океану по геолого-геофизическим данным [3]: *1* – осадочный слой; *2* – гранитный слой; *3* – базальтовый слой; *4* – переходный коромантийный слой; *5* – верхняя мантия: *а*) над астеносфермным слоем, *б*)-ниже астеносферного слоя; *6* – астеносферный слой; *7* – скорости [17]; *8* – сейсмофокальная зона [8]; *9* – скорости продольных и поперечных волн [8]; *10* – изолинии скоростей [2]; *11* – гипоцнтры землетрясений в плоскости разреза; *12* – очаговая область землетрясения 25.03.2020 (условно показана пунктирным овалом).

Значения скорости V_P в мантии в пределах 8.2 км/с, в астеносфере – пониженные скорости до 7.4–7.7 км/с. Плотности в мантии – 3.2–3.3, в астеносфере – 3.13. Геофизические характеристики, приведенные на разрезе на рис. 5, свидетельствуют о сложном физическом состоянии геологической среды, где произошли два сильных события – исследуемое в настоящей работе землетрясение и произошедшее ранее, на Тихоокеанской плите землетрясение Углового поднятия, очаг которого также располагается в слое на глубинах 30–60 км. Афтершоки с пониженными значениями V_P/V_S последнего, наблюдаются до сих пор. Положение очаговых зон на границе сред с различным упруго динамическим состоянием, может быть, в какой-то степени объясняет пониженные значения V_P/V_S, свидетельствующие о процессе дилатансии – растяжения в этом слое.

Заключение

Регулярность мониторинга параметра V_P/V_S для Камчатской фокальной зоны позволило нам оценить поведение параметра и выявить его особенности в области контакта Тихоокеанской плиты с континентальным склоном Камчатки, фокальным слоем – слоем субдукции, погружающимся под Камчатку. Для области перегиба плиты вдоль Камчатки характерны пониженные значения отношения V_P/V_S, что свидетельствует о растяжении вдоль плиты. Очаг возник на участке сочленения погружающейся Тихоокеанской плиты под южное окончание Камчатки и Северные Курильские острова и Охотоморскую плиту. На этом участке наблюдается резкая смена аномальных значений параметра с пониженных значений на повышенные, характерные для процесса сжатия. Исследования позволили оценить возможные области растяжения и сжатия геологической среды. Результаты работ по методу ГСЗ и НСП, имевшие место в этом районе ранее, позволили уточнить особенности

строения среды, района возникновения землетрясения. Землетрясение произошло на границе мантийного слоя и астеносферного слоя пониженных скоростей и плотности. Наблюдаемые пониженные значения параметра V_P/V_S, вероятно, связаны и объясняются сложными геодинамическими условиями на границе сред. Обнаружено изменение характера поля параметра с пониженных значений на повышенные в области контакта и сочленения плит – Тихоокеанской, Охотоморской и фокальных зон субдукции Камчатской и Курильской. Приведенные результаты свидетельствуют об информативности параметра, он может рассматриваться как маркер напряженного состояния среды, в том числе Тихоокеанской плиты в области ее изгиба перед вхождением в зону субдукции.

Список литературы

1. *Акопян С.Ц.* Выявление особенностей сильного землетрясения к востоку от Курильских островов 25 марта 2020 г. на основе метода сейсмической энтропии // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 2. С. 5–18.

2. *Аниконов Ю.Е., Пивоварова Н.Б., Славина Л.Б.* Трехмерное поле скоростей фокальной зоны Камчатки // Математические проблемы геофизики. 1972. Вып. 5, Ч. 1. С.92–117.

3. *Аносов Г.И., Бикенина С.К., Попов А.А., Сергеев К.Ф. и др*. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука, 1978. 130 с.

4. *Балеста С.Т.* Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 135с.

5. *Гарагаш И.А.* О хрупком разрушении упругих тел с большим числом трещин. В кн.: Механика тектонических процессов. Алма-Ата: Наука, 1983. С. 61–74.

6. *Гарагаш И.А., Хайдаров М.С.* Модель развития сейсмического процесса в зоне тектонического разлома перед сильным землетрясением // Сейсмологические исследования. 1989. № 11. С. 88–97.

7. *Каракин А.В., Лобковский Л.И., Николаевский В.Н.* Образование серпентинитового слоя океанической коры и некоторые геолого-геофизические явления // Докл. АН СССР. 1982. Т. 265. № 3. С. 572–576.

8. *Кузин И.П.* Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М.: Наука, 1974.

9. *Кучай М. С., Славина Л. Б., Чебров Д. В.* Отражение динамики развития афтершокового процесса землетрясения 20.12.2018, Mw = 7.3 в поле кинематического параметра V_P/V_S // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2020. № 2. Вып. 46. С. 30–40.

10. *Лобковский Л.И.* Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 252 с.

11. *Лобковский Л.И., Николаевский В.Н., Каракин А.В.* Геолого-геофизические следствия серпентинизации океанической литосферы // Бюлл. МОИП, отдел геологич. 1986. Т. 61. Вып. 4. С. 3–12.

12. *Николаевский В. Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.

13. *Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный Мир, 1998. 164 с.

14. *Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им.Витуса Беринга, 2009. 191 с.

15. *Селиверстов Н.И.* Подводные морфоструктуры Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск- Камчатский, 2013. 161 с.

16. *Славина Л.Б., Мячкин В.В.* Кинематические предвестники сильных сейсмических событий (методика и результаты прогноза землетрясений на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2005. № 3. С. 24–37.

17. *Федотов С.А., Славина Л.Б.* Оценка скоростей продольных волн в верхней мантии под северо-западной частью Тихого океана и Камчаткой // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1968. № 2. С. 8–32.

УДК 550.344

ПОИСК ИМПУЛЬСНЫХ УНЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Мартинес-Беденко В.А.[1], Пилипенко В.А.[1], Козырева О.В.[1], Шиокава К.[2]
[1]Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия
[2]Нагойский Университет, Япония
kozyreva@ifz.ru

Введение

Решение задач, связанных с поиском и распознаванием предвестников землетрясений, продолжает оставаться одним из основных направлений геофизики. Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал указывает на перспективность исследований электромагнитных явлений в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне (0.01–10 Гц) [12]. Аномальные УНЧ шумы регистрировались вблизи эпицентра за часы и дни до момента землетрясения [11]. Впоследствии неоднократно сообщалось о выявлении УНЧ шумов перед сейсмическими событиями [см. статьи в сборниках 13, 14]. И, все же, ситуация с УНЧ электромагнитными предвестниками к настоящему времени остается неоднозначной. Разные проявления электромагнитных эффектов в разрозненных наблюдениях, регистрируемые за разные времена до землетрясения, и отсутствие повторяемости результатов вызывают сомнения в достоверности связи обнаруживаемых явлений с землетрясениями [8, 15]. Стоит вопрос о возможности появления перед землетрясениями импульсных УНЧ электромагнитных сигналов [9].

В серии работ [3–7] сообщалось об обнаружении специфических импульсных сигналов в полосе частот 0–5 Гц за несколько минут перед землетрясениями на двух далеко разнесенных магнитных обсерваториях. Эти УНЧ импульсы, наблюдаемые в близкой временной окрестности 0–5 минут момента землетрясения, которые по виду динамического спектра отличались от известных типов геомагнитных пульсаций. Этот результат может быть поистине крупным и неожиданным открытием в геофизике и заслуживает серьезной проверки и критического обсуждения.

В настоящей работе исследована возможность появления УНЧ электромагнитных импульсов, предваряющих сейсмические события. Были использованы данные сети современных индукционных магнитометров на Дальнем Востоке.

Данные наблюдений

Исходным материалом для анализа являлись записи УНЧ-вариаций электромагнитного поля Земли на сети станций проекта PWING (study of dynamical variation of particles and waves in the inner magnetosphere using ground–based network observations) [17]. Станции оборудованы индукционными магнитометрами с частотой регистрации 64Гц и другой геофизической аппаратурой. Эта сеть станций была развернута для наземной поддержки спутниковой миссии ERG (Arase), запущенной в декабре 2016. Географические и геомагнитные координаты станций даны в таблице 1. Рассматриваются только горизонтальные компоненты: север-юг (X) и восток-запад (Y).

Магнитные наблюдения сопоставлялись с моментами землетрясений из каталога International Seismological Centre (ISC). Выбирались землетрясения с магнитудой больше порогового значения M = 5.0. в регионе, покрываемым сетью магнитометров.

Для информации о грозовой активности в изучаемом регионе использованы данные мировой системы регистрации молний World Wide Lightning Location Network (WWLLN). Эта система контролирует грозовые разряды в планетарном масштабе с помощью ОНЧ (1–24 kHz) антенн на 28 станциях. Система позволяет вести регистрацию с временной погрешностью < 30 μs и с погрешностью определения места разряда ~15 км. Система регистрирует ~5–10% от полного числа молний, в зависимости от плотности регистрирующих станций в изучаемом регионе.

Результаты наблюдений

Ниже мы дадим примеры импульсных возмущений геомагнитного поля, зарегистрированных в интервале ± 10 мин от момента сейсмического толчка. Индукционный магнитометр – высокочувствительный прибор, регистрирующий малейшие быстрые вариации геомагнитного поля. Из-за высокой чувствительности запись магнитометра содержит немало помех, в том числе и импульсных. Если же импульс одновременно зарегистрирован на нескольких станциях, то он не связан с локальными помехами, а является откликом на глобальное природное возмущение.

Таблица 1. 64 Гц индукционные магнитометры

Станция	*Код*	*Широта (N)*	*Долгота (E)*
Magadan	MGD	60.05	150.73
Paratunka	PTK	52.97	158.25
Moshiri	MSR	44.37	142.27
Sata	STA	31.02	130.68
Gakona	GAK	62.39	214.78
Zhigansk	ZGN	66.78	123.37

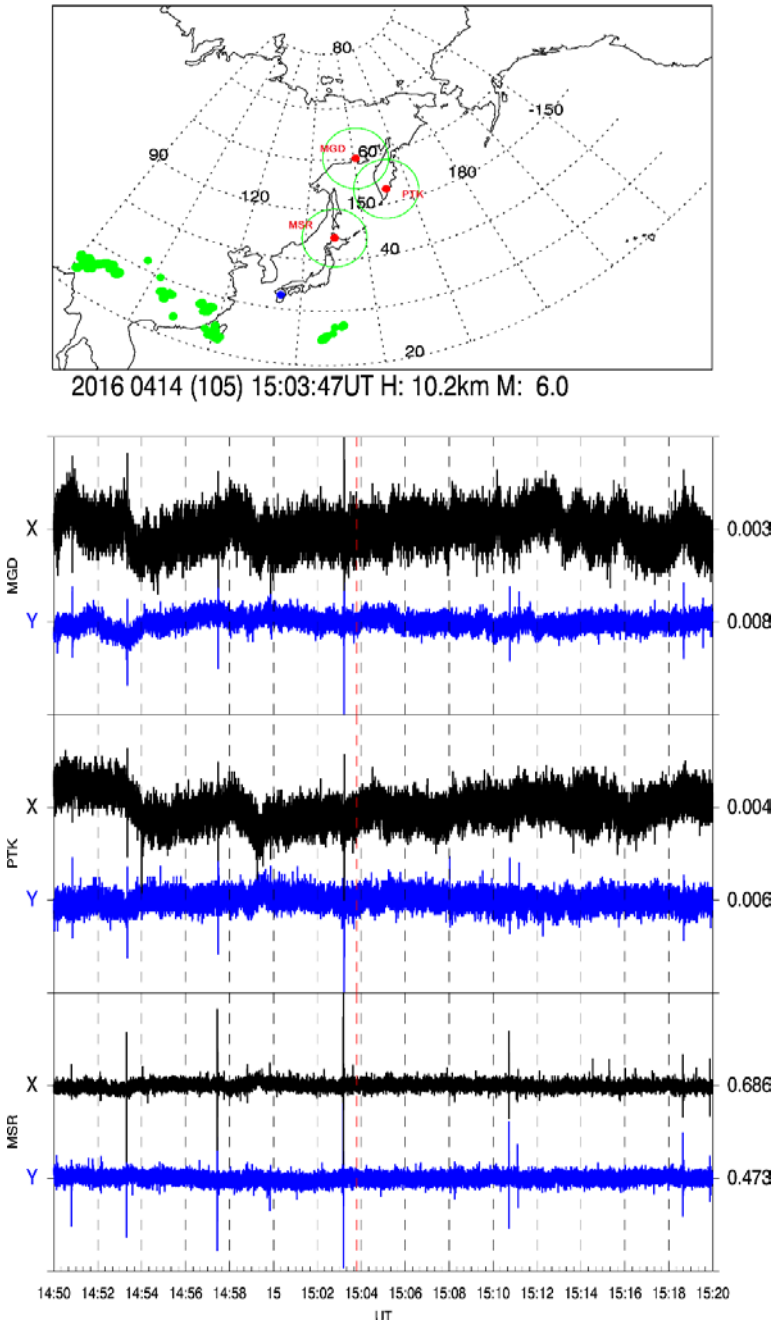


Рис. 1. Карта с положением станций (красные точки) и эпицентром землетрясения (синяя точка) 2016/04/14 в 15:03:47 UT (верхняя панель); Импульсная структура геомагнитного поля по данным индукционных магнитометров MGD, PTK, MSR во временной окрестности момента землетрясения (вертикальная пунктирная красная линия) 14:50:00–15:20:00 UT (нижняя панель).

На рис. 1 показаны данные индукционных магнитометров во временной окрестности землетрясения 2016/10/17 07:14:49 с $M = 6.0$ и $H = 25$ км. Даже визуальный просмотр показывает, что помимо локальных импульсов на каждой из станций, наблюдаются импульсы, синхронно регистрирующиеся на 2–3 станциях.

Для тех импульсов, которые синхронно наблюдались на нескольких станциях, рассмотрим в сильно увеличенном масштабе волновую форму импульса. В качестве примера на рис. 2 приведены волновые формы синхронных импульсов, зарегистрированных на станциях PTK и MGD 2016/04/14.

Импульсы практически синхронны на станциях PTK и MGD, разнесенных более чем на 900 км. Возмущение представляет собой осцилляторный затухающий отклик.

Сопоставление с данными системы регистрации молний показывает, что зачастую импульсы совпадают с грозовыми разрядами, хотя WWLLN регистрирует относительно малое число разрядов. В примере, показанном на рис. 3, видно, что грозовые разряды на несколько секунд опережают магнитные импульсы.

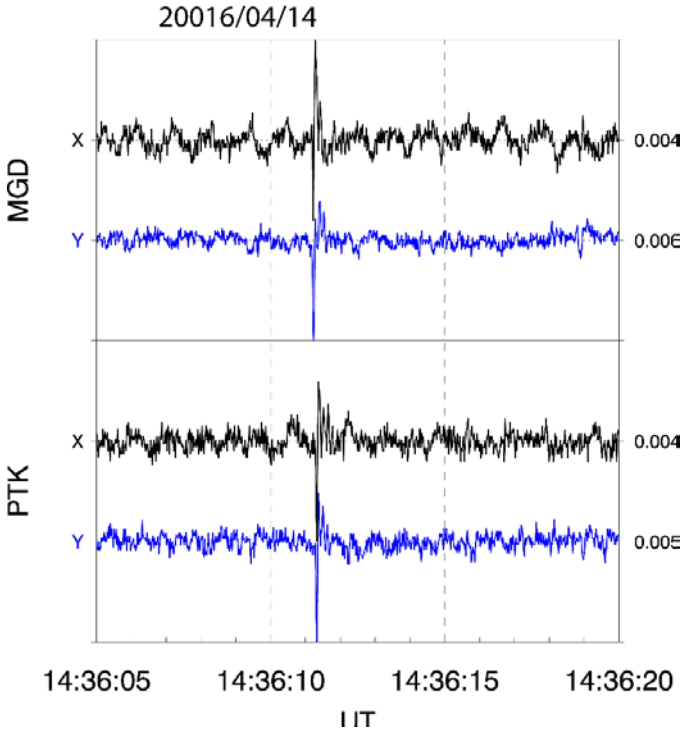


Рис. 2. Волновые формы синхронных импульсов, зарегистрированных на станциях PTK и MGD 2016/04/14 в интервале 14:36:05–14:36:20 UT.

Обсуждение

Согласно существующим представлениям, в течение нескольких минут во временной окрестности сейсмического толчка может происходить удивительно большое число электромагнитных явлений. Распространяющаяся от гипоцентра сейсмическая волна возбуждает транзиентный всплеск индукционного электромагнитного поля [19]. За несколько секунд до прихода сейсмической волны в точку регистрации возникает ее электромагнитный «предвестник», возбуждаемый токами на фронте волны [18]. Резкая подвижка блоков земной коры в момент землетрясения может вызывать появление электромагнитных импульсов, опережающих сейсмические волны [1, 2]. В этом же ряду удивительных, но недостаточно изученных явлений, стоит и обнаруженный в работах [3–7] эффект появления глобальных высокочастотных импульсов за первые минуты до сейсмического толчка.

В этих работах анализ УНЧ излучений выполнялся по данным 2-х обсерваторий, разнесенных на 12 часов по долготе и на 10^{o} по широте, которые вели регистрацию индукционными магнитометрами с записью данных на аналоговый магнитофон. Аналоговые записи оцифровывались, а затем подвергались спектрально-временному анализу с построением динамических спектров (спектрограмм). Предвестниковые импульсы на обеих станциях могли появляться практически одновременно. Сигналы регистрировались в виде либо единичных, либо парных импульсов с амплитудой, не превышающей 20 пТл в диапазоне частот до 5 Гц на значительных удалениях от эпицентра (до 10 тыс. км). Динамические спектры предвестниковых сигналов подобны спектрам пульсаций Pi1B, возникающих при авроральных активизациях, но имеют ряд отличий. Всплески Pi1B имеют иную форму динамического спектра и временные характеристики: их длительность обычно составляет 2–3 минуты, т.е., примерно в 5–10 раз превышает характерную длительность импульсных предвестников (20–50 сек).

Вызывает сомнение то, что в [3–7] рассматривались землетрясения по всему миру, включая совсем слабые ($M < 3$), поэтому с большой вероятностью на любой геомагнитный всплеск может найтись, даже в интервале < 5 мин, какое-то землетрясение. Однако в этом случае импульсы должны наблюдаться случайным образом относительно момента землетрясения, и на основании этих сомнений отвергнуть гипотезу о связи импульсов с землетрясениями нельзя.

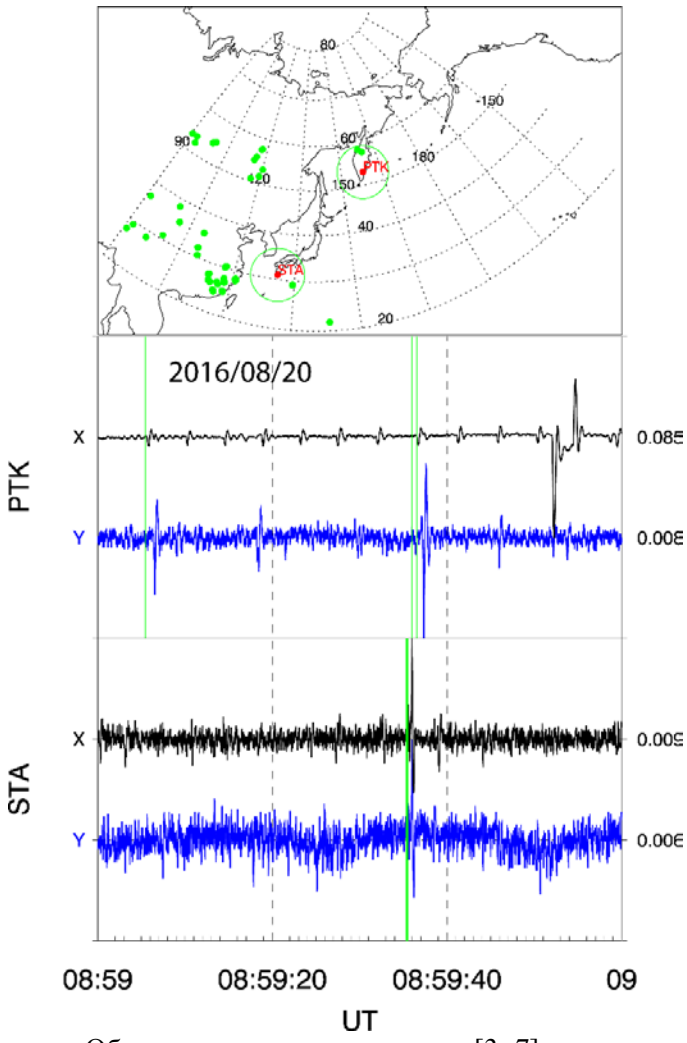


Рис. 3. Нижняя панель: Сопоставление магнитных импульсов на станциях PTK и STA с грозовыми разрядами в 650 км окрестности станций (вертикальные зеленые линии) 2016/08/20 в интервале 08:59-09:00 UT;
Верхняя панель: Карта с положением всех станций сети и центрами грозовых разрядов (зеленые точки) по данным WWLLN.

Обнаруженные сигналы в [3–7] предложено рассматривать как проявление механо-электромагнитных преобразований в зоне землетрясений, связанных с разрушением зацеплений на границе двух смежных плит. Предполагается, что резкое сжатие пород, предшествующее их разрушению, может привести к генерации электромагнитного импульса. Объяснение, даже качественное, наблюдаемому сверхдальнему распространению импульсов дать не удается. Каналом для распространения сигналов вдоль земной поверхности может служить ионосферный волновод. Канализируемые в таком волноводе геомагнитные пульсации с частотой выше частоты отсечки (~0.5 Гц) способны распространяться вдоль земной поверхности с альвеновской скоростью 500–1000 км/сек на значительные расстояния (до нескольких тысяч км). При типичной скорости в ионосферном волноводе 500 км/с запаздывание между станциями SAT-MSR (R = 1805 км) должно составлять $\Delta t \sim 3.6$ с, между MSR-PTK (R = 1514 км) $\Delta t \sim 3.0$ с, PTK-MGD (R = 915 км) $\Delta t \sim 1.8$ с. Современная аппаратура с GPS временной привязкой способна выявить такие временные задержки.

Нам не удалось обнаружить случаев одновременной регистрации импульсов на всех станциях сети. Синхронные импульсы наблюдались только на паре станций, т.е. масштаб импульсного возмущения составлял порядка 10^3 км. Даже если отбросить гипотезу о связи импульсов с сейсмической активностью, вопрос о физической природе этих возмущений остается открытым. Нам не известен магнитосферный источник, который мог бы генерировать такие возмущения.

Сопоставление с базой данных WWLLN показало, что по крайней мере часть импульсов является откликом на грозовой разряд. Появление грозового разряда перед землетрясением может быть просто случайным совпадением. В то же время нельзя исключить возможность того, что сейсмический процесс вызывает изменения электро-химических свойств нижней ионосферы (например, за счет выхода радиоактивных эманаций [16]), что может служить триггером грозовых разрядов при благоприятных условиях. Таким образом, появление предвестниковых импульсов может быть связано с усилением грозовой активности перед землетрясением. В целом вопрос о связи процесса подготовки землетрясения с атмосферным электричеством изучен слабо, и какие-либо обоснованные предположения в этой области делать нельзя.

Возможен сценарий, при котором молниевый разряд возбуждает как локальный отклик

ионосферного альвеновского резонатора, так и моды ионосферного волновода, распространяющиеся на значительные расстояния [10]. Можно предположить, магнитные импульсы являются откликом на грозовые разряды, распространяющиеся на расстояния порядка первых тысяч км. Осцилляторный хвост импульса может быть вызван возбуждением ионосферного отклика.

Заключение

По данным сети высокочувствительных индукционных магнитометров на Дальнем Востоке отмечено появление импульсных возмущений. Зачастую они наблюдаются синхронно на нескольких станциях, что исключает связывать их с влиянием локальных помех. Хотя они часто регистрировались перед землетрясениями, их связь с сейсмической активностью нам представляется сомнительной. Предположительно, магнитные импульсы являются откликом на грозовые разряды в окрестности станции с масштабом около 10^3 км.

Благодарности. Работа поддержана госзаданием ИФЗ. Данные магнитометров доступны на сайте http://www.isee.nagoya–u.ac.jp/dimr/PWING/. Сейсмический каталог ISC доступен на сайте www.isc.ac.uk.

Список литературы

1. *Гохберг М.Б., Крылов С.М., Левшенко В.Т.* Электромагнитное поле очага землетрясения // Докл. АН СССР. 1989. Т. 308. № 1. С. 62–65.

2. *Гульельми А.В., Левшенко В.Т.* Электромагнитный импульс из очага землетрясения // Доклады РАН. 1996. 349(5). С. 676–678.

3. *Довбня Б.В., Зотов О.Д., Щепетнов Р.В.* Связь УНЧ электромагнитных волн с землетрясениями и антропогенными воздействиями // Геофизические исследования. 2008. Вып. 9. С. 3–23.

4. *Довбня Б.В.* Об эффектах землетрясений в геомагнитных пульсациях и их возможной природе // Геофизический журнал. 2011. Т. 33. № 1. С. 72–79.

5. *Довбня Б.В.* Электромагнитные предвестники землетрясений и их повторяемость // Геофизический журнал. 2014. Т. 36. № 3. С. 160–165.

6. *Довбня Б.В., Зотов О.Д., Мострюков А.О., Щепетнов Р.В.* Электромагнитные сигналы, близкие по времени к землетрясениям // Физика Земли. 2006. 42 (8). С. 684–689.

7. *Довбня Б.В., Пашинин А.Ю., Рахматулин Р.А.* Краткосрочные электромагнитные предвестники землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2019. 10(3). С. 731–740.

8. *Костерин Н.А., Пилипенко В.А., Дмитриев Э.М.* О глобальных ультранизкочастотных электромагнитных сигналах перед землетрясениями // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 1. С. 24–34.

9. *Малышков Ю.П., Джумабаев К.Б.* Прогнозирование землетрясений по параметрам естественного импульсного электромагнитного поля Земли // Вулканология и сейсмология. 1987. № 1. С 97–103.

10. *Fedorov, E., Mazur, N., Pilipenko, V. and Baddeley, L.* Modeling the high-latitude ground response to the excitation of the ionospheric MHD modes by atmospheric electric discharge // J. Geophys. Res. 2016. 121. 11282–11301.

11. *Fraser-Smith A.C., Bernardi A., McGill P.R., Ladd M.E., Helliwell R.A., Villard O.G.* Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake // Geophysical Research Letters. 1990. V. 17. P. 1465–1468.

12. *Hattori K.* ULF Geomagnetic changes associated with large earthquakes // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. 2004. V. 15. N. 3. P. 329–360.

13. *Hayakawa M. (ed.)* Earthquake Prediction Studies: Seismo Electromagnetics // Terra Scientific Publishing. Tokyo, 2013. 168 pp.

14. *Hayakawa M., Molchanov, O.A. (eds)* Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling, Terra Scientific Publishing. Tokyo, 2002. 477 pp.

15. *Masci F., Thomas J.N.* Are there new findings in the search for ULF magnetic precursors to earthquakes? // J. Geophys. Res. 2015. 120 10289–10304.

16. *Pulinets S., Ouzounov D.* Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model: An unified concept for earthquake precursors validation // Journal of Asian Earth Sciences. 2011. 41. P. 371–382.

17. *Shiokawa et al.* Ground-based instruments of the PWING project to investigate dynamics of the inner magnetosphere at subauroral latitudes as a part of the ERG-ground coordinated observation network // Earth, Planets and Space. 2017. 69:160.

18. *Surkov, V.V., Pilipenko, V.A.* Magnetic effects due to earthquakes and underground explosions: a review // Annals of Geophysics. 1997. 40. N 2. P. 227–239.

19. Surkov V.V., Pilipenko, V.A., Sinha, A.K. Possible mechanisms of co-seismic electromagnetic effect // Acta Geodaetica et Geophysica. 2018. 53(1). P. 157–170.

УДК 551.53/.55

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ЗЕМНЫХ ПРИЛИВОВ НА СЕЙСМИЧНОСТЬ

Ребецкий Ю.Л.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва,
reb@ifz.ru

Введение

Создание детерминированной теории прогноза землетрясений базируется на гипотезе о критическом состоянии породного массива перед сейсмическим разрушением [6, 7]. Считается, что в сейсмогенных зонах земной коры разломы постоянно находятся в предкритическом состоянии. Возникновение сильного землетрясения в регионе рассеивает часть накопленной упругой энергии и выводит разлом из критического состояния. Впоследствии тектоническая нагрузка снова приводит разлом в критическое состояние.

В рамках детерминированной теории прогноза считается, что разломы, находящиеся вблизи критического состояния, по-разному реагируют на нагружение и разгрузку. При увеличении нагрузки имеет место упруго-квазипластическое деформирование, а при снижении нагрузки происходит упругая разгрузка. Наиболее ярко эти различия поведения геосреды должны проявляться при действии периодических процессов нагружения и разгрузки. В экспериментальной работе [11] получены подтверждающие эту гипотезу результаты. В работах [2, 8–10] предложено приливы в твердой земле от влияния Луны и Солнца рассматривать как достаточные по интенсивности для того, чтобы создать *триггерный эффект* для землетрясения. При этом считается, что приближение к критическому состоянию возникает на фазе дополнительного нагружения.

В настоящей работе выполнен анализ базисных положений этого подхода с позиции изменения природного напряженного состояния на разломах в процессе земных приливов. Оптимальность ответа разломов на процесс нагрузки и разгрузки оценивается на основе критерия Кулона–Мора. Последнее положение крайне важно, так как для коры, находящейся в разных типах напряженного состояния (горизонтальное сжатие, растяжение или сдвиг), фазой нагружения и разгрузки могут быть разные фазы лунно-солнечных приливов.

При оценке влияния деформаций ЗП за отсчетную модель примем напряженное состояние, отвечающее нулевому влиянию приливов. Эту модель далее будем называть *стационарным начальным напряженным состоянием* (СННС). Такая модель прежде всего будет определять *региональный геодинамический тип напряженного состояния земной коры*, зависящий от индекса главного напряжения, ориентированного субвертикально, т.е. возможны напряженные состояния горизонтального сжатия, растяжения или сдвига, а также их сочетание [4].

О тензоре добавочных напряжений от земных приливов

Принимая для оценки параметров дополнительного напряженного состояния земной коры, возникающего при ЗП, модель упругого сферического слоя с нулевыми вертикальными напряжениями ($\delta\sigma_R = 0$), находим, что главная объемная деформация связана с латеральными $\delta\theta = 2\,(\delta\varepsilon_M + \delta\varepsilon_F)/3$ (при значениях коэффициента Пуассона $\nu = 0.25$). При этом напряжения в латеральном направлении связаны с латеральными деформациями следующим образом:

$$\delta\sigma_M = E\,(\delta\varepsilon_M + \nu\delta\varepsilon_F)/(1-\nu^2),\ \delta\sigma_F = E\,(\delta\varepsilon_F + \nu\delta\varepsilon_M)/(1-\nu^2). \quad (1)$$

Существующие оценки показывают, что соотношение латеральных продольных деформаций от ЗП ($\delta\varepsilon_M : \delta\varepsilon_F$) может меняться в пределах порядка, при этом для области сжатия или растяжения они имеют один и тот же знак. Эти области растяжения и сжатия разделяются приблизительно вдоль широты 45° в инерциальной системе координат, связанной с положением оси, проходящей через центры Земли и Луны (рис. 1).

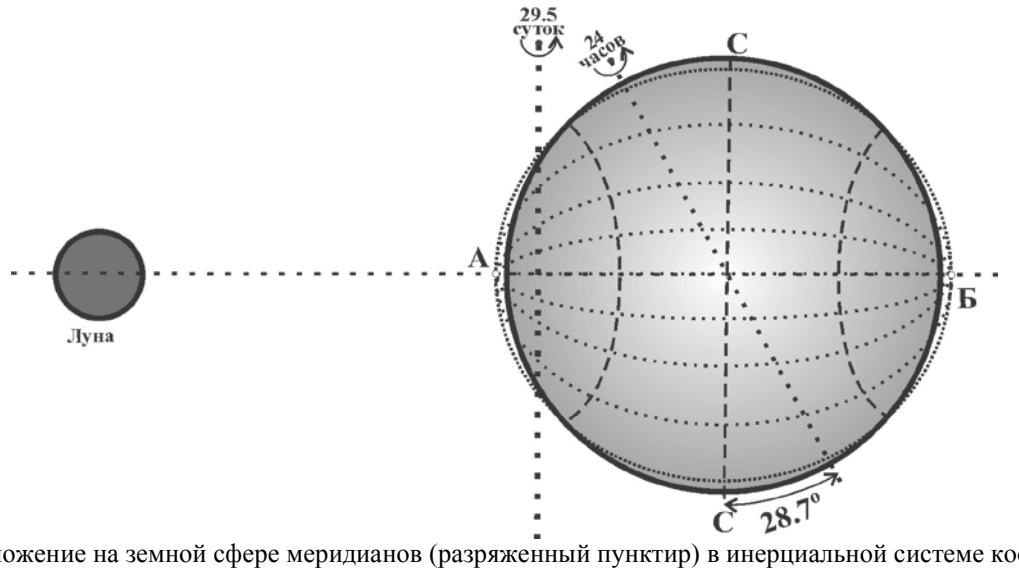


Рис. 1. Расположение на земной сфере меридианов (разряженный пунктир) в инерциальной системе координат, связанной со взаиморасположением Земли и Луны, и изменение земной формы под влиянием ЗП. Деформированная лунными приливами сфера Земли показана частым пунктиром. Вблизи точек А и Б на земной сфере происходят максимальные поднятия, линия СС (удлиненные штрихи) – максимальные опускания. Широта 45°, на которой происходит смена знака вертикальных движений при ЗП, изображена удлиненным пунктиром. Показана плоскость орбиты Луны и Земли (горизонтальный короткий пунктир) относительно их барического центра (вертикальная утолщенная и сильно разряженная пунктирная линия) и ось суточного вращения Земли (наклонная разряженная пунктирная линия). Представлено состояние космических тел в момент, когда ось вращения Земли совпадает с плоскостью, проходящей через центры Земли и Луны, и ось их взаимного вращения.

Для пункта приливных наблюдений Осакаяма [1, рис. 81, с. 284] имеются следующие данные о главных латеральных деформациях в геоцентрической системе координат в моменты максимального прилива $\delta\varepsilon_1 = 1.8 \cdot 10^{-8}$, $\delta\varepsilon_1 = 0.3 \cdot 10^{-8}$. Если их принять за деформации, соответственно, в направлении M и F лунноосевой системы координат, то при модуле Юнга $E = 7 \cdot 10^5$ бар получим следующие оценки для модулей латеральных напряжений: $|\delta\sigma_M| \approx 0.01$ бар и $|\delta\sigma_F| \approx 0.005$ бар. Здесь важно, что они оба растягивающие в областях поднятий и оба сжимающие в областях прогибания земной поверхности.

Согласно представлениям о влиянии ЗП на деформации земной сферы, в области поднятия поверхности вдоль меридианов и широт инерциальной системы действуют дополнительные напряжения растяжения (рис. 2 а, б). Здесь сбросы могут рассматриваться как возможные для активизации от действия ЗП. Поскольку наибольшее растяжение действует вдоль меридиана, то наибольшее воздействие будет при субширотном расположении сброса. Соответственно в области прогиба вдоль меридианов и широт имеет место дополнительное напряжение сжатия. Здесь могут активизироваться взбросы при наибольшей опасности воздействия для субширотного расположении взбросов.

Для таких разрывов в зонах растяжения и сжатия наиболее опасными являются углы погружения, близкие к 45°, на плоскостях которых возникают дополнительные касательные и нормальные напряжения $\delta\tau_n$ и $\delta\sigma_n$. В силу того что вертикальные дополнительные напряжения равны нулю, $|\delta\sigma_n| = |\delta\tau_n|$. При этом для широтной и меридиональной ориентации эти напряжения имеют значения:

$$\text{вдоль широт } \delta\tau_n = 0.5E\,(\delta\varepsilon_M + \nu\delta\varepsilon_F)/(1-\nu^2), \delta\sigma_n = 0.5E\,(\delta\varepsilon_M + \nu\delta\varepsilon_F)/(1-\nu^2), \quad (2)$$

$$\text{вдоль меридианов } \delta\tau_n = 0.5E\,(\delta\varepsilon_F + \nu\delta\varepsilon_M)/(1-\nu^2), \delta\sigma_n = 0.5E\,(\delta\varepsilon_F + \nu\delta\varepsilon_M)/(1-\nu^2). \quad (3)$$

Положительные значения касательных напряжений в (2, 3) в областях растяжения означают, что они действуют в направлении погружения разрывов, а в областях сжатия – в направлении восстания разрывов. То есть в обоих случаях дополнительные касательные напряжения имеют направления, соответствующие направлению смещения на разрывах. Нормальные напряжения на разрывах растягивающие в области растяжения и сжимающие в области сжатия.

Для разрывов в виде сдвигов СННС в областях поднятия и прогиба от ЗП наиболее опасной является косая (45°) их ориентация по отношению к широтам и меридианам инерциальной системы.

На рис. 2 б, г показаны правые и левые сдвиги соответствующей наиболее опасной кинематики. Обычно сдвиги субвертикальны. Для таких разрывов дополнительное касательное и нормальное напряжения определяются выражением

$$\delta\tau_n = \pm 0.5E\,(\delta\varepsilon_M + \delta\varepsilon_F)/(1+\nu),\ \ \delta\sigma_n = 0.5E\,(\delta\varepsilon_M + \delta\varepsilon_F)/(1-\nu). \qquad (4)$$

Положительные значения касательных напряжений в (4) означают, что они действуют в том же направлении, что и направление смещения по разрыву в СННС. Одинаковые по типу сдвиги (правые или левые) могут иметь как положительные, так и отрицательные значения $\delta\tau_n$, что зависит от их ориентации в инерциальной системе координат.

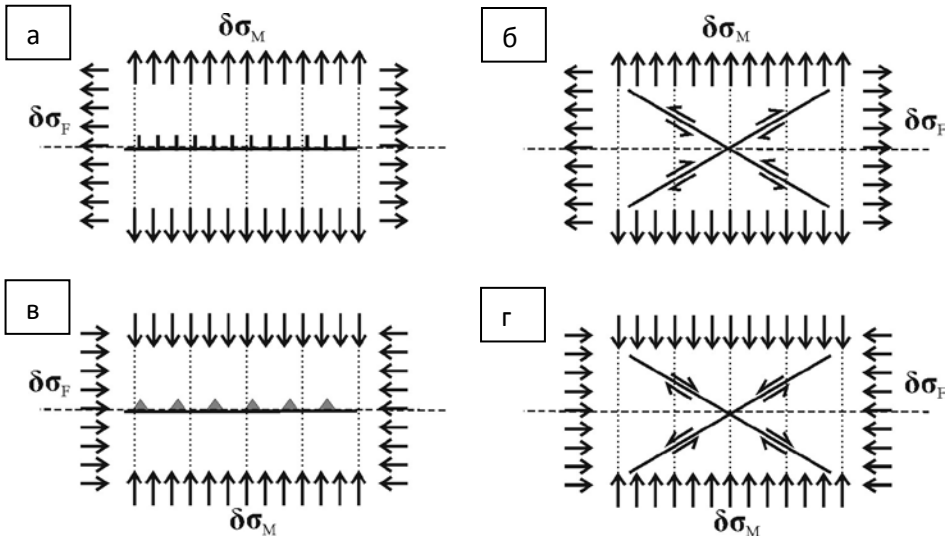


Рис.2. Добавочное напряженное состояние в областях поднятия (а, б) и прогиба (в, г). Широтные разломы в виде сбросов (а) и взбросов (в) показаны соответственно для областей поднятия и прогиба, так как дополнительное напряженное состояние коррелирует с СННС. Кинематика косоориентированных правых и левых сдвигов (б, г) СННС для областей поднятия и прогиба также принималась той, которая соответствует дополнительному напряженному состоянию от ЗП. Точечный пунктир – меридиан, штрих-пунктир – широта в инерциальной системе.

Опасные состояния сейсмогенных разрывов на диаграмме Мора

На рис. 3 показано влияние дополнительных напряженных состояний для разломов различных кинематических типов (рис. 2). Здесь на диаграмме Мора показано направление перемещения точки *C*, характеризующей самое опасное напряженное состояние, действующее вдоль плоскости скалывания от дополнительного воздействия ЗП.

Как видно, для взбросов, попадающих в зону сжатия, точка *C* должна смещаться в положение точки «*b*» и траектория этого смещения почти параллельна линии предела прочности. Это связано с тем, что в зонах сжатия от ЗП на взбросах происходит не только увеличение касательных напряжений, но и увеличение напряжений сжатия (2, 3), нормального к плоскости разрыва.

Для сбросов точка *C* для состояния растяжения смещается в положение точки «*a*», и траектория этого перемещения ортогональна линии предела прочности. В зонах растяжения от ЗП на сбросах при увеличении касательных напряжений одновременно происходит снижение напряжений сжатия (2, 3), нормального к плоскости разрыва.

Для сдвигов с той ориентацией, которая представлена на рис. 2 в областях растяжения, происходит увеличение касательных напряжений одновременно со снижением нормального к разрывам сжатия, т.е. точка *C* перемещается в положение точки «*a*». Для областей сжатия увеличение касательных напряжений сопровождается ростом нормального к разрывам сжатия, т.е. точка *C* перемещается в положение точки «*b*».

Таким образом, выясняется, что ЗП оказывают избирательное влияние на разломы, и эта избирательность зависит от их кинематического типа разрыва. Существенно более опасным для реализации триггерного влияния ЗП являются сбросы и сдвиги, для которых возможно приближение состояния к предельному в моменты их нахождения в областях растяжения. Для взбросов реализация триггерного эффекта при ЗП менее вероятна, так как их предельное состояние в областях сжатия при ЗП получает существенно меньшее (в 4–5 раз) приращение кулоновых напряжений, чем для сбросов.

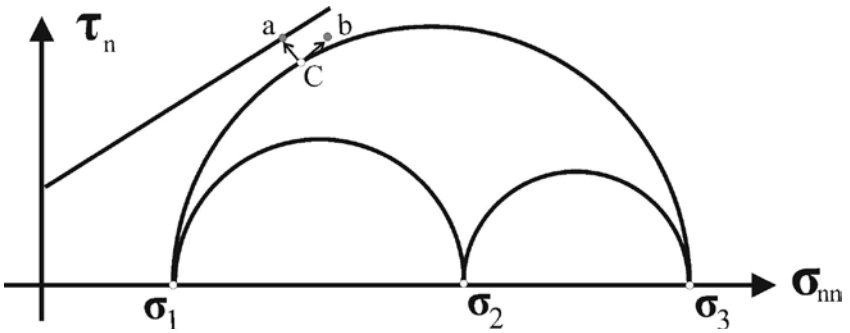


Рис. 3. Траектория точки С в зонах поднятия и прогибания от ЗП: для взбросов (С–b), для сбросов (С–a). Для сдвигов возможны оба варианта изменений напряженного состояния, более опасные (С–a) в зонах поднятия.

Представленный выше анализ влияния ЗП на напряженное состояние коры показал, что возможность триггерного эффекта зависит от кинематического типа сейсмогенных разломов, т.е. от геодинамического типа современного напряженного состояния.

Анализ дополнительных кулоновых напряжений, формирующихся от прямого фактора воздействия ЗП, показал, что наибольшая вероятность возникновения триггерного эффекта имеет место в коре с режимом горизонтального растяжения (разломы в виде сбросов), которым на континентах отвечают зоны рифтов, крупные межгорные впадины, передовые прогибы, плато и нагорья [3]. Повышенная эффективность триггерного эффекта для сбросов проявляется в фазах твердотельного растяжения и связана с ростом уровня касательных на разрыве напряжений при одновременном снижении уровня нормального к разрыву сжатия.

Следующим по уровню повышения кулоновых напряжений от действия ЗП является кора с режимом горизонтального сдвига (разломы в виде сдвигов вдоль простирания), который наиболее часто возникает для коры плит, платформ [5], крупных внутригорных впадин, вовлеченных в поднятие, и иногда для межгорных впадин [3], а также в зонах трансформных разломов.

Наименее вероятно проявление триггерного эффекта для регионов с режимом горизонтального сжатия (разломы в виде взбросов), которые в основном сосредоточены в коре горных поднятий в виде хребтов и щитов платформ. Низкая эффективность триггерного эффекта для взбросов обусловлена тем, что в фазах сжатия (прогибание поверхности) происходит рост уровня касательных на разрыве напряжения, но при этом также происходит и увеличение уровня нормального к разрыву сжатия.

Список литературы

1. *Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.

2. *Николаев В.А.* Реакция сильных землетрясений на фазы земных приливов // Физика Земли. 1994. № 11. С. 49–58.

3. *Ребецкий Ю.Л.* Об особенности напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. Т. 6. № 4. С. 437–466. https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0189.

4. *Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В.* От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.

5. *Сим Л.А.* Неотектонические напряжения Восточно-Европейской платформы и структур обрамления: автореф. дис. … д-ра геол.-минер. наук. Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. 1996.41 с.

6. *Bowman D.D., Ouillon G., Sammis C.G., Sornette A., Sornette D.* An observational test of the critical earthquake concept // J. of Geophysical Research: Solid Earth. 1998. V. 103. P. 24359–24372. https://doi.org/10.1029/98jb00792 .

7. *Sornette D., Sammis C.G.* 1995. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquake prediction // J. de Physique I (France). V. 5. P. 607–619. https://doi.org/10.1051/jp1:1995154.

8. *Yin, X.C., Yin, C., and Chen, X.Z.,* The precursor of instability for nonlinear systems and its application to earthquake prediction – the Load-Unload Response Ratio theory, Nonlinear dynamics and predictability of geophysical phenomena, AGU Geophysical Monograph 83 (eds Newman W.I., Gabrelov A.M. and Turcotte D.L.). 1994. P. 55–60.

9. *Yin X.C. et al.* A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory // Pure and Applied Geophysics. 1995. V. 145. N. 3–4. P. 701–715.

10. *Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F.* Development of a n ew approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory // Pure and Applied Geophysics. 2001. V. 157. N. 11–12. P. 2365–2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7_29.

11. *Yin X. C., Yu H.Z., Kuksenko V., Xu Z.Y., Wu Z., Min Li M, Keyin Peng, Elizarov S., Qi Li.* Load-Unload Response Ratio (LURR), Accelerating Moment/Energy Release (AM/ER) and State Vector Saltation as Precursors to Failure of Rock Specimens // Pure & Appl. Geophys. 2004. N. 16. P. 2405–2416.

УДК 550.845

ИЗМЕНЕНИЯ ИОННО-СОЛЕВОГО СОСТАВА ТЕРМОМИНЕРАЛЬНЫХ ВОД В СВЯЗИ С СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ ($M_L \geq 7.0$) ЮГО-ВОСТОКА ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА

Рябинин Г.В., Полетаев В.А.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, gena@emsd.ru

Введение

С 1977 г. на Камчатке проводятся исследования, направленные на изучение гидрогеохимических предвестников землетрясений. В основе исследований лежат непрерывные наблюдения за режимом подземных (термоминеральных) вод, дренируемых самоизливающимися скважинами и естественными источниками. Результаты исследований отражены в многочисленных научных публикациях, среди которых отметим лишь работы обобщающего характера [2, 3, 5, 7].

С момента начала исследований гидрогеохимических предвестников землетрясений на Камчатке и до 2016 г. сильнейшим сейсмическим событием, предварявшимся значимыми изменениями ионно-солевого состава подземных вод, считалось Кроноцкое землетрясение (5.12.1997 г., $Ks = 15.5$, $M_L = 7.0$, $\Delta = 310$км, $H = 10$ км)*. Изменения в химическом составе подземных вод перед этим землетрясением регистрировались в реальном времени [4, 8]. Жупановское землетрясение (30.01.2016 г., $Ks = 15.7$, $M_L = 7.1$, $\Delta = 93$ км, $H = 178$ км) явилось сильнейшим сейсмическим событием из числа зарегистрированных в интервале глубин 150–250 км под восточным побережьем полуострова [9]. По данным гидрогеохимических наблюдений вариации, которые можно было бы интерпретировать как прогнозные признаки сильного землетрясения, по крайней мере в режиме близком к "реальному времени", на тот момент выявлено не было. Полученные впоследствии данные заставили пересмотреть сделанные ранее выводы об отсутствии гидрогеохимических эффектов, предшествующих Жупановскому землетрясению.

В представленной работе предпринята попытка сравнительного анализа изменений в ионно-солевом составе термоминеральных вод в связи с двумя наиболее значительными сейсмическими событиями, произошедшими в юго-восточной части полуострова Камчатка, на удалении менее 350 км от пунктов наблюдений: Кроноцким и Жупановским землетрясениями.

Сеть наблюдений и методика исследований

Непрерывные наблюдения за режимом подземных вод проводятся на базе сети, состоящей из четырех станций: "Морозная", "Пиначево", "Хлебозавод" и "Верхняя Паратунка" (рис. 1). На станции "Морозная" наблюдения проводятся на одной самоизливающейся скважине № 1 глубиной 600 м. На станции "Пиначево", в настоящий момент, наблюдения ведутся на одной самоизливающейся скважине ГК-1 глубиной 1261 м и двух слаботермальных источниках И-1 и И-2/1. Станция "Хлебозавод" состоит из единственной самоизливающейся скважины Г-1 глубиной 2542 м. Станция "Верхняя Паратунка" объединяет три самоизливающиеся скважины: ГК-15 глубиной 1209 м, № 44 глубиной 649 м и ГК-5 глубиной 247 м.

Комплекс режимных наблюдений включает в себя измерения температуры изливающейся воды, дебита самоизлива, отбор проб воды и газа для их последующего анализа в лабораторных условиях. В пробах воды определяются pH, концентрации ионов хлора (Cl^-), гидрокарбоната (HCO_3^-), сульфата (SO_4^{2-}), натрия (Na^+), калия (K^+), кальция (Ca^{2+}), магния (Mg^{2+}) и кремниевой (H_4SiO_4) кислот. В пробах газа определяются содержания метана (CH_4), азота (N_2), кислорода (O_2), аргона (Ar), углекислого газа (CO_2), гелия (He), водорода (H_2), углеводородных газов: этана (C_2H_6), этилена (C_2H_4), пропана (C_3H_8), пропилена (C_3H_6), бутана (C_4H_{10}n) и изобутана (C_4H_{10}i). Посещение пунктов наблюдений и отбор проб выполняются с интервалом в 6 дней. Определение содержаний в воде растворенных минеральных веществ и газов осуществляется стандартными методами количественного химического анализа.

* *Ks* – энергетический класс землетрясения; M_L – локальная магнитуда землетрясения; Δ – расстояние от эпицентра землетрясения до ст. Хлебозавод (г. Петропавловск-Камчатский); *H* – глубина гипоцентра.

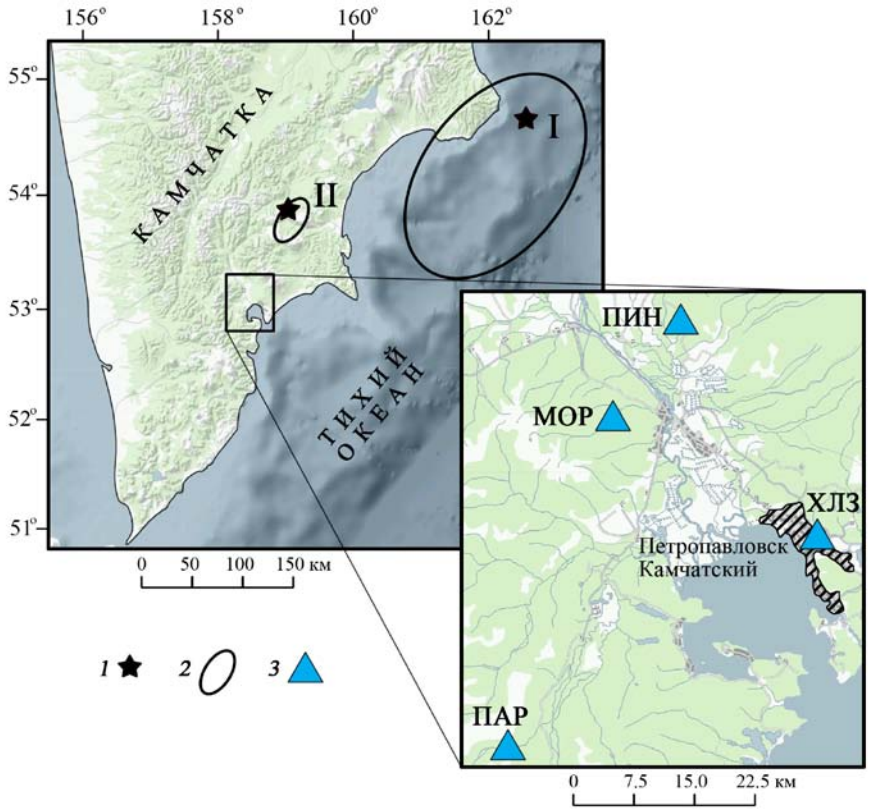


Рис. 1. Схема местоположений эпицентров Кроноцкого и Жупановского землетрясений и расположения станций гидрогеохимических наблюдений. Условные обозначения. *1* и *2* – эпицентры и очаги Кроноцкого (I) и Жупановского (II) землетрясений. *3* – станции гидрогеохимических наблюдений: ПИН – станция "Пиначево"; МОР – "Морозная"; ХЛЗ – "Хлебозавод"; ПАР – "Верхняя Паратунка". Положения и геометрические размеры очагов Кроноцкого и Жупановского землетрясений показаны на схеме согласно графическим иллюстрациям из работ [4, 9].

Результаты наблюдений

На рис. 2 представлены диаграммы, иллюстрирующие изменения содержаний иона хлора и гидрокарбонат-иона в воде самоизливающейся скважины ГК-1 (ст. Пиначево). На диаграмме (а) второго рисунка эти изменения показаны во временной развертке длительностью 25 лет. Здесь, прежде всего, обращает на себя внимание наличие двух временных интервалов длительностью 3–4 года, на которых можно выделить синхронные, но разнонаправленные изменения содержаний ионов хлора и гидрокарбоната, имеющие характер аномалий. На начальные участки этих интервалов приходятся моменты возникновения двух сильнейших землетрясений юго-восточной части полуострова – Кроноцкого и Жупановского. На диаграммах (в) и (г) рис. 2 обсуждаемые изменения показаны во временной развертке длительностью 3 года. Из этих диаграмм следует, что примерно за полгода до Кроноцкого и Жупановского землетрясений в воде скважины ГК-1 отмечалось сначала незначительное уменьшение содержания хлор-иона, затем его значительный рост вплоть до момента сейсмического события. И в том и в другом случаях после землетрясения рост содержания хлоридов в воде скважины продолжился. Максимальные содержания хлоридов фиксировались примерно через 3 месяца после сейсмических событий. Далее следовала фаза восстановления концентраций хлоридов в воде скважины, длительность которой, в случае Кроноцкого землетрясения, составила около 2 лет, в случае Жупановского – около 3 лет. Изменения содержания гидрокарбонат-иона имели зеркальный, относительно изменений хлоридов, характер, отличаясь от него лишь в деталях.

На рис. 3 представлены диаграммы, иллюстрирующие изменения содержания хлоридов в воде самоизливающихся скважин в связи с Кроноцким и Жупановским землетрясениями. Для возможности сопоставления исходные данные по содержанию хлоридов в каждой из скважин нормализованы – приведены к нулевому среднему и единичной дисперсии. По каждому из двух наборов нормализованных данных рассчитана средняя линия. В случае Кроноцкого землетрясения (верхняя диаграмма рис. 3) изменение средней имеет в точности тот же характер, что и вариации

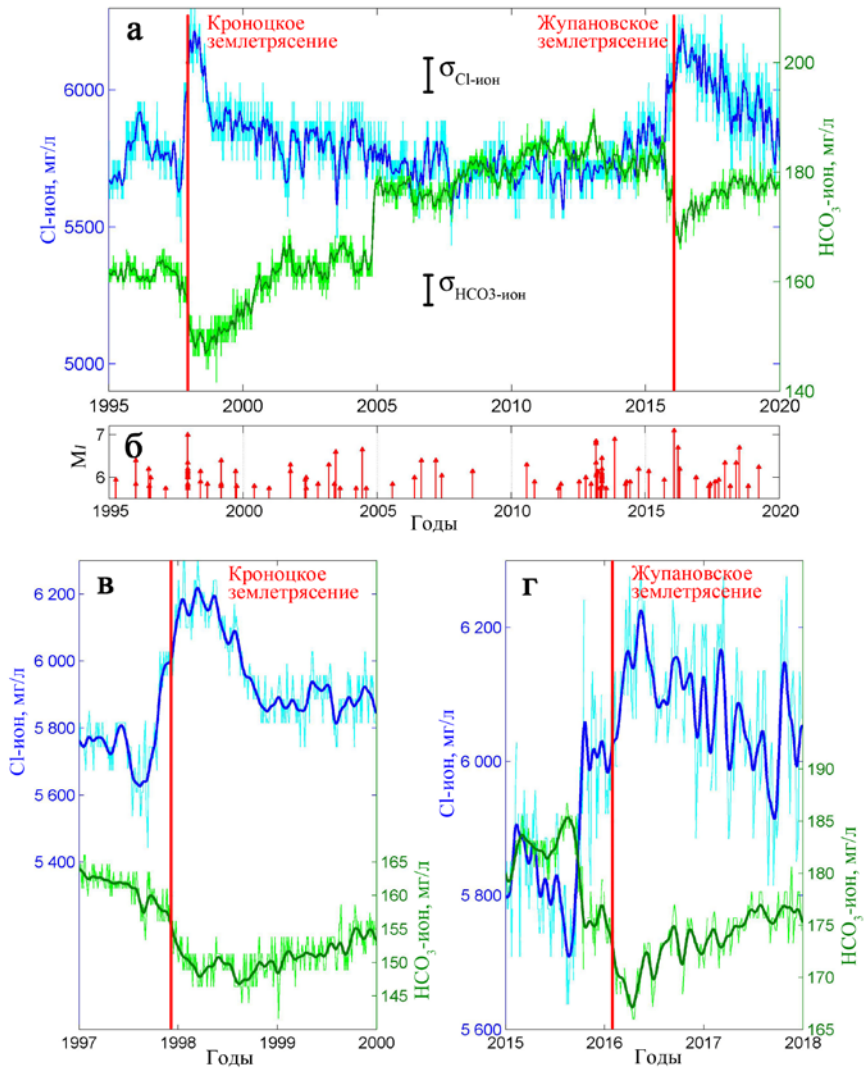


Рис. 2. Изменения содержаний ионов хлора (Cl^-) и гидрокарбоната (HCO_3^-) в воде самоизливающейся скважины ГК-1 (ст. "Пиначево") в связи с Кроноцким и Жупановским землетрясениями. **а –** диаграмма, иллюстрирующая изменения содержаний ионов хлора и гидрокарбоната в период с 1995 по 2020 гг. Вертикальными отрезками с засечками ("усами") на диаграмме показаны величины среднеквадратических отклонений, характеризующих случайные погрешности определения ионов хлора ($\sigma_{Cl\text{-ион}}$) и гидрокарбоната ($\sigma_{HCO3\text{-ион}}$), которые регламентируются соответствующими методиками количественного химического анализа. **б** – диаграмма, иллюстрирующая временное распределение сейсмических событий с магнитудой $M_L > 5.5$ и эпицентральным расстоянием до г. Петропавловска-Камчатского $S \leq$ 350 км. **в** и **г** – диаграммы, показывающие изменения концентрации ионов хлора и гидрокарбоната до и после Кроноцкого и Жупановского землетрясений соответственно.

содержания хлоридов в скважине ГК-1. Исключением является изменение содержания иона хлора в воде скважины Г-1 (ст. Хлебозавод). Здесь перед Кроноцким землетрясением наблюдалось увеличение содержания иона хлора, которое продолжалось после сейсмического события и, в отличие от других скважин, имело необратимый характер. Изменения содержаний хлоридов в разных самоизливающихся скважинах до и после Жупановского землетрясения также демонстрируют признаки подобия. Из нижней диаграммы рис. 3 следует, что перед землетрясением, во всех скважинах, наблюдался рост содержаний хлоридов, продолжавшийся после сейсмического события и сменившийся впоследствии фазой восстановления концентраций.

На диаграммах рис. 4 показан график изменения содержания хлор-иона в воде самоизливающейся скважины № 44 (рис. 4 а) и этот же временной ряд после процедур компенсации сезонных вариаций и сглаживания (рис. 4 б). Компенсация сезонных вариаций выполнялась на основе расчета аддитивной среднесезонной функции [1]. Для сглаживания использовался "диффузионный фильтр", в основе которого лежит простейшая явная разностная схема численного решения уравнения диффузии [6].

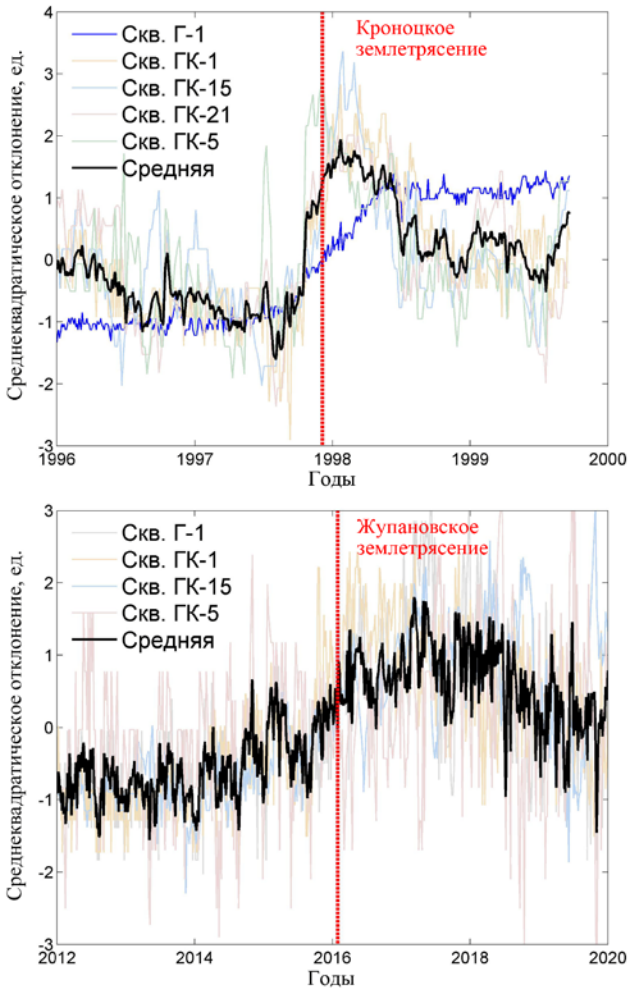


Рис. 3. Изменения содержаний хлоридов в воде самоизливающихся скважин, входящих в состав сети гидрогеохимических наблюдений, до и после Кроноцкого (верхний график) и Жупановского (нижний график) землетрясений. Моменты землетрясений показаны на диаграммах вертикальными линиями.

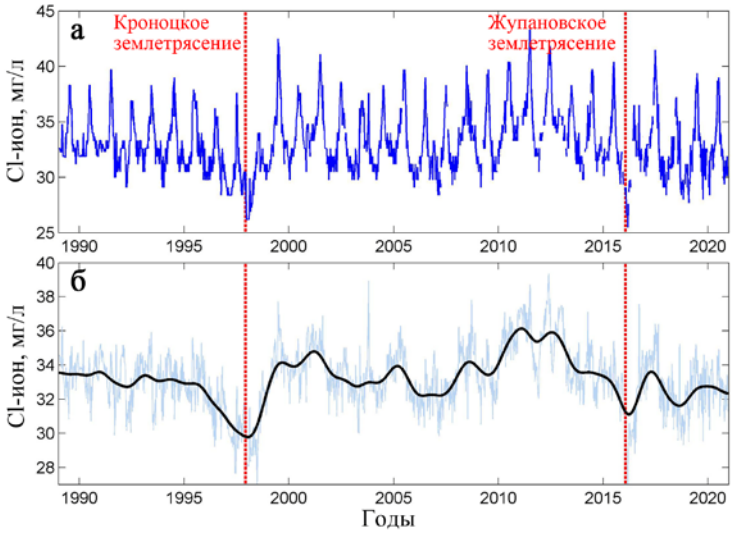


Рис. 4. Изменение содержания иона хлора в воде скважины № 44 (ст. Верхняя Паратунка). **а** – график изменения содержания хлор-иона с ярко выраженными сезонными вариациями. **б** – график изменения содержания хлор-иона после компенсации сезонных вариаций (тонкая линия) и сглаживания (жирная линия).

Из анализа рис. 4 следует, что и Кроноцкое и Жупановское землетрясения предварялись уменьшением низкочастотной составляющей (тренда) вариаций содержания хлор-иона в воде этой

скважины. В связи с Кроноцким землетрясением на такой эффект в изменении содержаний ионов хлора в воде скважины № 44 указывалось в работе [5]. Принимая во внимание уникальность такого рода эффектов, в цитируемой работе подобные многолетние тенденции изменения химического состава подземных вод перед сильнейшими землетрясениями рассматривались как гипотетические. Наличие похожих изменений в случае с Жупановским землетрясением подтверждает сделанные ранее предположения о возможной связи многолетних трендов в гидрогеохимическом режиме подземных вод с процессами подготовки наиболее сильных сейсмических событий.

Обсуждение результатов

Кроноцкое и Жупановское сейсмические события трудно рассматривать как землетрясения аналоги. Однако изменения в ионно-солевом составе термоминеральных вод, в связи с этими событиями, имеют признаки подобия. В режиме скважины ГК-1 (ст. Пиначево) обсуждаемые землетрясения ассоциируются с наиболее яркими изменениями катионно-анионного состава, имеющими характер аномалий. Начальные фазы этих аномалий предшествуют сейсмическим событиям и могут интерпретироваться как предвестники. Схожий характер изменений содержаний, в частности, хлор-иона в воде разных скважин позволяет сделать предположение о сходном механизме образования подобных гидрогеохимических эффектов и его обусловленностью процессами, развивающимися на стадии подготовки сильнейших сейсмических событий.

Представленные в работе результаты, равно как и результаты многолетних гидрогеохимических наблюдений на Камчатке в целом, дают основание рассматривать сильные сейсмические события как один из природных факторов, способный приводить к длительным изменениям химического состава подземных вод. Данное обстоятельство необходимо учитывать при проведении мониторинга в границах месторождений термоминеральных вод. К примеру, гидрогеохимические эффекты, подобные представленным в данной работе, при проведении мониторинга на месторождениях, могут быть неверно интерпретированы как изменения химического состава термоминеральных вод, обусловленные их эксплуатацией.

Список литературы

1. *Дещеревский А.В., Сидорин А.Я.* Аддитивная и мультипликативная модели сезонных вариаций геофизических полей. М.: ОИФЗ РАН, 1998. 24 с.

2. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2.С. 3–20.

3. *Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М.* Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 53–70.

4. *Левина В.И. и др*. Кроноцкое землетрясения 5 декабря 1997 года с Mw=7.8, I0=8 (Камчатка) // Землетрясения Северной Евразии в 1997 г. Обнинск: 2003. С. 251–271.

5. *Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М.* Гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям Камчатки. Алгоритм идентификации и морфологический анализ // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 107–121.

6. *Тимашев С.Ф., Встовский Г.В.* Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе хаотических временных рядов динамических переменных и проблема отношения "сигнал-шум" // Электрохимия. 2003. Т. 39. № 2. С. 156–169.

7. *Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С.34–42.

8. *Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В.* Гидродинамические и гидрогазохимические вариации параметров режима подземных вод в периоды подготовки и реализации Кроноцкого землетрясения 05.12.97 г. // Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГАРФ, 1998. С. 134–147.

9. *Чебров В.Н. и др.* Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с Ks=15.7, Mw=7.2, I=6 (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. № 29. С. 5–16.

УДК 550.34

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ НА ОСНОВЕ СОУС'09: РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ, ВЕРИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

Салтыков В.А.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, salt@emsd.ru

Введение

Для создания научно-методической основы технологий прогноза опасных геодинамических явлений (землетрясений, извержений вулканов и пр.) необходимы методические разработки по формализации предвестников, оценке их прогностической эффективности и создание алгоритмов вероятностной оценки возникновения ожидаемого события. Ранее [3] был предложен формализованная методика вероятностного прогноза извержений вулкана Безымянный на основе применения статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 [2][1] и ряда вспомогательных функций, характеризующих предвестниковую ситуацию. Схематично процедуру прогнозирования извержения вулкана Безымянный можно представить в виде следующих этапов:

В последние десятилетия на вулкане Безымянный происходит в среднем 1–2 кратковременных, но сильных эксплозивно-эффузивных извержения в год. Так с 1999 г. по 2020 г. зафиксировано 29 таких извержений. Для вулкана Безымянный характерна слабая мелкофокусная сейсмичность, которая, в основном, связана непосредственно с извержениями или предшествует им. Наиболее надежный каталог землетрясений для этого вулкана имеется с 1999 г. На основе этих данных и были определены все характеристики прогностической методики.

Для исследования сейсмических активизаций перед извержениями вулкана Безымянный использован каталог Ключевской группы вулканов с 1999 по 2014 гг., полученный Камчатской региональной сетью сейсмических станций [4]. Для построения оценок уровня сейсмичности из каталога были выбраны землетрясения, зафиксированные в радиусе 6 км от вершины вулкана Безымянный. Отметим, что ~98% сейсмических событий приходится на диапазон глубин до 5 км. Анализируемый массив данных имеет представительность (уровень надежной регистрации) $K_S = 4.0$.

Схематично процедуру прогнозирования извержения вулкана Безымянный можно представить в виде следующих этапов:

1. Для оценки состояния сейсмичности построена эмпирическая функция распределения F выделившейся сейсмической энергии во временном окне 5 суток.
2. В соответствии со шкалой СОУС'09 временной ход выделившейся сейсмической энергии пересчитан во временной ход функции уровня сейсмичности $S(t)$, которая является пересчитанной функцией распределения F в линейный по отношению к шкале СОУС'09 масштаб:

$F = 0.5$ $S = 0$
$F = 0.85$ $S = 1$ – граница фонового среднего и фонового повышенного уровня,
$F = 0.975$ $S = 2$ – граница фонового повышенного и высокого уровня,
$F = 0.995$ $S = 3$ – граница высокого и экстремально высокого уровня.

3. По данным об уровне сейсмичности при извержениях 1999 – 2014 гг. был построен осредненный уровень сейсмичности в окрестности начала извержения (рис. 1):

$$SS(\Delta t) = \sum_{i=1}^{n} S(t_0^i + \Delta t) / n ,$$

где Δt – время относительно начала i-го извержения t_0^i.

Аппроксимацию участка функции S в диапазоне $\Delta t = -16 – -2$ сут гиперболой S_{hyp} предлагается рассматривать как эталон поведения уровня сейсмичности перед извержением (рис. 2).

4. Для выявления временных участков подготовки извержения анализируется функция-индикатор $U(t)$, которая представляет собой сглаживание уровня сейсмичности $S(t)$ с использованием весовой функции $SS(\Delta t)$:

[1] Подробнее о современном состоянии методики СОУС'09 см. материалы доклада Салтыкова В.А. «Статистическая оценка уровня сейсмичности СОУС'09: 10 лет использования на Камчатке» в настоящем сборнике.

$$U(t) = \frac{1}{15}\sum_{k=-16}^{-2} S(t+k+2)SS(k).$$

Это позволяет получить индикатор U, характеризующий в определенном смысле сходство поведения уровня сейсмичности S и предполагаемого предвестника SS.

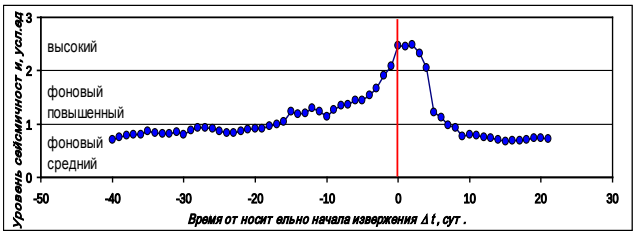


Рис. 1. Осредненное поведение уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 во временной окрестности извержения.

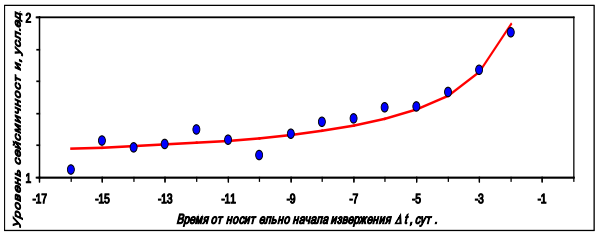


Рис. 2. Участок графика (Рис. 1), принятый в качестве осредненного предвестника извержения вулкана Безымянный.

5. Применяется пороговый критерий: при превышении индикатором U порога u ситуация рассматривается как предвестниковая. Именно эти временные интервалы образуют время тревоги. Возможны три варианта взаиморасположения извержения и тревожного интервала:
   1. Если извержение попадает в интервал, когда $U \geq u_i$, то оно считается имеющим предвестник. Важным нюансом здесь является отмена тревоги произошедшим извержением, то есть временной интервал непосредственно после извержения не включается во время тревоги, даже если $U \geq u_i$.
   2. Если перед извержением $U < u_i$, то такая ситуация квалифицируется как "пропуск цели", то есть извержение не имеет идентифицированного по рассматриваемой методике предвестника и не может быть предсказано.
   3. Тревожный интервал рассматривается как "ложная тревога", если в его пределах не произошло извержение.
6. Помимо критерия подачи тревоги методика включала также определение таких параметров прогноза, как надежность предвестника, достоверность предвестника, эффективность предвестника, вероятность реализации прогноза.

За время применения этой методики в 2015–2020 гг. произошло 8 извержений вулкана Безымянный. Ниже представлены примеры прогнозов, поданных в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС), и их реализации.

Также представляется полезным периодически проводить верификацию применяемой прогнозной методики с учетом нового фактического материала, что и стало второй задачей представляемой работы.

Извержения вулкана Безымянный 2015–2020 гг.

За последние 6 лет произошло 8 извержений вулкана Безымянный (таблица 1). Перед всеми извержениями (кроме 11.12.2016, № 1 в таблице 1), заблаговременно в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений были поданы предупреждения о возможном извержении Безымянного (таблица 1). Подготовка извержения 11.12.2016 стала успешным тестом на возможность использования разрабатываемой методике в реальном времени. На рис. 3 показано отражение развития сейсмической активизации в районе вулкана в значениях функции-индикатора U (как пример – перед извержением 21.10.2020 г.). В зависимости от наблюдающейся величины функции-индикатора U менялась оценка вероятности реализации прогноза за определенный интервал времени. Поскольку такие оценки вероятности сами по себе достаточно трудны к восприятию, в заключении также приводились оценки относительной вероятности (введен термин «контрастность») в двух вариантах – нормированные на среднюю многолетнюю вероятность извержения и на вероятность извержения в отсутствие предвестника (пример – на рис. 4).

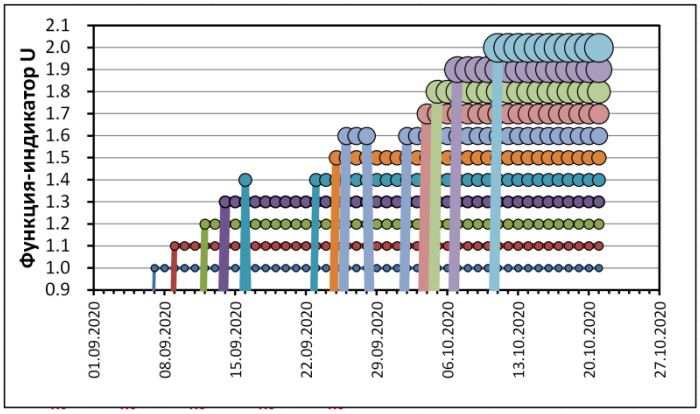


Рис. 3. Временной ход функции-индикатора при подготовке извержения 21.10.2020 г. Превышение функцией-индикатором первого порогового значения $u = 1.0$ произошло 8.09.2020.

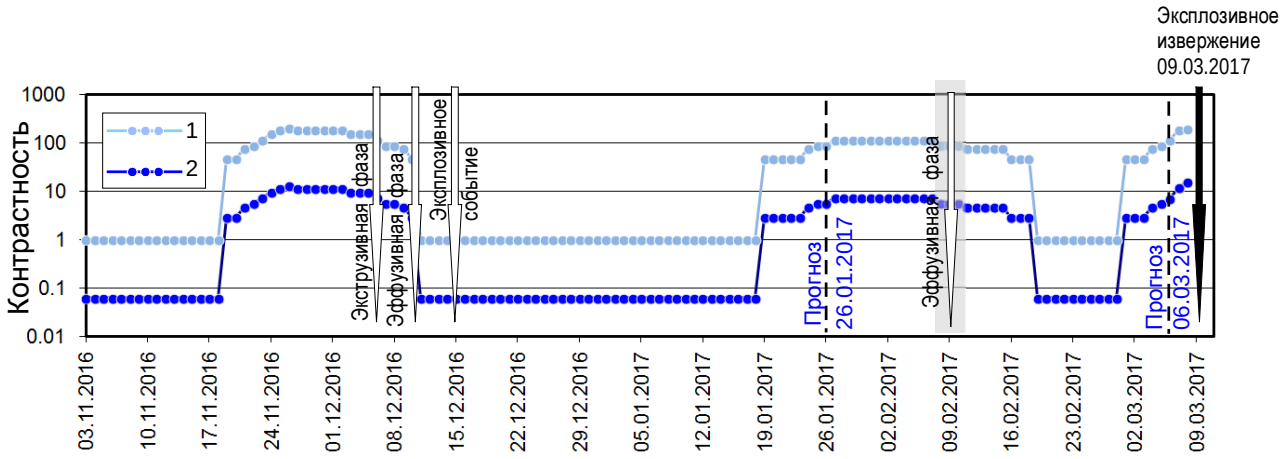


Рис. 4. Временной ход контрастности в конце 2016 г. – начале 2017 г. (1 – нормировка на вероятность извержения в отсутствие предвестника, 2 – нормировка на среднюю многолетнюю вероятность извержения)

Таблица 1. Даты подачи прогнозных заключений в Камчатский филиал РЭС в 2015–2020 гг.

№	Дата извержения	Дата подачи заключения в РЭС
1	11.12.2016	
2	8.02.2017	26.01.2017
3	9.03.2017	6.03.2017
4	16.06.2017	16.06.2017
5	20.12.2017	18.12.2017
6	20.01.2019	20.01.2019
7	14.03.2019	14.03.2019
8	21.10.2020	9.10.2020

Верификация параметров прогностической методики

Ниже представлены данные (таблицы 2, 3), позволяющие оценить изменения в характеристиках методики в результате появления новых данных. Приведены результаты расчетов для всех имеющихся на настоящий момент данных. Для сопоставления приведены оценки по данным 1999-2014 гг. (по [3]).

Надежность предвестника R определяется как отношение числа извержений N_+, для которых был выделен предвестник, к числу всех извержений N: $R=N_+/N$.

Достоверность предвестника V определена как отношение числа предвестниковых аномалий $N(A_E)$ (то есть, в нашем случае, число превышений U порогового значения u_i, сопровождавшихся извержением) к общему числу выделенных аномалий $N(A)$: $V=N(A_E)/N(A)$.

Таблица 2. Заблаговременность проявления предвестника перед извержениями вулкана Безымянный в 2015–2020 гг.

№	Дата извержения	Заблаговременность Δt выхода функции-индикатора U на заданный уровень u, сут					
		u=1.0	u=1.2	u=1.4	u=1.6	u=1.8	u=2.0
1	11.12.2016	22	19	17	15		
2	8.02.2017	20	14				
3	9.03.2017	8	4	2	1	0	
4	16.06.2017	19	17	15	7	6	4
5	20.12.2017	9	7	6	4	3	2
6	20.01.2019	3	0				
7	14.03.2019	1					
8	21.10.2020	44	39	28	25	16	10
1999–2014							
Среднее арифметическое		17	13	12	7	5	5
Стандартное отклонение		±9	±11	±10	±7	±6	±6
Медиана		16	9	8	5	3	3
1999–2020							
Среднее арифметическое		17	13	12	8	5	5
Стандартное отклонение		±10	±11	±10	±7	±6	±5
Медиана		16	10	10	5	3	3

Примечание. Если в таблице указано $\Delta t = 0$, это означает выход U на пороговый уровень непосредственно в день извержения, то есть формально не является предвестником и не может использоваться при прогнозировании.

Эффективность по методике А.А. Гусева J_G [1] определяется для каждого конкретного порогового значения u по формуле

$$J_G = \frac{N_+}{N \cdot \frac{T_{alarm}}{T}},$$

где T – общее время мониторинга сейсмической обстановки методике;
N_+ – количество случаев успешного прогноза за время T;
N – общее количество извержений, произошедших за время T;
T_{alarm} – общее время тревоги (суммарная длительность всех промежутков времени, в которых действовал прогноз по оцениваемому методу в течение общего времени мониторинга).

Знаменатель дроби отражает среднее число возникновения извержений за время T_{alarm} в случае отсутствия связи прогнозов с извержениями. Соответственно, эффективность J_G показывает, во сколько раз количество спрогнозированных извержений превышает число попавших в «тревожное» время случайным образом. При случайном угадывании эффективность J_G равна 1.

Эффективность по методике Г.М Молчана

Другим способом оценки эффективности являетя построение диаграммы Молчана для различных величин порога u. На диаграмме Молчана [5] абсцисса точки определяется как мера тревоги $\tau = \frac{T_{alarm}}{T}$, а ордината – как доля пропусков цели ν: $\nu = 1 - \frac{N_+}{N}$. Диагональ диаграммы Молчана $\tau + \nu = 1$, соединяющая точки (0; 1) (точка «оптимиста») и (1; 0) (точка «пессимиста») соответствует случайному прогнозу. Для этой диагонали можно построить доверительный интервал с заданной значимостью α. В нашем случае представляет интерес только нижняя ветвь этого доверительного интервала. Для всех рассматриваемых случаев экспериментальные точки (τ, ν) лежат

ниже этой ветви, что интерпретируется как высокая степень надежности выявленной связи аномалий (превышение U порогового значения u) с происходящими извержениями.

Эффективность предвестника J_M определяется как $J_M = 1 - \nu - \tau$. Для случайного прогноза $J_M = 0$, а для идеального (без пропуска цели и с нулевым временем тревоги) – $J_M = 1$.

Таблица 3. Параметры прогностической методики.

Порог u_i	Время тревоги T_{alarm}, сут.	Число успешных прогнозов N_+	Надежность предвестника R	Достоверность предвестника V	Эффективность по Гусеву J_G	Эффективность по Молчану J_M
1.0	1764 / 2041	20 / 28	0.95 / 0.97	0.32/0.35	3.1 / 3.8±0.7	0.65 / 0.71
1.1	992 / 1184	18 / 25	0.86 / 0.86	0.30/0.33	5.0 / 5.8±1.2	0.68 / 0.71
1.2	778 / 917	18 / 23	0.86 / 0.79	0.33/0.34	6.3 / 6.9±1.4	0.72 / 0.68
1.3	548 / 642	16 / 21	0.76 / 0.72	0.34/0.37	8.0 / 9.0±1.9	0.67 / 0.64
1.4	405 / 466	16 / 20	0.76 / 0.69	0.44/0.47	10.8 / 11.9±2.6	0.69 / 0.63
1.5	304 / 3 53	16 / 20	0.76 / 0.69	0.59/0.63	14.4 / 15.7±3.4	0.71 / 0.65
1.6	228 / 263	13 / 17	0.62 / 0.59	0.48/0.52	15.6 / 17.9±4.2	0.58 / 0.55
1.7	169 / 195	11 / 14	0.52 / 0.48	0.42/0.47	17.8 / 19.8±5.1	0.49 / 0.46
1.8	112 / 137	11 / 14	0.52 / 0.48	0.55/0.58	27 / 28±7	0.50 / 0.47
1.9	79 / 100	9 / 12	0.43 / 0.41	0.60 / 0.67	31 / 33±9	0.41 / 0.40
2.0	58 / 75	8 / 11	0.38 / 0.38	0.67 / 0.73	37 / 41±11	0.37 / 0.37

Примечание: Суммарное время мониторинга – $T = 8\,016$ суток (21.01.1999 – 1.01.2021). Общее число извержений – $N = 29$. Время тревоги T_{alarm} рассчитывалось для каждой аномалии (превышение значением U порога u) как временной интервал между сигналом тревоги (начало аномалии) и моментом извержения (для реализовавшегося предвестника) или снятием тревоги (конец аномалии).

Заключение

Разработанная ранее [3] полностью формализованная методика прогнозирования извержения вулкана Безымянный на основе статистической оценки уровня сейсмичности «СОУС'09» показала свою работоспособность в режиме реального времени: выявлена подготовка всех извержений вулкана Безымянный в 2015–2020 гг.

Перерасчет всех характеристик методики показал их устойчивость при добавлении новых данных, что позволяет использовать методику и далее без изменений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

Список литературы

1. *Гусев А.А.* Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109–119.

2. *Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.

3. *Салтыков В.А.* Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. № 3. С. 45–59.

4. *Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40. DOI: 10.7868/S0203030613010021.

5. *Molchan G.M.* Strategies in strong earthquake prediction // PEPI. 1990. V. 61. P. 84–98.

УДК 550.34.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ВИБРОПРОСВЕЧИВАНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ПОСТРОЙКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА

Сапетина А.Ф. [1, 2]***, Глинский Б.М.*** [1, 2]***, Мартынов В.Н.*** [1]

[1] *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, afsapetina@gmail.com*
[2] *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*

Введение

Сейсмология вулканов в настоящее время значительно продвинулась в изучении и прогнозировании катастрофических явлений, чему способствовало развитие суперкомпьютеров и детальное изучение многих извержений разных типов и размеров. И все же, несмотря на необычайное увеличение количества и точности исследований, нет гарантированного метода прогнозирования извержений вулканов. А поскольку, это так, то целесообразно рассмотреть другие способы прогнозирования вулканической деятельности.

В настоящее время сейсмические методы изучения вулканических структур различаются в зависимости от используемых источников возбуждения и подразделяются на активные и пассивные. Большое количество работ посвящены пассивной сейсмике, когда источником возбуждения являются процессы, происходящие в каналах и магматических очагах. В работе [13] приведена классификация источников кодовых волн для предсказания извержения вулкана, которая была впервые применена для горы Сент-Хеленс. Автор отмечает, что для прогнозирования извержений важно иметь фоновую выборку продолжительностью в несколько лет с сети сейсмостанций. Особенно важны записи сигналов до того, как вулкан начинает пробуждаться. Кроме того, важны записи с трехкомпонентных широкополосных сейсмометров в широком амплитудном диапазоне.

Особое место в исследовании строения вулканических структур занимает сейсмическая томография, когда в качестве источников в большинстве случаев используются землетрясения. Его применение к вулканической среде позволило получить изображения с высоким разрешением таких вулканических структур как, например, вулкан Ключевской [9] и др. Следует отметить, что такой метод применим только в районах с длительными наблюдениями с использованием плотных постоянных сетей и довольно однородной непрерывной сейсмической активностью.

Эти проблемы частично исчезают при проведении сейсмического эксперимента с активным источником, основанным на искусственных сейсмических сигналах, зарегистрированных плотной сетью сейсмических станций, работающей в течение относительно короткого периода времени. Для вулканических регионов расположенных близко к морю, активными источниками выступают выстрелы из пневматической пушки. На суше в качестве таких источников использовались искусственные взрывы известные по времени и мощности. Однако взрывы не являются повторяющимися источниками и при этом слишком дороги и малоприменимы в вулканических регионах, что тоже делает их непригодными для целей мониторинга.

В Сибирском отделении СО РАН на протяжении нескольких лет разрабатывались методы и инструменты для вибросейсмического просвечивания Земли. Были разработаны мощные источники возбуждения упругих колебаний, системы регистрации, поставлено множество полевых экспериментов. Наиболее полно результаты исследований изложены в монографиях [2, 12]. Разработка мощных вибросейсмических источников позволила реализовывать более широкие возможности по глубинному зондированию Земли. Достигаемый эффект позволяет говорить о приближении этого метода сейсмологии по разрешающей способности исследования строения земной коры и мониторинга очаговых и вулканических зон к разрешающей способности сейсмической разведки. Можно отметить высокую амплитудную и фазовую идентичность сигналов от мощных вибраторов, позволяющую регистрировать лунно-солнечные вариации [5].

В статье предложен подход по изучению вулканических структур и проведения активного мониторинга с применением мощных прецизионных источников сейсмического изучения. Поскольку такого типа экспериментальные работы являются дорогостоящими, то их целесообразно применять на этапе, когда вышеперечисленными пассивными методами выявлены признаки готовящегося извержения, с целью более детального изучения очага извержения, расположения и формы

выводящих каналов. В данной работе приведены результаты математического моделирования вибропросвечивания вулканических структур в рамках такого подхода на примере вулкана Эльбрус.

Моделирование гетерогенных сред на основе уравнений теории упругости

Для создания реальных систем наблюдения с использованием активного вибропросвечивания требуется проведение предварительного и сопутствующего численного моделирования процессов происходящих внутри вулканической структуры для идентификации существующих предположений о внутреннем строении вулканической структуры и интерпретации сигналов (сейсмограмм), полученных в ходе мониторинга.

Численное моделирование распространения сейсмических волн в упругих неоднородных средах проводится на основе решения полной системы уравнений теории упругости с соответствующими начальными и граничными условиями в постановке для вектора скоростей $\vec{u} = (U, V, W)^T$ и тензора напряжений $\vec{\sigma} = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz})^T$. В качестве области моделирования рассматривается 3D изотропная неоднородная упругая среда со сложной геометрией. Расчетная область представляет собой параллелепипед. На плоскости $z = 0$ реализуются граничные условия для свободной поверхности. Основные уравнения решаемой системы теории упругости в векторной форме могут быть представлены в следующем виде:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = [A]\vec{\sigma} + \vec{F}(t, x, y, z), \quad \frac{\partial \vec{\sigma}}{\partial t} = [B]\vec{u}, \tag{1}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}, \qquad B = \begin{bmatrix} (\lambda+2\mu)\frac{\partial}{\partial x} & \lambda\frac{\partial}{\partial y} & \lambda\frac{\partial}{\partial z} \\ \lambda\frac{\partial}{\partial x} & (\lambda+2\mu)\frac{\partial}{\partial y} & \lambda\frac{\partial}{\partial z} \\ \lambda\frac{\partial}{\partial x} & \lambda\frac{\partial}{\partial y} & (\lambda+2\mu)\frac{\partial}{\partial z} \\ \mu\frac{\partial}{\partial y} & \mu\frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ \mu\frac{\partial}{\partial z} & 0 & \mu\frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \mu\frac{\partial}{\partial z} & \mu\frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix},$$

где t — время, $\rho(x, y, z)$ — плотность, $\lambda(x, y, z)$, $\mu(x, y, z)$ — параметры Ламе.

Начальные и граничные условия на свободной поверхности имеют вид:

$$\vec{\sigma}\,|_{t=0} = 0, \ \vec{u}\,|_{t=0} = 0, \ \sigma_{xz}\,|_{z=0} = 0, \sigma_{yz}\,|_{z=0} = 0, \sigma_{zz}\,|_{z=0} = 0. \tag{2}$$

В работе для численного моделирования сейсмического поля используются известные конечно-разностные схемы на сдвинутых сетках 2-го порядка аппроксимации по времени и 2-го и 4-го порядка аппроксимации по пространству для решения 2D и 3D задач. Алгоритмы на их основе хорошо адаптируются для параллельной программной реализации на многоядерных архитектурах. При этом для исключения влияния отражений упругих волн от границ расчетной области во внутреннюю часть применяется метод поглощающих границ CSF-PML. При численной реализации уравнений каждая из границ модельной области, за исключением свободной поверхности, окружается поглощающим слоем. Во внутренней части волновое поле рассчитывается по первоначальным конечно-разностным уравнениям, а в поглощающих слоях происходит расчет по формулам с демпфирующими параметрами [8].

На основе таких методов были разработаны комплекс параллельных алгоритмов и программ [15]. Он адаптирован к кластерам, оснащенным мощными многоядерными процессорами и графическими ускорителями. Основными технологиями для реализации параллельных вычислений служат MPI и CUDA. Разработанный комплекс программ имеет высокую масштабируемость порядка 80% и эффективно использует особенности архитектуры многоядерных процессоров и графических ускорителей [6]. Проведенные эксперименты показали, что расчет полномасштабной 3D модели на узлах гибридного кластера ССКЦ ИВМиМГ СО РАН длится несколько часов, а время расчета 2D модели всего около получаса на одном графическом ускорителе.

Результаты численного моделирования вибропросвечивания вулкана Эльбрус

Двуглавый вулкан Эльбрус находится на северном склоне Большого Кавказа. Из-за своего географического положения он как бы «нависает» над плотно заселенными районами Северного Кавказа, прилегающими территориями юга России и севера Грузии. На основе данных из работ [1, 7, 14] были построены приближенные геолого-геофизические модели внутреннего строения вулкана Эльбрус с различной формой магматических камер. Модели представляет собой многослойную среду с магматическими включениями. Параметры слоев взяты из монографии [4] и представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры слоев для приближенной модели внутреннего строения вулкана Эльбрус.

	Глубина, км	*Vp*, км/с	*Vs*, км/с	ρ, г/см^3		Глубина, км	*Vp*, км/с	*Vs*, км/с	ρ, г/см^3
Слой +II	+2 − +5	2.85	1.65	2.4	Слой III	6 − 11	6.22	3.59	2.62
Слой +I	0 − +2	3.1	1.79	2.66	Слой IV	11 − 15	5.82	3.37	2.7
Слой I	0 − 1	3.2	1.82	2.7	Слой V	15 − 22	5.97	3.45	2.75
Слой II	1 − 6	5.9	3.42	2.85	Магма		2.2	0	2.1

Первая модель форма магматической камеры построена на основе модели вулкана центрального типа с эллипсовидным магматическим очагом с осями 9 и 6 км. Другая модель магматической камеры предложена в работе [3]. Согласно предположениям авторов, очаг имеет форму конуса, обращенного вершиной наверх, нижняя граница корового очага составляет приблизительно от 8 до 15 км ниже уровня моря. Диаметр верхнего канала 130 м, а диаметр канала, соединяющего верхний и материнский магматический очаги 260 м.

Рассмотрим вариант мониторинга верхней магматической камеры вулкана Эльбрус с системой наблюдения, установленной в штольне Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН. Штольня находится в поселке Нейтрино в вырубке горы Андырчи, и имеет протяженность более четырех километров [4]. Расстояние от вершины Эльбруса 22 км. В штольне БНО Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН была впервые развернута и испытана в непрерывном режиме линейная сейсмическая группа апертурой 2.5 км, состоящая из шести трехкомпонентных сейсмоприемников СК-1П [10]. Результаты работы по регистрации слабых сейсмических событий показали, эффективность использования такой группы для мониторинга микросейсмической активности и активного вибросейсмического мониторинга района вулкана Эльбрус с целью определения областей активизации сейсмических процессов связанных с геодинамикой магматического очага вулкана [11].

Наличие соответствующих дорог позволяет предполагать возможность размещения вибратора на противоположной стороне вулкана в районе долины Битик-Тюбю на расстоянии около 9 км от вершины Эльбруса и 30 км от системы наблюдения в штольне БНО. При этом предположительное место размещения вибратора находится практически на одной линии с вершиной Эльбруса и штольней БНО. В качестве источника можно использовать передвижной вибратор ЦВ-40, разработанный в Сибирском отделении РАН. Он развивает вибрационные усилия в 40–50 тонн и имеет рабочий диапазон 5–15 Гц.

Рассчитаны мгновенные снимки волнового поля в различные моменты времени для модели с эллиптической камерой (А) и для модели с конусовидной камерой (В). Для анализа информации о включениях, приходящей на приемники, исключаем влияние слоев на волновое поле, вычитая из полученного расчетного поля для случаев А и В результаты расчета для слоистой среды без включений. Результаты этой манипуляции приведены на рис. 1 (мгновенные снимки волнового поля) и рис. 2 (теоретические сейсмограммы). Из снимков видно, что волновое поле имеет сложную картину с существенным влиянием формы камеры на форму проходящих через нее волн. Также отметим, что в случае эллиптической камеры (А) мы наблюдаем на сейсмотрассах приход волны отразившейся от нижней границы эллипса, а в случае конусовидной камеры (В), на приемники приходит большое количество волн отразившихся от верхних точек дифракции камеры и распространяющихся внутри двух верхних слоев.

Представленные эксперименты показывают, что численное моделирование может дать значительную информацию для организации проведения натурных экспериментов и интерпретации результатов экспериментальных наблюдений, полученных в ходе вибросейсмического мониторинга.

Заключение

В работе обсуждается возможность применения мощных низкочастотных вибраторов, разработанных в Сибирском отделении РАН, для глубинного просвечивания и наблюдений за вулканической деятельностью. Предложен подход к математическому моделированию сейсмических полей в вулканических структурах при мониторинге катастрофических явлений с использованием вибраторов в качестве источников возбуждения упругих колебаний. В работе представлены 2D и 3D геофизические модели внутренней структуры и результаты моделирования сейсмического поля для магматического вулкана Эльбрус. Предложен вариант мониторинга верхней магматической камеры вулкана с системой наблюдения, установленной в штольне Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН и вибратором, установленным на противоположной стороне Эльбруса. На основе проведенной исследовательской работы показана целесообразность и возможность применения активного мониторинга для вулканических структур с использованием вибраторов в дополнение к существующим методам.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта с ИВМиМГ СО РАН (0251-2021-0005) при частичной финансовой поддержке разработки программного комплекса Российским Фондом Фундаментальных Исследований (коды проектов 20-41-540003, 19-07-00085).

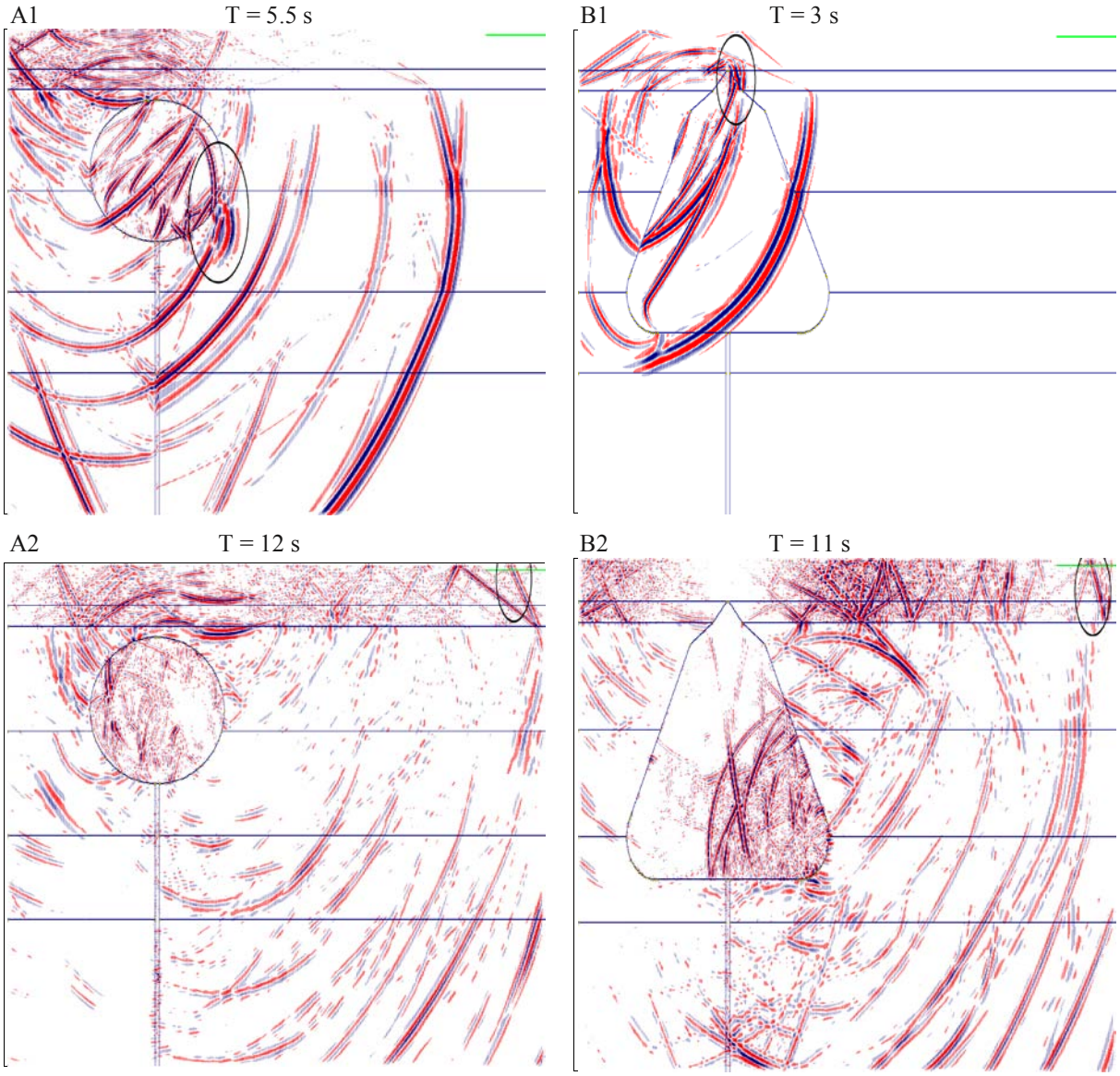


Рис. 1. Разница между мгновенными снимками компоненты *u* волнового поля для слоистой среды с магматическими включениями и без них в различные моменты времени. A – эллипсовидная камера, B – конусовидная камера. Зеленой линией отмечено расположение линейки приемников. Отмечены зоны выхода волны из магматической камеры и приход этих же волн в район системы наблюдения.

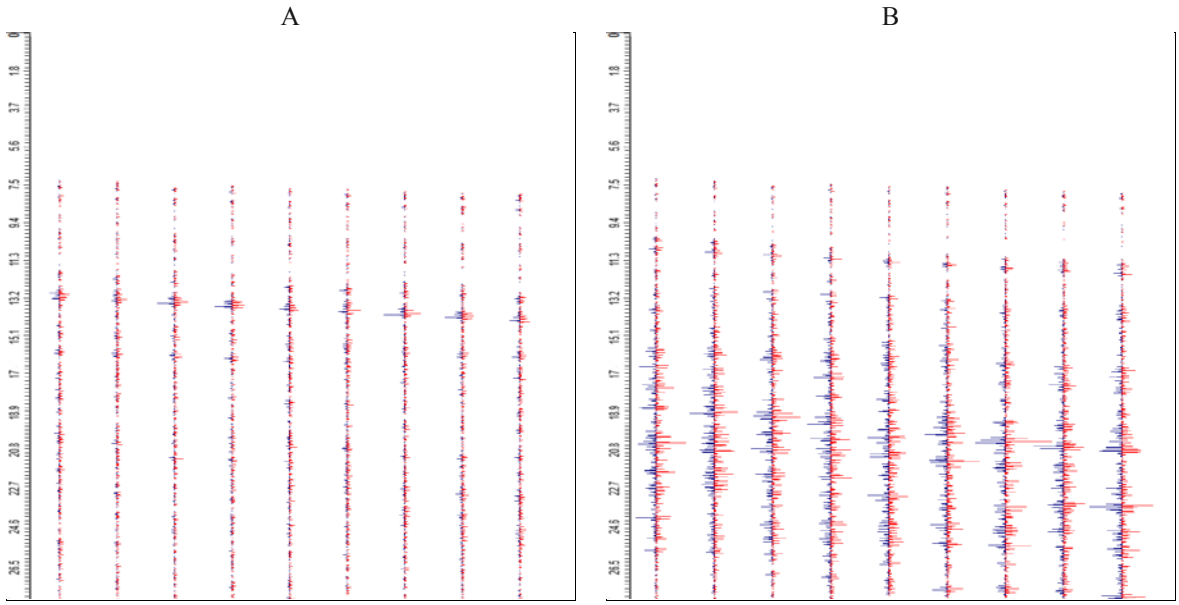


Рис. 2. Разницы между теоретическими сейсмограммами компоненты *u* для слоистой среды с магматическими включениями и без них с линейки приемников соответствующей штольне БНО. А – эллипсовидная камера. В – конусовидная камера.

Список литературы

1. *Авдулов М.В.* О геологической природе Эльбрусского гравитационного минимума // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 1993. № 3. С. 32–39.

2. *Алексеев А.С. и др*. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2004. 387 с.

3. *Богатиков О.А. и др.* Природные процессы на территории Кабардино-Балкарии. М.: ГУП ППП «Наука», 2004. 438 с.

4. *Собисевич А.Л.* Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. М.: ИФЗ РАН, 2012. 512 с.

5. *Glinskii B.M., Kovalevsky V.V., Khairetdinov M.S.* Relationship of wave fields from powerful vibrators with atmospheric and geodinamic processes // Russian Geology and Geophysics. 1999. Vol. 40(3). pp. 422–431.

6. *Glinskiy B.M., Sapetina A.F., Martynov V.N., Weins D.V., Chernykh I.G*. The Hybrid-Cluster Multilevel Approach to Solving the Elastic Wave Propagation Problem // Communications in Computer and Information Science. 2017. Vol. 753. pp. 261–274.

7. *Gurbanov A.G., Gazeev V.M., Bogatikov O.A. et al.* Elbrus active Volcano and its geological history // Russian Journal of Earth Sciences. 2004. Vol. 6(4). pp. 257–277.

8. *Komatitsch D., Martin R.* An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation // Geophysics. 2007. Vol. 72(5). pp. 1SO-Z83.

9. *Koulakov I., Gladkov V., El Khrepy S., Al-Arifi N., Fathi I. H.* Application of repeated passive source travel time tomography to reveal weak velocity changes related to the 2011 Tohoku-Oki Mw 9.0 earthquake // Journal of Geophysical Research. 2016. Vol. 121(6). pp. 4408–4426.

10. *Kovalevsky V.V.* Characteristics of underground seismic array in Elbrus region // Research and technology review National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. 2013. Vol. 2(54). pp. 18–23.

11. *Kovalevsky V.V., Belonosov A.S., Avrorov S.A., Yakimenko A.A.* Localization of seismic events by underground seismic array in Elbrus region // Research and technology review National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan. 2014. Vol. 2(58). pp. 123–128.

12. *Kovalevsky V.V., Glinskiy B.M., Khairetdinov M.S., et al.* Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results // Active Geophysical Monitoring. Amsterdam: Elsevier, 2020. pp. 43–65.

13. *McNutt S.R.* Seismic Monitoring // Encyclopedia of Volcanoes, San Diego: Academic Press, 2000. pp. 1095–1119.

14. *Milyukov V., Myasnikov A., Mironov A.* Monitoring the State of the Magmatic Structures of Elbrus Volcano Based on Observation of Lithosphere Strains // AIP Conference Proceedings. 2008. Vol. 1022. pp. 405–408.

15. *Sapetina A.F*. Supercomputer-aided comparison of the efficiency of using different mathematical statements of the 3D geophysical problem // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. 2016. Vol. 18. pp. 57–66.

УДК 550.34

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МАГМАТИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В РАЙОНЕ АВАЧИНСКОЙ - КОРЯКСКОЙ – ДЗЕНЗУР – ЖУПАНОВСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ ЮГА - ВОСТОКА КАМЧАТКИ ПО ПАРАМЕТРУ V_P/V_S

Славина Л.Б., Кучай М.С.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия
slavina@ifz.ru

Введение

По данным региональных землетрясений проведен анализ кинематического параметра *TAU*, аналога параметра V_P/V_S, Юго-Восточного сегмента Камчатки.

Для расчета параметра использованы региональные (локальные) землетрясения, включая вулканические, в районе Авачинско-Корякской и Дзензур-Жупановской группы вулканов, произошедшие за период времени с 2009 г. по июнь 2020 г., зарегистрированные сетью телеметрических сейсмических станций и обработанные КФ ФИЦ ЕГС РАН [20, 21] по программе минимизации Дрознина Д.В. [5]. Исходные данные, используемые для расчета параметра V_P/V_S, переопределению не подвергались.

Параметр V_P/V_S рассчитывался аналитически по данным времен пробега *P*-волн и разности вступления *P*- и *S*-волн – $T_{S\text{-}P}$ от региональных землетрясений. Методика расчета параметра описана в [18]. Единичные значения параметра рассчитываются по формуле:

$$V_P/V_S = T_{S\text{-}P} / (T_P - t_0) + 1. \quad (1)$$

Величина отношение скоростей V_P/V_S определяется упругими свойствами среды.

В теории упругости закон Гука выражает линейную зависимость между тензором деформации ε и тензором напряжений σ в упругой среде:

$$\sigma = 2\mu\varepsilon + \lambda Tr(\varepsilon)\, I. \quad (2)$$

Отношение скоростей *P*- и *S*- волн – V_P/V_S – связано с упругими параметрами среды и может быть выражено через параметры Ламе μ, λ.

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}}\,. \quad (3)$$

Из (3) в частности следует, что когда упругие параметры Ламе μ, λ равны, V_P/V_S равно корню из 3, т.е. ~1.73. Значения равные 1.73 считаются нормальными для исследуемой геологической среды [12, 19]. Появление пониженных и повышенных значений параметра относительно значения 1.73 свидетельствует об изменении состояния геологической среды. Напряженного состояния, физических параметров, в том числе температуры, давления. Значения $V_P/V_S < 1.68$ – считались пониженными, $V_P/V_S > 1.78$ – повышенными. Появление пониженных значений связываются с развитием процессов растяжения, дилатансии в среде, повышенных – с процессами сжатия, компакции [3, 12].

Сейсмотектоническое положение района исследования

Район исследования расположен в Юго-Восточном сегменте Камчатки. Включает территорию от южного завершения Центральной Камчатской Депрессии (ЦКД), Ганальского хр. на СЗ, прибрежные участки Тихоокеанского побережья от бухты Русской на юге, до Налачевского мыса на СВ. Вулканические структуры – действующие вулканы Вилючинский, Авачинский, Корякский, Дзензур, Жупановский. А также потухшие вулканические образования – вулканы Арик, Ааг, Купол, Вершинский. Многочисленные региональные землетрясения, регистрируемые Геофизической службой КФ, как в фокальном слое, так и в земной коре Камчатки, свидетельствуют о том, что, при поддвигании и погружении под Камчатку Тихоокеанской плиты, ее земная кора деформируется. Об этом же свидетельствует большое количество активных разломов. Распределение землетрясений по площади и глубине демонстрирует погружение фокального слоя под Камчатку, включая, и под вулканические постройки. Район исследования показан на рис. 1.

На карту района исследования нанесены региональные землетрясения, как коровые, так и в фокальном слое, произошедшие за период 2009–2020 гг. энергетического класса $K_S \geq 7$.

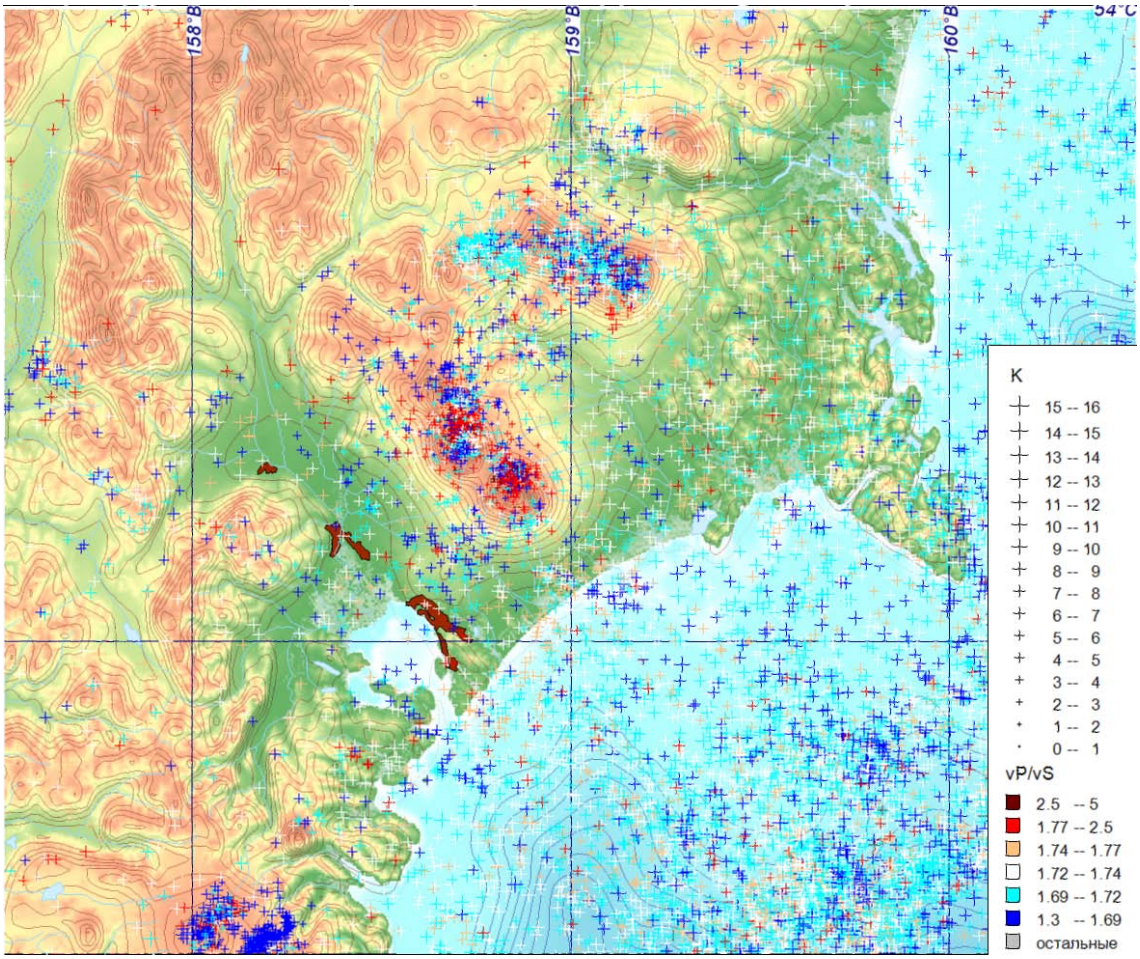


Рис. 1 Карта района исследования, показано распределение региональных землетрясений по площади в области вулканических построек, в коре и фокальном слое. Окраска в соответствии со значениями параметра V_P/V_S (см. условные обозначения).

С тектонической точки зрения это район перехода от Центральной Камчатки к Южной. Завершения ЦКД, где она резко сужается и меняет свое простирание с ССВ на субмеридиональное, (Быстринский грабен) и где, образуя граничную между Центральной и Южной Камчаткой структуру, протягивается в северо-западном направлении, т.н. Петропавловск-Малкинская (Начикинская) «зона поперечных дислокаций» [4, 7].

Простирание вулканических групп Авачинско-Корякской и Жупановско-Дзензурской – СЗ-ЮВ, т.е. вкрест основных Камчатских структур, имеющих простирание СВ-ЮЗ. Большое влияние на сейсмотектонику района оказывает погружающаяся под Камчатку Тихоокеанская плита, фокальный слой землетрясений – слой субдукции. Геология и тектоника этого района изучалась многими исследователями. «Налачевскую купольно-кольцевую структуру» выделяет Масуренков Ю.П. [9], к которой он относит вулканические структуры Авачинский, Корякский, Ааг, Арик, Вершинский, Купол, Дзензур и Жупановский. Разломную структуру, т.н. Петропавловск-Малкинская (Начикинская) «зона поперечных дислокаций», которая протягивается в северо-западном направлении, граничную между Центральной и Южной Камчаткой выделяют [4, 6, 7]. Представления геологов, обобщенно, показаны на рис. 2.

В области Авачинско-Корякской группы вулканов были проведены геофизические исследования методами ГСЗ и КМПВ [1], и геоэлектрические [10, 11]. Последние проводились в области сочленения Срединного Камчатского массива, Ганальского выступа и ЦКД.

Характер распределения параметра V_P/V_S в земной коре, фокальном слое и вулканических постройках исследуемого района

Рассматривался характер распределения параметра V_P/V_S в земной коре, в области вулканических построек и в погружающемся под Камчатку фокальном слое с учетом сейсмотектонических особенностей, описанных выше. Распределение параметра по площади района исследования представлено на карте. рис. 1. Цветом показаны значения параметра V_P/V_S.

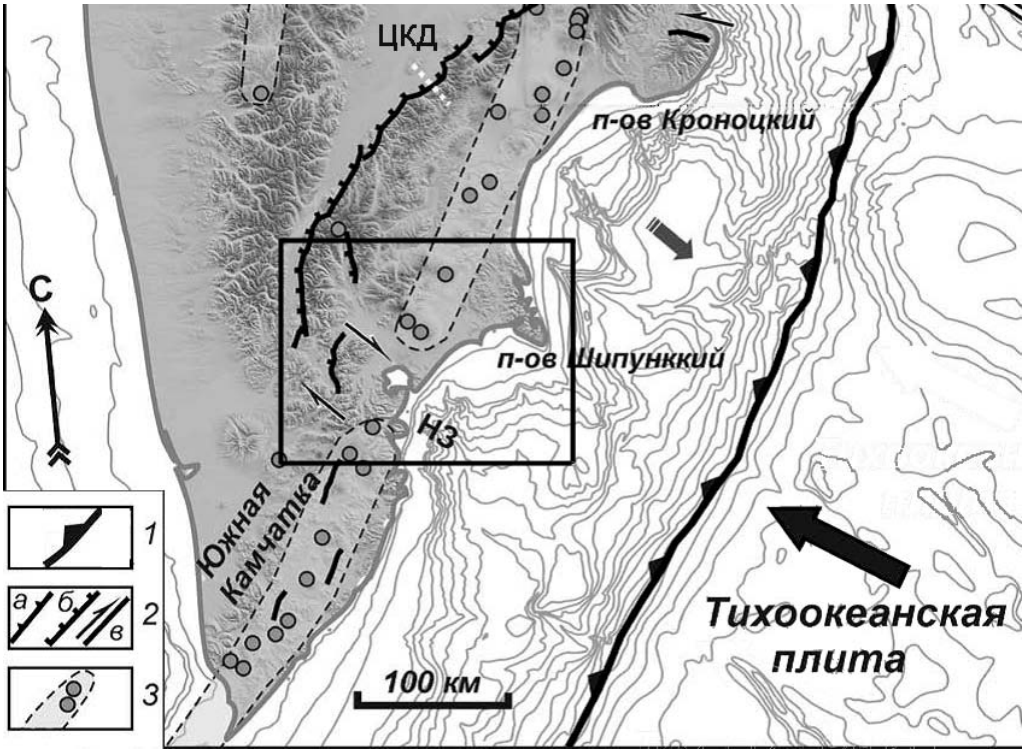


Рис. 2. Карта-схема основных тектонических активных структур Камчатки по Кожурину А.И. [6]. Прямоугольником показано положение района исследования. Условные обозначения: *1* – ось глубоководного желоба (а) и Алеутский трансформный разлом (б); *2* – взбросы-надвиги (а), сбросы (б) и сдвиги (в), *3* – позднечетвертичные вулканические центры и примерные контуры вулканических поясов. ЦКД – Центральная Камчатская депрессия, НЗ – Начикинская зона поперечных дислокаций, большие стрелки – направления относительных движений океанической плиты, востока Камчатки.

Для исследования и оценки отражения состояния геологической среды в поле параметра V_P/V_S построена серия профилей – разрезов по глубине. Разрез по профилю, пересекающему вулканическую Авачинско-Корякскую группу, построен по направлению, совпадающему с профилем ГСЗ и КМПВ по просвечиванию Земной коры, выполненным Балестой С.Т [1]. Отметим, что методика построения разрезов по данным региональных землетрясений отличается от метода построения разрезов ГСЗ и КМПВ. Источники распространения волн от землетрясений располагаются внутри изучаемой среды, в отличие от взрывов, используемых при просвечивании методом ГСЗ. Построение разрезов по данным землетрясений предусматривает осреднение данных землетрясений в окрестности выделенного направления профиля, (при построении разреза осреднение данных землетрясений проводилось в полосе ± 5 км от линии профиля). В этой связи, возможно лишь сравнение границ слоев, наблюдаемых нами на построенных разрезах, с границами, выделенными на разрезах при работах ГСЗ и КМПВ.

Разрез начинается на СЗ, в районе Ганальского выступа метаморфических пород, протягивается на ЮВ к вулканам Корякскому и Авачинскому, далее в направлении на ЮВ, до точки с координатами 53.2 *N*, 159.2 *E*. На разрезе видим четко выделяющиеся две границы – слои, где группируются землетрясения. Окраска гипоцентров землетрясений в соответствии со значениями V_P/V_S. Верхний слой – на глубине ~7 км, нижний – на глубине 10–12 км. Характер значений V_P/V_S пониженный на всем протяжении профиля. На расстоянии ~70 км от начала профиля, при приближении к вулкану Корякский, видим подъем обеих границ до глубин 4–5 км и 7–10 км. Затем, непосредственно под очаговым образованием вулкана Корякский, слои начинают резкое погружение, до глубины 20 км – первый слой, до глубины 25–30 км – нижний слой. От места сочленения

очагового образования с 1-м слоем, слой резко погружается в ЮВ направлении. Так же видны две линии группирующихся событий, типа питающих трубок, в основном пониженных значений, связывающих очаговую область вулкана со 2-ым слоем. Наиболее устойчиво видна трубка, направленная на ЮВ ко 2-ому слою, до глубин 20–25 км. Вероятно, в этой области глубин располагается периферический очаг Корякского вулкана (см. рис. 3). Видим также трубку, направленную на ЮВ, к 1-ому слою. Трубка или столб, по терминологии вулканологов, активна не на всем протяжении. Следует отметить еще одно обстоятельство. На глубине ~5 км четко видна связь очаговой области Авачинского вулкана с очаговой областью Корякского вулкана. Можно предположить по линиям, намеченным землетрясениями с пониженными значениями параметра, что периферический очаг Авачинского вулкана расположен на глубине ~15–20 км. Именно на этих глубинах на разрезе КМПВ отмечена область с повышенными поглощающими свойствами и инверсией скоростей, названный авторами «коровым магматическим очагом» [1].

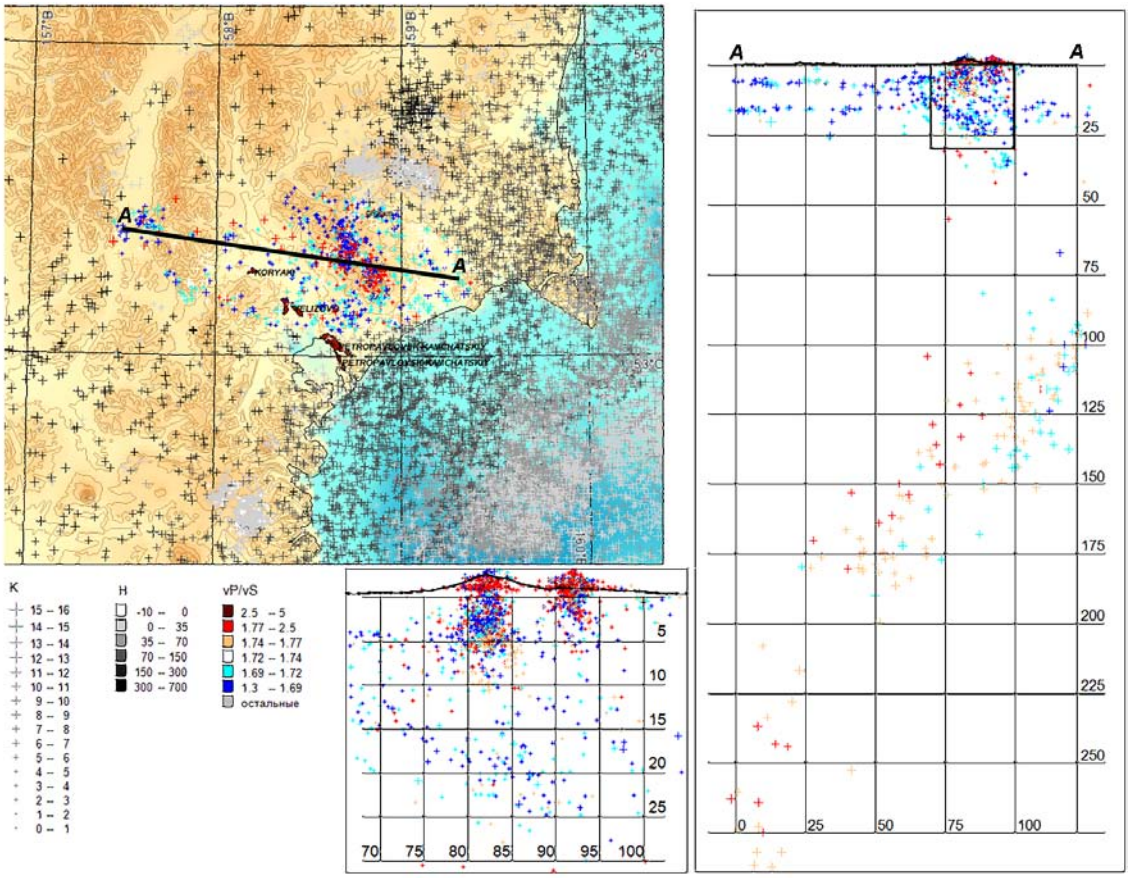


Рис 3. Карта размещения землетрясений с окраской по параметру V_P/V_S и разрезы по профилю АА, соответствующему профилю ГСЗ: а) на всю длину профиля, б) ограничен радиусом ~15 км в окрестности вулканов. Цветовая окраска и размер крестиков согласно условным обозначениям.

На приведенном разрезе по параметру V_P/V_S, кроме описанных выше слоев и распределения параметра в вулканических образованиях, можно также видеть погружающийся под Камчатку фокальный слой. Под вулканами он наблюдается на глубине ~100 км. Отметим, что с океанической стороны наблюдаются пониженные значения параметра, с внутренней Камчатской стороны значения повышенные. Связи питания очаговых зон вулканов Корякского и Авачинского с фокальным слоем на представленных разрезах не наблюдается.

Следующий профиль – разрез ББ построен по цепочке землетрясений, наблюдающихся на (рис. 1, 3), с пониженными значениями V_P/V_S, южнее вулканов, в направлении СЗ-ЮВ. Можно предположить, что цепочка землетрясений с пониженными значениями параметра соответствует одному из разломов поперечной структуры, т.н. Петропавловск-Малкинской (Начикинской) «зоне поперечных дислокаций». Профиль начинается на северо-западе, (практически совпадая с началом профиля по линии АА), от точки с координатами 53.5 *N* 157.5 *E* Ганальского выступа метаморфических пород, протягиваясь на ЮВ, пересекает Авачинскую бухту (Авачинский каньон),

продолжаясь в Авачинский залив, захватывая участок прибрежной зоны Авачинского залива (заканчивается в точке с координатами 52.3 *N* 159.8 *E*). Разрез представлен на рис. 4.

На разрезе видим два слоя, на глубинах 5 и 12 км, аналогично выделенными нами выше (рис. 3). В прибрежной части наблюдается резкое погружение и объединение слоев до глубин 25 км, затем подъем. В заливе слои не наблюдаются. У оконечности профиля, с глубин ~50 км можно видеть фокальный слой, погружающийся под Камчатку до глубин ~150 км. Следует обратить внимание, что на глубинах ~75–120 км наблюдается двойной фокальный слой.

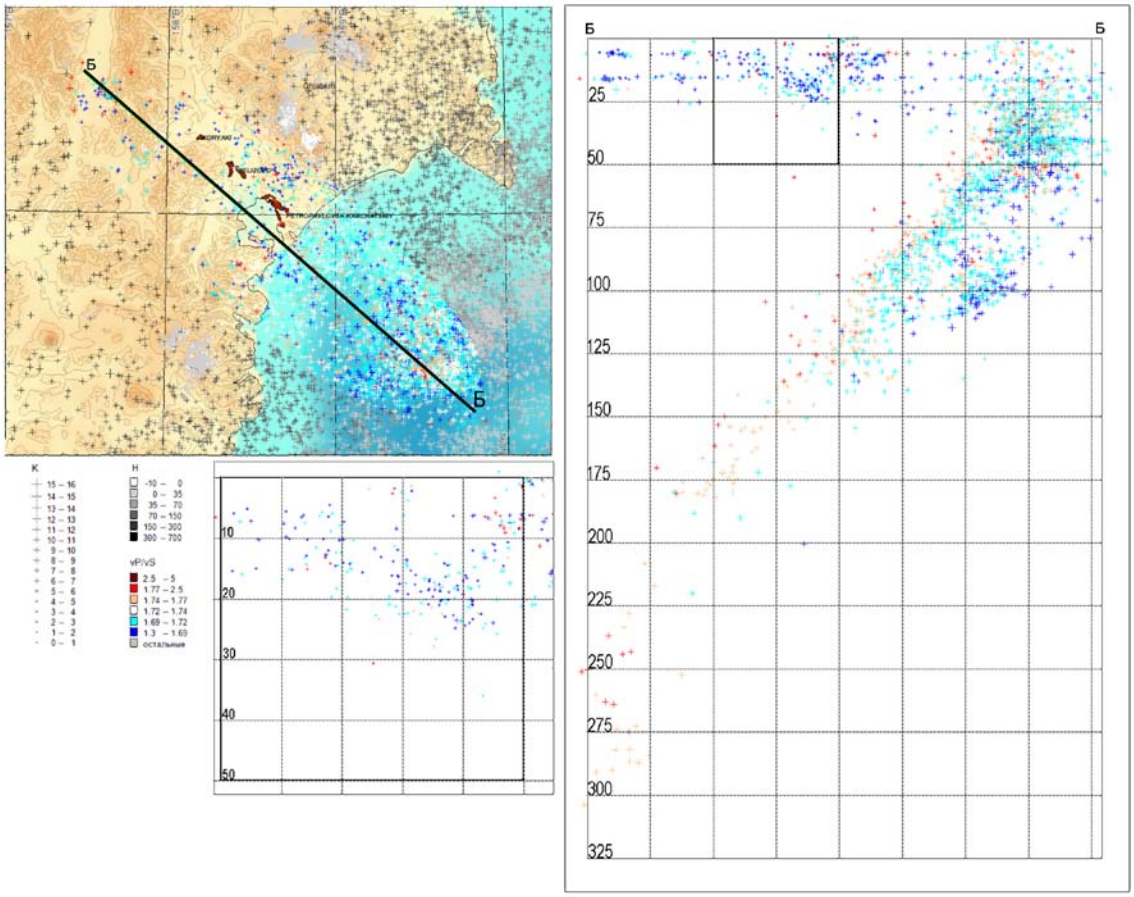


Рис. 4. Карта расположения профиля-разреза ББ и разрезы по глубине. Окраска гипоцентров землетрясений в соответствии со значениями V_P/V_S.

Морские наблюдения методом Непрерывного Сейсмического профилирования (НСП) проводились длительное время у побережья Камчатки, включая район Авачинского залива. Построены акустические разрезы [13–15]. Сравним полученный нами в морской части разрез с разрезом НСП-11 (рис. 5). На профиле НСП видим континентальный склон, резкий спуск в Авачинский каньон, затем подъем на некоторую возвышенность, опускание в котловину залива, и подъем к хр. Шатского. Таким образом, структура построенного нами разреза, наличие слоев-границ в коре на соответствующих глубинах демонстрирует информативность наблюдений параметра V_P/V_S для изучения строения геологической среды, подтверждается разрезами, полученными морскими акустическими наблюдениями методом НСП.

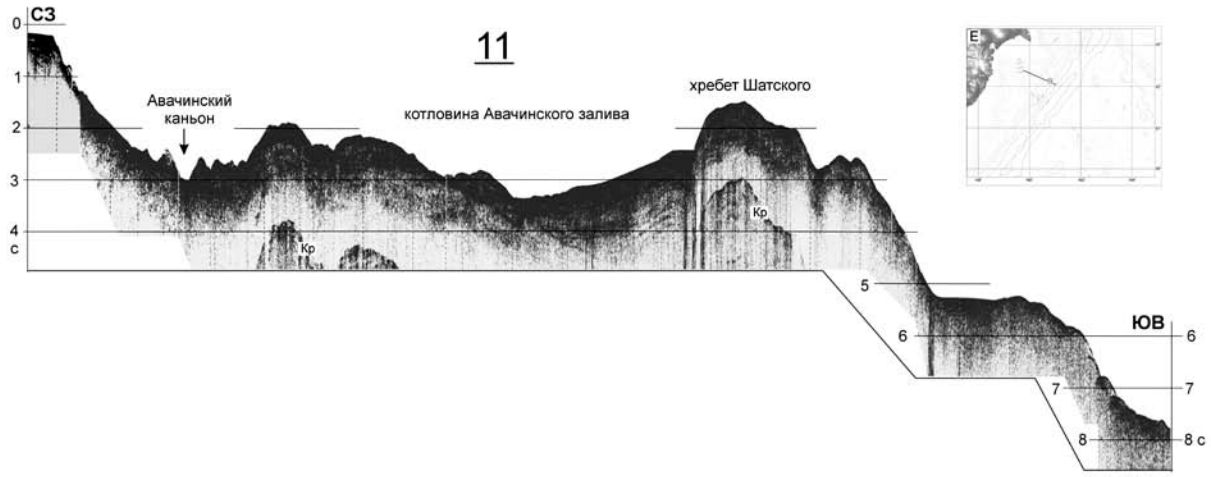


Рис. 5. Акустический разрез в Авачинском заливе, полученный методом НСП по Селиверстову Н.И. [13]. На разрезе указано удвоенное время пробега сигнала.

Следующий профиль-разрез (ВВ) представляет большой интерес, т.к. пересекает исследуемый район с СЗ на ЮВ, включая выделенные геологами значимые тектонические структуры от области завершения ЦКД на СЗ, далее пересекает центр так называемой «Кольцевой структуры» (по Масуренкову Ю.П.), шельфовую зону Авачинского залива, южнее п-ова Шипунский, на ЮВ (рис. 6).

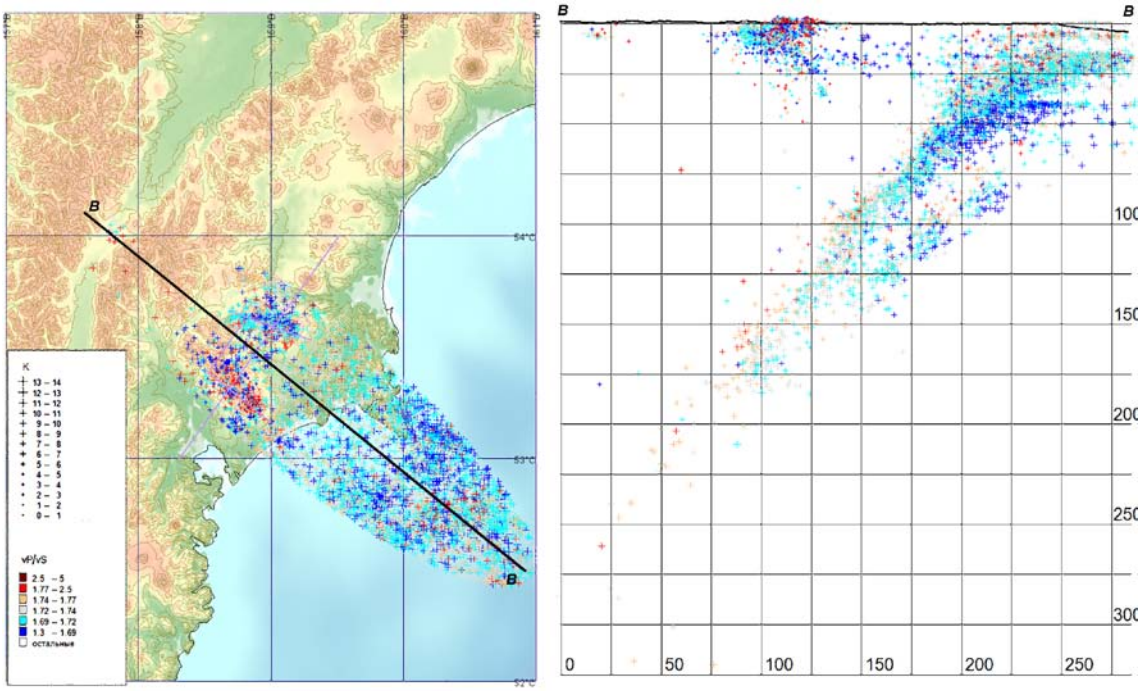


Рис. 6. Расположения профиля-разреза ВВ по направлению СЗ-ЮВ от ЦКД – «Налачевская Купольно-кольцевая структура» – Авачинский залив. Окраска гипоцентров землетрясений в соответствии со значениями V_P/V_S.

На СЗ, в области завершения ЦКД, можно видеть группу событий на глубинах ~3–5 км с повышенными и пониженными значениями параметра. Вероятно, они соответствуют Ганальскому выступу метаморфических пород. Далее на протяжении ~50 км землетрясения отсутствуют. Землетрясения с пониженными значениями V_P/V_S возникают на СЗ границе т.н. «Кольцевой структуры» на продолжении линии Корякской группы вулканов, в области потухших вулканов – Ааг, Арик, Купол, Вершинский. Появляются границы – слои землетрясений на глубинах 5 и 15 км, соответствующие наблюдаемым нами ранее, на приведенных выше рисунках (рис. 3, 4). Под вулканами можно видеть резко погружающийся второй слой до глубин 25–30 км. Следует учесть, что на разрез спроектированы также вулканы Дзензур и Жупановский. Центр «Кольцевой структуры» отмечен группой событий на глубине ~5 км с пониженными значениями параметра. Слой с

пониженными значениями параметра, на глубинах 15 км наблюдается до берегового склона и далее в шельфовую зону. Фокальный слой наблюдается с глубин 40–50 км. Угол наклона слоя около 45°. На разрезе можно видеть двухслойный фокальный слой субдукции в интервале глубин 75–125 км. Пониженные значения параметра наблюдаются от верхней части разреза, глубин 25–30 км до 125–200 км. Повышенные значения, можно видеть на Камчатском борту слоя, что так же было отмечено выше. Дополнительно построен еще один короткий профиль-разрез ГГ, проходящий от вулканического образования Корякской сопки, к вулкану Жупановский, через центр так называемой «Кольцевой Налачевской» структуры (рис. 7).

На разрезе, пересекающим центр т.н. «Кольцевой структуры» по направлению Корякский вулкан – Жупановский вулкан, можно видеть погружение слоя с пониженными значениями параметра в ЮВ направлении, от глубин порядка 5 км вблизи Корякского вулкана, до глубин ~15 км в сторону Жупановского вулкана. Под Жупановским вулканом очаги землетрясений с пониженными значениями параметра наблюдаются на глубинах ~20 км. На разрезе в направлении от Корякского вулкана к центру т.н. «Кольцевой структуры» на глубине ~5 км наблюдается нечетко выраженная цепочка землетрясений, не имеющая продолжения в направлении от центра структуры к Жупановскому вулкану. Выраженного подъема слоев к центру, характеризующих т.н. куполообразную структуру, не наблюдается.

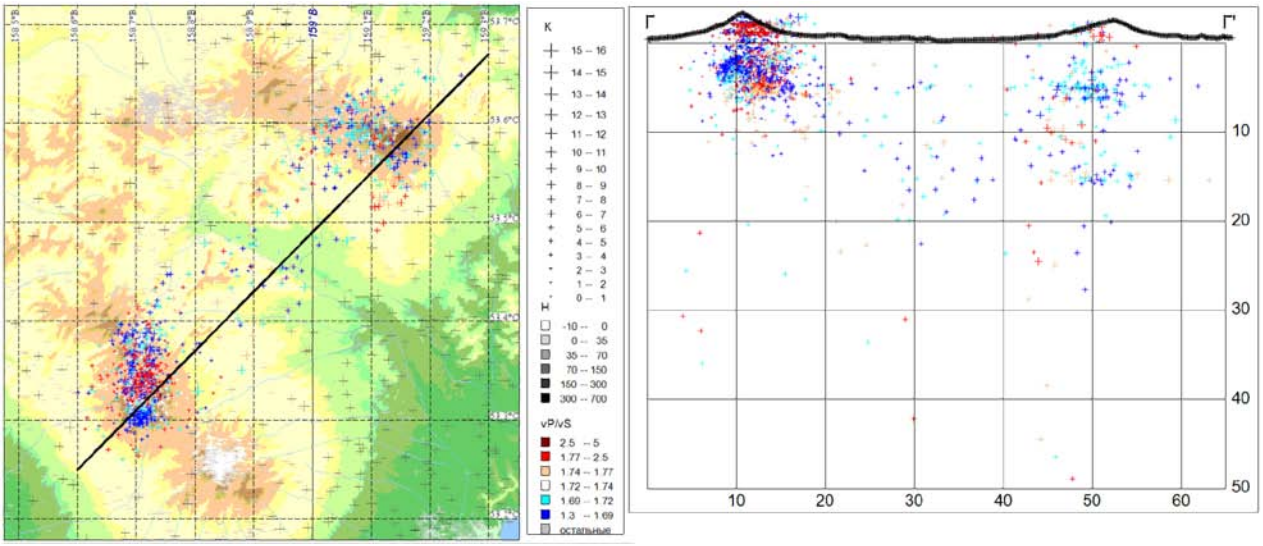


Рис. 7. Карта и разрез по профилю ГГ Корякский вулкан – центр «Налачевской купольной - кольцевой » структуры – вулкан Жупановский. Окраска гипоцентров землетрясений в соответствии со значениями V_P/V_S. Нанесены землетрясения с окраской по параметру V_P/V_S в полосе ± 5 км от профиля.

Обсуждение полученных результатов

Построенные разрезы показывают строение исследуемой области. Достаточно достоверно выделяются границы-слои с группированием вдоль них землетрясений с пониженными значениями параметра. Для интерпретации выделенных нами слоев-границ сравним полученные разрезы с разрезами, построенными по методу ГСЗ [1]. Выявленные нами слои в верхних слоях коры могут быть ассоциированы с границами – меловым фундаментом и границей коромантийной смеси.

Достаточно сложным остается объяснение причины пониженных значений параметра, которые наблюдаются вдоль выделенных нами границ-слоев, поскольку пониженные значения параметра ассоциируются рядом исследователей с увеличением числа открытых трещин-землетрясений, свидетельствующих о растяжении в геологической среде [2, 12]. Можем предположить, что исследованные нами участки Юго-Восточного сектора Камчатки испытывают растяжение. О растяжении Юго-Восточного сектора Камчатки свидетельствует также Кожурин А.И. в работе [6].

Особенности распределения параметра в очаговых областях Корякского и Авачинского вулканов имеют несколько иную термодинамическую причину (природу) [17]. Они показывают области разогрева вулканического вещества – пониженные значения. Участки повышенных значений, выявленные в постройке вулканов, вероятно, могут быть связаны с потерей воды при повышении температуры расплава и уплотнении, закрытии трещин, видимо вода испаряется.

Заключение

В коре исследованного нами Юго-Восточного сектора Камчатки по данным параметра V_P/V_S четко выделяются горизонты-слои с пониженными значениями параметра. Подлинность выделенных нами слоев подтверждается работами по методу ГСЗ и КМПВ. А в прибрежной зоне, в районе Авачинского каньона и Авачинской бухты подтверждаются морскими работами, выполненными методом НСП.

Распределение параметра в очаговых образованиях Корякского и Авачинского вулканов показывают области разогрева вулканического вещества (пониженные значения). Участки повышенных значений, выявленные в постройке вулканов, вероятно, могут быть связаны с потерей воды при повышении температуры расплава и уплотнении, закрытии трещин [8, 16].

Обнаружена связь областей питания вулканов Корякского и Авачинского на глубинах ~5 км.

Выделены подводящие магматические каналы, прорабатывающиеся событиями периодически, не постоянно. Каналы связывают очаговые области вулканов с выделенными слоями и возможными периферическими очагами. Причем они разные у Корякского и Авачинского вулканов.

Приведенные в данной статье структура распределения и значения параметра V_P/V_S в вулканических образованиях, по форме и системе строения вулканических структур, отличаются от приведенных в работе [22], построенных методом сейсмотомографии с применением синтетических симуляций.

Список литературы

1. *Балеста С.Т.* Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 135 с.

2. *Гарагаш И.А.* О хрупком разрушении упругих тел с большим числом трещин. В кн.: Механика тектонических процессов. Алма-Ата: Наука, 1983. С. 61–74.

3. *Гарагаш И.А., Хайдаров М.С.* Модель развития сейсмического процесса в зоне тектонического разлома перед сильным землетрясением // Сейсмологические исследования. 1989. № 11. С. 88–97.

4. Геология СССР. Т. 31. Камчатка, Курильские и Командорские острова. Геологическое описание. М.: Недра, 1964. 733 с.

5. *Дрознин Д.В., Дрознина С.Я.* Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.

6. *Кожурин А.И.* Активные разломы Центральной Камчатки: параметры, сейсмический потенциал // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 29 сентября–7 октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 172–176.

7. *Кожурин А.И., Пономарева В.В., Пинегина Т.К.* Активная разломная тектоника юга центральной Камчатки //Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. № 12 С. 10–27.

8. *Кучай М.С., Славина Л.Б.* Отражение вулканической активности и состояния магматического вещества в кинематическом параметре Vp/Vs вулканических землетрясений района вулканов Толбачик-Удина // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 29 сентября–7 октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 300–306.

9. *Масуренков Ю.П., Комкова Л.А.* Геодинамика и рудообразование в купольно-кольцевой структуре вулканического пояса. М.: Наука, 1978. 274 с.

10. *Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И.* Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 3–10.

11. *Мороз Ю.Ф., Логинов В.А., Улыбышев И.С.* Глубинный геоэлектрический разрез области сочленения Срединного камчатского массива, Ганальского выступа и Центрально-камчатского прогиба // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. № 29. С. 247–256.

12. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.

13. *Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный Мир, 1998. 164 с.

14. *Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.

15. *Селиверстов Н.И.* Подводные морфоструктуры Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск- Камчатский, 2013. 161 с.

16. *Славина Л.Б., Кучай М.С.* Изучение магматических процессов и физико-химических особенностей расплавов вулканических построек Камчатки по данным кинематического параметра Vp/Vs // XXI международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», г. Москва, Россия, 21–23 сентября 2020 г. С. 228–231.

17. *Славина Л.Б., Кучай М.С., Лиходеев Д.В., Сенюков С.Л.* Связь параметра Vp/Vs с состоянием магматического вещества и активностью Северной группы вулканов Камчатки // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18. № 2. С. 28–50.

18. *Славина Л.Б., Мячкин В.В.* Кинематические предвестники сильных сейсмических событий (методика и результаты прогноза землетрясений на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2005. № 3. С. 24–37.

19. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика под редакцией Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с.

20. *Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.

21. *Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеенко Е.А., Чебров Д.В.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21, № 3, С. 66–91.

22. *Bushenkova N., Koulakov I, Senyukov S.L., Gordeev E.I., Hsin–Hua Huang , Sami El Khrepy and Nassir Al Arifi.* Tomographic Images of Magma Chambers Beneath the Avacha and Koryaksky Volcanoes in Kamchatka // Journal of Geophysical Research: Solid Earth.V.124. Iss. 9. September 2019. P. 9694–9713.

УДК 550.343.64

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Сухов Р.Р.

rashid.sukhov@gmail.com

Введение

Когда мы говорим об изучении биологических предвестников стихийных бедствий, сегодня мы уже не должны считать приоритетными исследования, основой которых является просто наблюдение за животными (пусть даже на этих животных установлены современные датчики, сигналы которых можно уловить и из космоса). Результаты подобных исследований предназначены, скорее, для устных преданий, но никак не для научного анализа. Современная система статистических наблюдений может рассказать о поведении животных (человека, в том числе) больше, чем могут рассказать о себе сами животные [1].

Прогностические признаки Назарбекского землетрясения

11 декабря 1980 года, непосредственно у северо-западных границ города Ташкента, произошло землетрясение, известное как Назарбекское землетрясение (рис. 1).

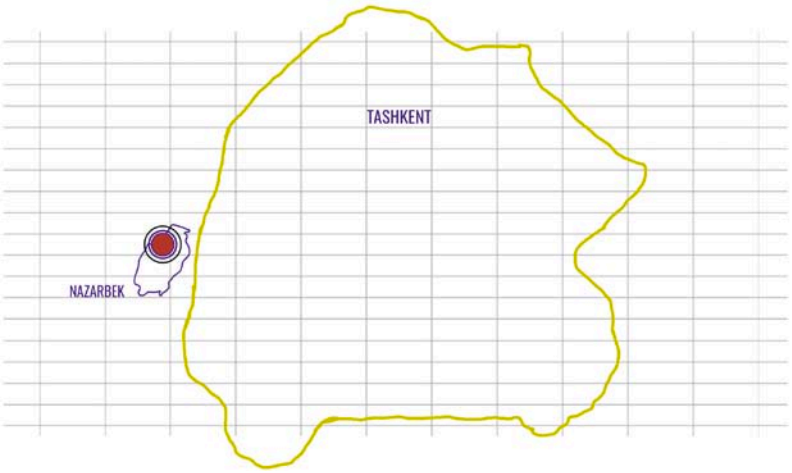


Рис. 1. Назарбекское землетрясение

С целью выявления возможных прогностических признаков предстоящего сейсмического события, были проанализированы данные по вызовам Скорой помощи за период в один год ДО этого землетрясения. Были исследованы статистические данные, как по удаленным подстанциям Скорой помощи, так и по подстанциям непосредственно граничащими с эпицентром (рис. 2).

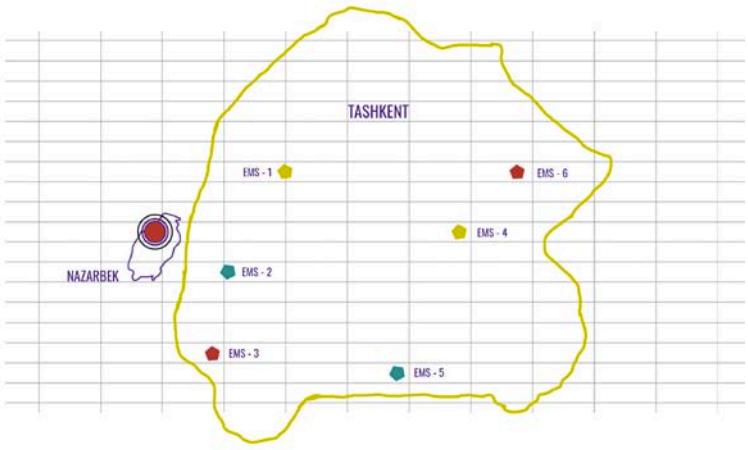


Рис. 2. Расположение подстанций службы Скорой Помощи

Оказалось, что за 11 дней до первого (самого мощного) толчка количество обращений в службу Скорой помощи начало увеличиваться (рис. 3).

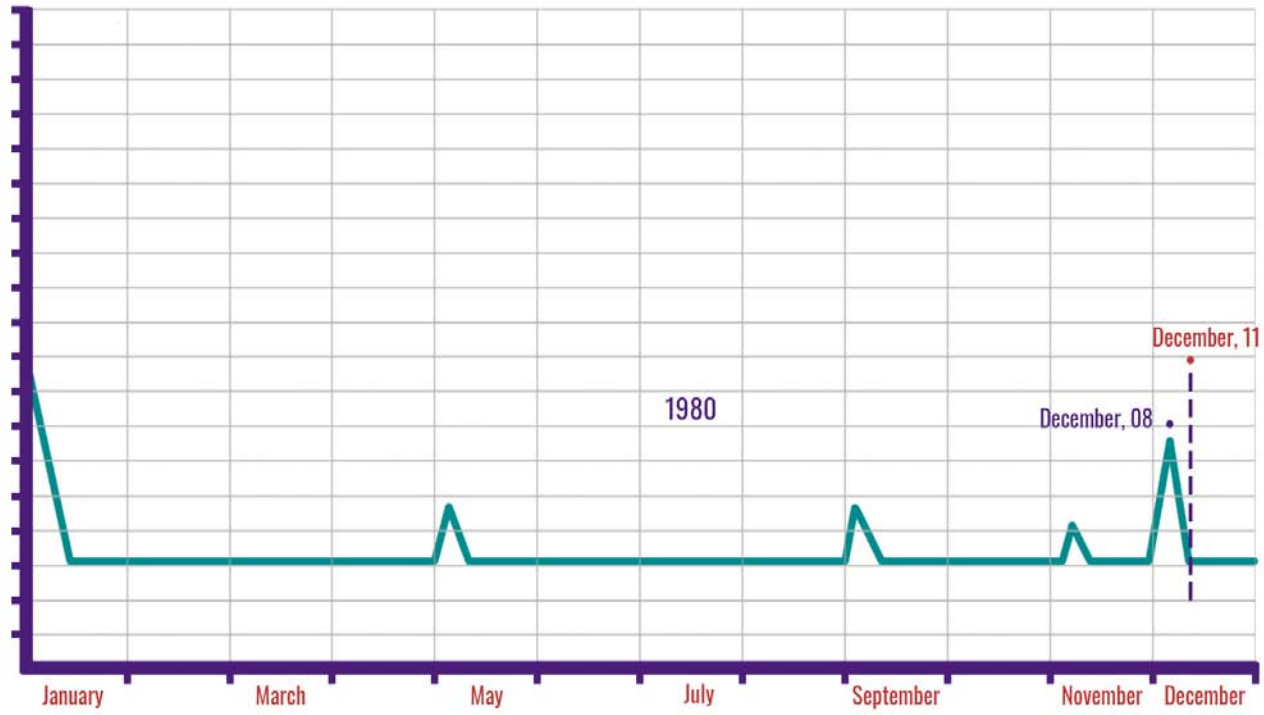


Рис. 3. Количество вызовов перед Назарбекским землетрясением

И за 3 дня до землетрясения этот показатель был более чем в 3.5 раза выше среднегодового (рис. 4).

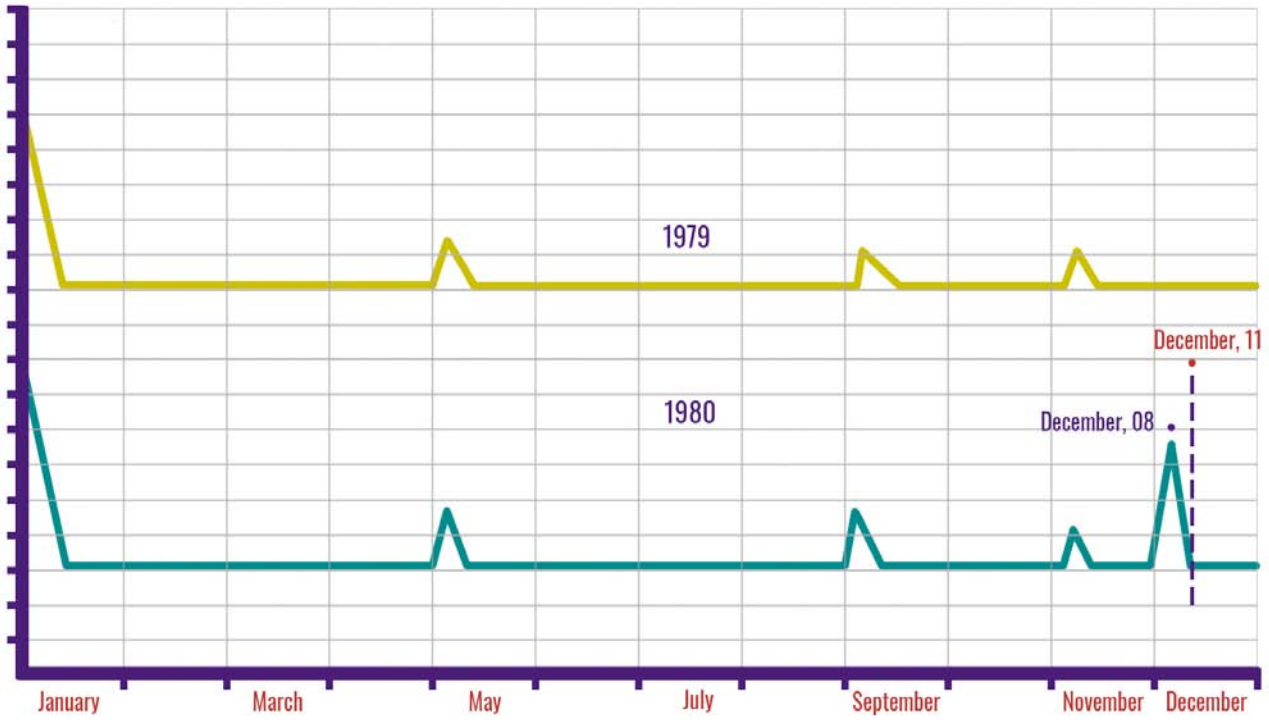


Рис. 4. Аномальное поведение среднегодового показателя вызовов Скорой помощи

Причем основной пик пришелся на районы, наиболее близко расположенные к эпицентру (рис. 5, 6).

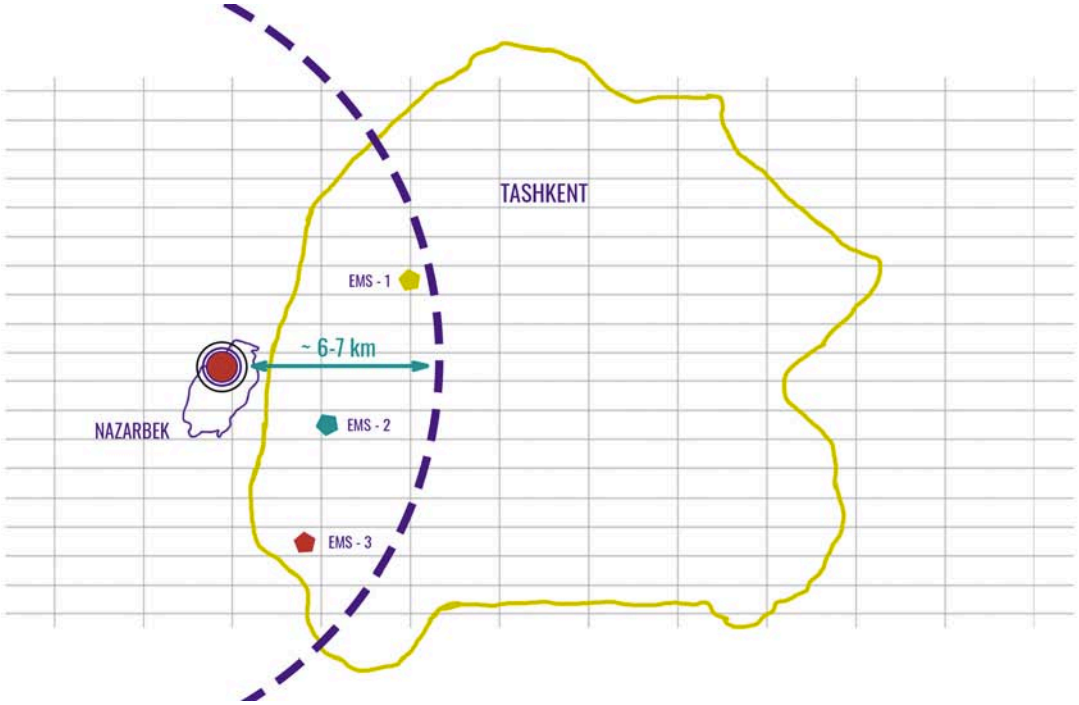


Рис. 5. Близкие к эпицентру землетрясения Станции Службы Скорой Помощи

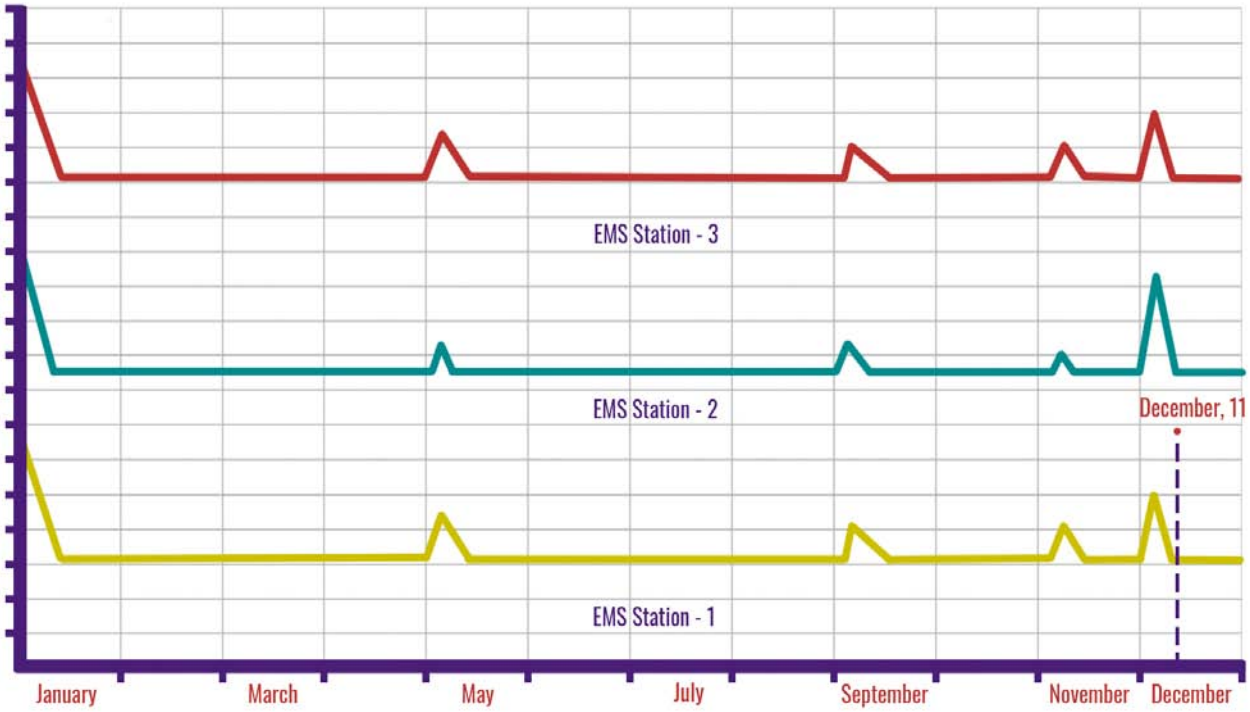


Рис. 6. Аномальное поведение среднегодового показателя вызовов Скорой помощи по ближайшим Станциям Службы Скорой Помощи

На самых дальних подстанциях Скорой помощи отклонений от среднегодовых показателей не наблюдалось (рис. 7, 8).

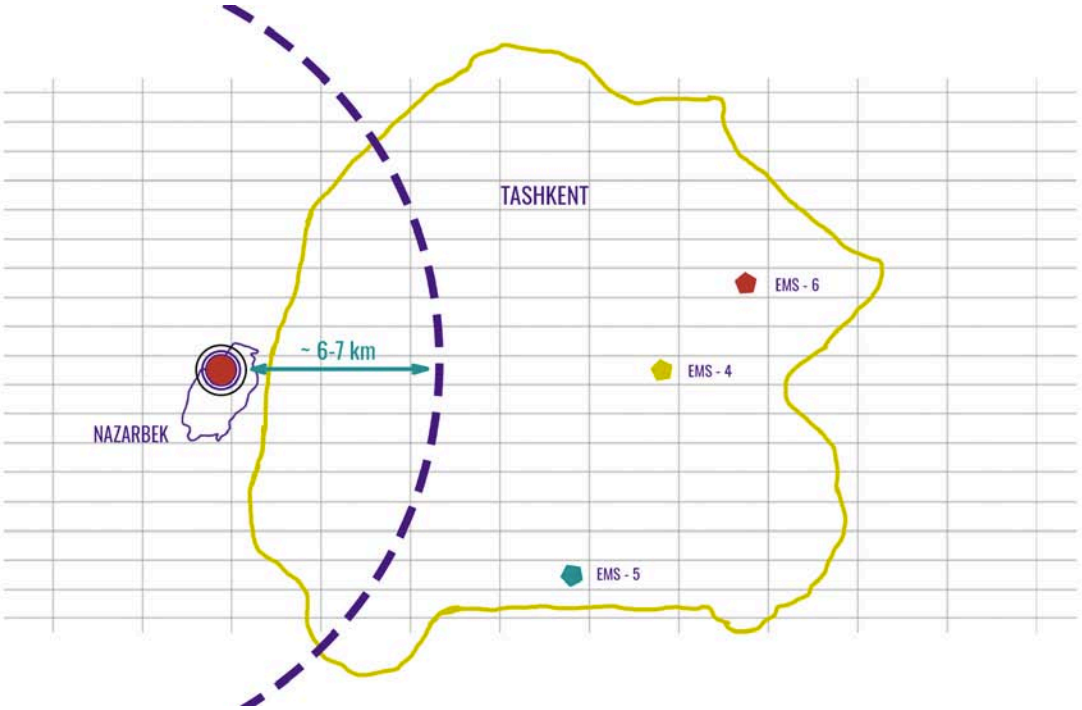


Рис. 7. Дальние от эпицентра землетрясения Станции Службы Скорой Помощи

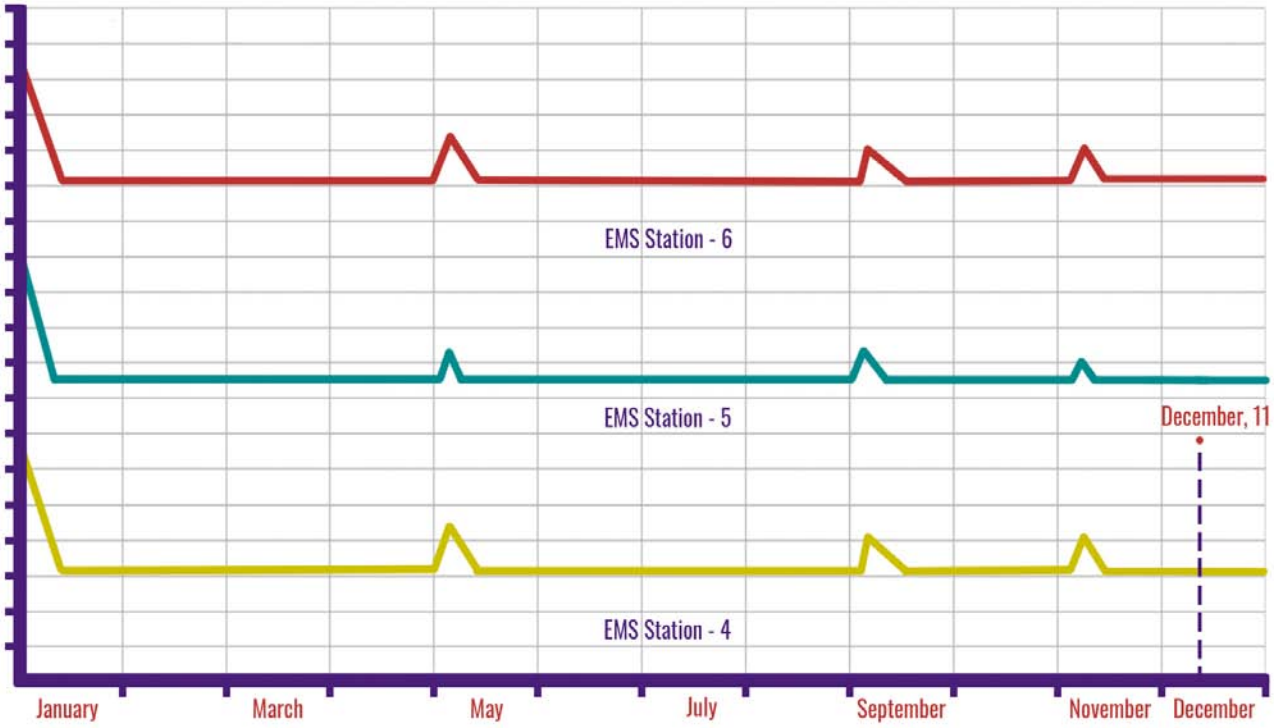


Рис. 8. Стандартное поведение среднегодового показателя вызовов Скорой помощи по дальним Станциям Службы Скорой Помощи

Анализ статистических показателей позволяет утверждать, что результаты подобных исследований могут служить одними из возможных индикаторов предстоящих землетрясений. Безусловно, это не обязательно должна быть статистика именно по вызовам Скорой помощи. Это может быть практически любая достоверная статистическая информация. К примеру, распределение

количества инцидентов на дорогах или статистика ветеринарных клиник. Примеры можно продолжать до бесконечности.

«Информационное предчувствие»

В проведении подобного рода исследований есть один аспект, который крайне важен для понимания причин возможного существования прогнозной информации в разных статистических источниках. Считается, что в отличие от более низкоорганизованных представителей живой природы, человек в процессе развития цивилизации утратил способность воспринимать сигналы приближающихся природных катастроф или важных общественных событий. Но, надо полагать, что в действительности, человек не утратил эту способность, он просто перешел на другой уровень предчувствия. Перешел на специфический уровень индикации предстоящих стихийных катастроф или социальных катаклизмов, в виде отражения неосознанных ощущений человека в статистических записях различных сторон его деятельности.

Своеобразное «информационное предчувствие» содержится в любой хорошо структурированной Базе Данных.

Природа прагматична и оптимальна. И потому возникает вопрос, имеет ли вообще Природа институт предвестников событий? То есть, предусматривает ли Природа, чтобы кто-то (кто?) или что-то (что?) получали прогностические сигналы перед стихийными бедствиями? И как расценивать наблюдаемые иногда предвестники, как что-то строгое и закономерное или просто как сопутствующий, несущественный для события, “шум”? Возможен ли вариант, при котором Природа отдала выявление предвестников предстоящих стихийных бедствий на откуп заинтересованным лицам (к примеру, живой природе)?

Но, в этом случае, «Информационное предчувствие» (если оно существует), может оказаться единственным действительно прогнозным показателем предстоящих природных или социальных катаклизмов.

Заключение

Важный комментарий к данному материалу. В случае, когда мы говорим об аномальном (на наш взгляд) поведении статистического ряда, то подразумеваем, что мы столкнулись с предвестником катастрофического события. Но какое конкретно событие нас ожидает, мы можем только предполагать.

Для сейсмолога, это землетрясение.

Для политика, это социальное потрясение.

Для метеоролога – изменение погоды.

Очевидно, было бы полезным шагом создание своеобразного Интернет-Портала, на котором был бы представлен статистический ряд по некоторым ключевым показателям. Надо полагать, что это мероприятие не потребует значительных затрат, поскольку на этом Портале будет просто дублироваться некоторая (выборочная) внутренняя статистика учреждений. А Сейсмолог, Политик и Метеоролог укажут, какая именно статистика может быть для них наиболее информативной.

Информация эта должна быть в открытом доступе, чтобы на каждой территории (регионе, районе) специалисты (и не специалисты) могли сверить результаты собственных исследований с “информационным предчувствием”.

Список литературы

1. *Султанходжаев А.Н., Шерматов М.Ш., Сухов Р.Р., Исмаилова Ф.* На пути поиска биологических предвестников Назарбекского землетрясения // Узбекский геологический журнал. 1982. № 2. С. 37–40.

УДК 550. 343.3+550.343.6

ОТКЛИК В ПОЛЕ ПОДПОЧВЕННЫХ ГАЗОВ НА ПОДГОТОВКУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 16 МАРТА 2021 г. С $M_W = 6.6$ (РАЙОН КРОНОЦКОГО ПОЛУОСТРОВА)

Фирстов П.П.*, *Макаров Е.О.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский,
ice@emsd.ru

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (ПКГП) с 1998 г. функционирует сеть пунктов мониторинга объемной активности подпочвенного ^{222}Rn (ОАР), а также молекулярного водорода (рис. 1). Как было показано в многочисленных работах [2, 4, 7, 9] радон достаточно чувствителен к изменениям напряженно-деформированного состояния геосреды. В странах, расположенных в сейсмоактивных районах мира (Израиль, Индия, Япония, США, Китай), активно ведутся работы по исследованию связи динамики радона в различных средах с сейсмичностью и, в частности, с процессами подготовки сильных землетрясений. Этому способствует простота измерений концентрации Rn, а также доступность и сравнительно невысокая стоимость технических средств. Применение радиогенного газа Rn обусловлено его химической инертностью и образованием непосредственно в горных породах, откуда он способен мигрировать к дневной поверхности.

Для радоновых предвестников характерна различная длительность и многообразие их форм. Они могут проявляться на значительных расстояниях от эпицентров землетрясений. Литературные данные с большой достоверностью дают основания для поиска в динамике подпочвенного Rn предвестниковых аномалий для землетрясений с большим диапазоном магнитуд, что было сделано на ПКГП. В настоящее время сеть, состоящая из 5 пунктов, оснащена современными аппаратно-программными средствами и методами для сбора, обработки и хранения получаемых временных рядов. Детальное описание сети на ПКГП приводится в [4].

На основании многолетних наблюдений на ПКГП в поле подпочвенного радона выделены два типа предвестниковых аномалий для субдукционных землетрясений с $M > 5$. Тип А – регистрируется на нескольких пунктах в виде синфазных бухт длительностью от 3 до 12 суток [4] и отражает масштабное проявление геодеформационных процессов на последней стадии подготовки землетрясения. Именно этот тип аномалий, предваряющих землетрясения, как предполагается, связан с прохождением в геосреде уединенных деформационных волн, возникающих за счет квазипластичного или катакластического течения горных масс на последней стадии подготовки землетрясения. Тип Б – регистрируется в единственном пункте наблюдений и связывается с особым состоянием гидрогеологической системы пункта регистрации. Как показано в работах [3, 4], механизм предвестника типа Б хорошо согласуется с теоретической моделью переноса Rn в водной среде с полным поперечным перемешиванием.

В акватории Тихого океана на траверсе Кроноцкого полуострова 16 марта 2021 г. на расстоянии 350 км от INSR на глубине 65 км произошло землетрясение с $K_S = 14.6$ ($M_W = 6.6$) (рис. 1), которое предварялось синфазными, выделенными на нескольких пунктах сети, бухтообразными аномалиями ОАР положительной полярности (пункты INSR, MRZR) и отрицательной полярности (пункт PRTR) длительностью ~6–18 сут. По амплитуде они превышала аналогичные вариации, связанные с резкими изменениями атмосферного давления. Относительная амплитуда ($\delta = \frac{A_{аф} - A}{A_{ф}} \cdot 100\%$) составила: на двух датчиках пункта INSR 180 % и 46 %, в пункте MRZR 20 %, в пункте PRTR1 – 69 % (рис. 2а, б). Время упреждения составило ~60 суток.

В работах [4, 6] было показано, что перед некоторыми землетрясениями Камчатки на ПКГП регистрируются водородные аномалии, имеющие характер коротких всплесков или биполярных импульсов. В ряде случаев такие аномалии возникали во временной окрестности с радоновыми и предваряли сильные землетрясения [4]. В пункте INSR датчиком молекулярного водорода, расположенном в стволе скважины НИС-1 на глубине ~5 м от оголовка, перед землетрясением 16 марта 2021 г. были зарегистрированы два аномальных всплеска (рис. 2в), превышающих по амплитуде

вариации, связанные с суточными колебаниями атмосферного давления в бункере, возникающие в связи с особенностями организации данного пункта наблюдений [4].

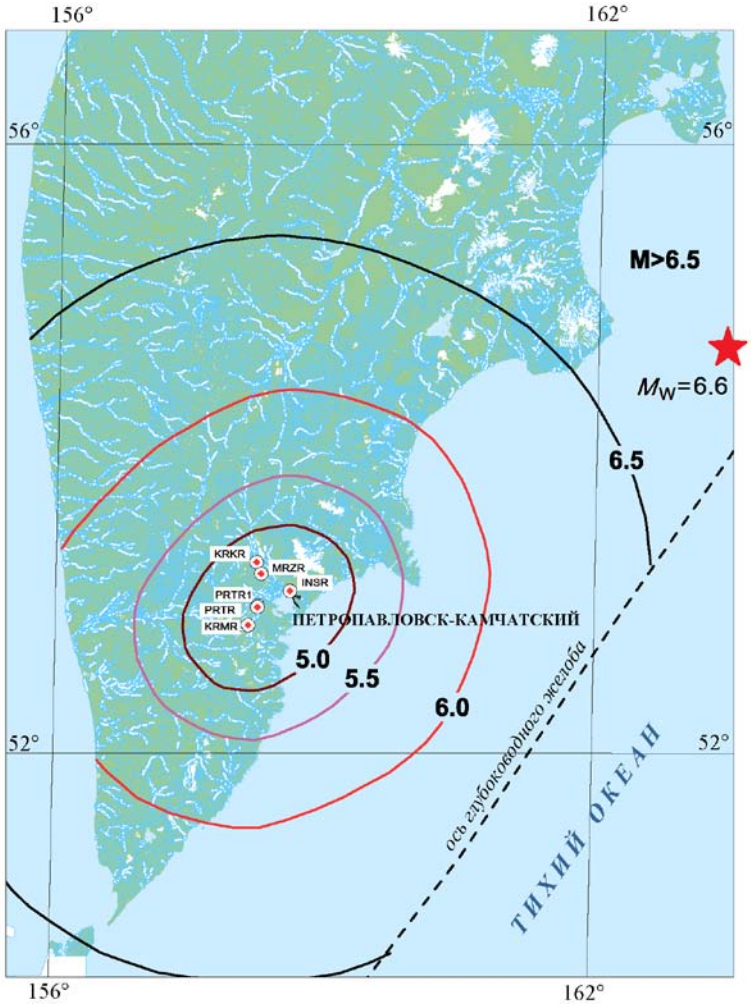


Рис. 1. Карта границ областей, в пределах которых процесс подготовки землетрясений соответствующих магнитуд может вызвать аномалии в поле подпочвенного радона с относительной амплитудой $\delta_{min} \geq 20$ за вычетом нижней границы 95 %-го доверительного коридора [4]. Звездой показан эпицентр землетрясения 16 марта 2021 г. с $M_W = 6.6$.

Кроме того, с применением разрабатываемой методики выделения синфазных вариаций во временных рядах ОАР методом «айгеноскопии», позволяющим выявлять моменты коллективного поведения в многомерных рядах [5], выделенная радоновая аномалия были формализована и определена как возможный предвестник сильного землетрясения (рис. 2г).

В работе [1] приводятся результаты трехлетнего инструментального мониторинга деформаций горных пород на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне, в которой авторами [1] выявлены два типа деформационных волн. Первый тип волн выражен во временных рядах данных единичными импульсами, проходящими через все точки мониторинга. Их источники находятся за пределами пунктов мониторинга и порождаются медленными смещениями по разломам [1]. Возникновение такого деформационного импульса инициировано тремор-подобным смещением по сейсмоактивному разлому, предварявшим основное сейсмогенное смещение, возникшее 29.03.2019 г. с реализацией землетрясения энергетического класса $K_S = 13.3$. Скорость миграции импульса составила 1.3 м/с [1]. Выделенные деформационные волны второго типа проявляются чаще, чем первого и представлены симметричными или асимметричными импульсами с амплитудами меньше на порядок, чем у волн первого типа. Их происхождение, как предполагается в работе [1], связано с перераспределением напряжений в разломно-блоковой структуре верхней части земной коры в пределах пунктов мониторинга и частота их проявления существенно возрастает перед ближними землетрясениями. Скорость миграции деформационных волн второго типа за несколько дней до землетрясения резко возрастает (с ~5 до ~50 км/сут), затем уменьшается [1].

Основываясь на работах [1, 4] можно предположить, что аномальные вариации радона, зарегистрированные на ПКГП перед землетрясением 16 марта 2021 г. с $M_W = 6.6$ связаны с воздействием на геосреду нескольких деформационных импульсов, которые прошли через все точки регистрации, вызывая изменения проницаемости грунта, что привело к изменению потока радона в местах установки датчиков. Вероятная область генерации таких импульсов связана с пространственным расположением будущего очага, а возникновение в ней деформаций, подобных процессам неупругого деформирования (крип) [8, 10] указывает на заключительную стадию подготовки землетрясения. Достаточно длинные времена аномалии (до 18 суток) и упреждения так же указывают, что процессы заключительной стадии подготовки этого землетрясения были растянуты во времени и, вероятно, связаны с крипом горных пород.

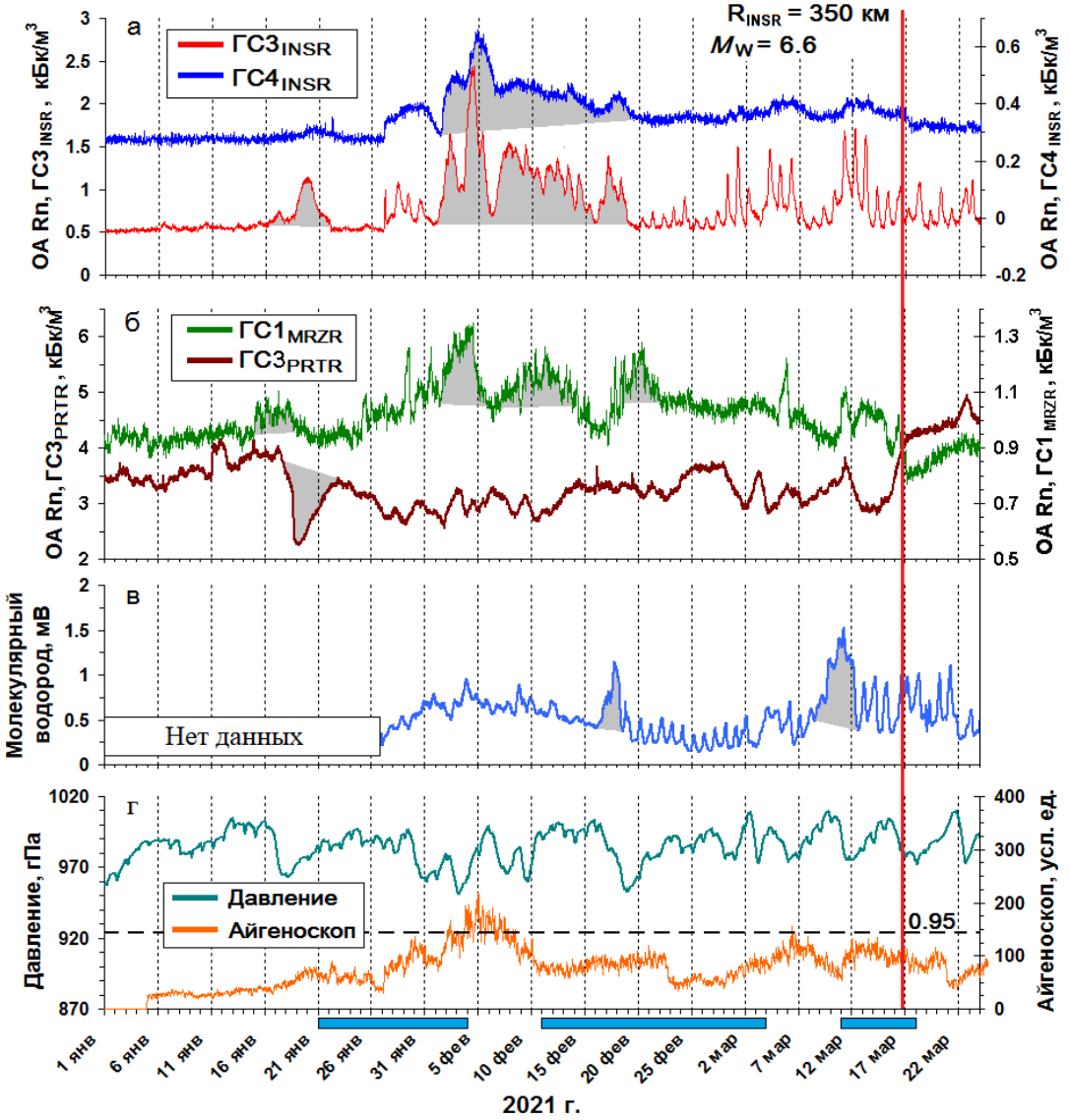


Рис. 2. Динамика ОАР в пунктах INSR (а), MRZR и PRTR (б), концентрация молекулярного водорода в пункте INSR (в), вариации атмосферного давления и временной ряд, построенный по методу «айгеноскопии» (г), за период 01 января – 24 марта 2021 г. Момент землетрясения показан красной вертикальной линией, аномалии выделены светло-серым цветом, периоды прогноза показаны светло-синими прямоугольниками.

На основании еженедельного анализа данных, поступающих с сети пунктов наблюдения в КФ РЭС 11 марта 2021 г. было подано стандартное заключение о сейсмической опасности для Камчатского края, сделанное на основании эманационного метода, описанного в [4]. Согласно сделанному заключению в течение следующей недели было возможно возникновение землетрясений с магнитудами больше указанных в соответствующих районах, отмеченных на рис. 1, или землетрясений с $M > 6.5$ в полосе ограниченной по широте 49.5°–56° с. ш. и осью глубоководного желоба.

Сделанный 11 марта прогноз предваряли заключения о сейсмической опасности, поданные ранее и так же содержащие прогнозные оценки. Периоды этих прогнозов показаны на рис. 2 светло-синими прямоугольниками. Все поданные прогнозы основывались на экспертной оценке развития выделенной аномалии, но итоговый, поданный 11 марта и завершающий серию прогнозов был дополнительно обоснован с помощью метода «айгеноскопии». Произошедшее в районе Кроноцкого полуострова 16 марта 2021 г. землетрясение с $M_W = 6.6$ рассматривается авторами как спрогнозированное.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-05-00493) и Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Борняков С.А., Салко Д.В., Шагун А.Н., Добрынина А.А., Усынин Л.А.* Медленные деформационные волны как возможный предвестник сейсмической опасности // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3. № 3. С. 267–276.

2. *Зубков С.И.* Радоновые предвестники землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1981. № 6. С. 74–105.

3. *Макаров Е.О.* Отклик в динамике подпочвенного радона на подготовку сильных землетрясений Камчатки и северо-западной окраины Тихого океана: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Петропавловск-Камчатский, 2017. 22 с.

4. *Фирстов П.П., Макаров Е.О.* Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2018. 148 с.

5. *Фирстов П.П., Макаров Е.О. Глухова И.П., Будилов Д.И., Исакевич Д.В.* Поиск предвестниковых аномалий сильных землетрясений по данным мониторинга подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 1. С. 16–32.

6. *Фирстов П.П., Широков В.А.* Динамика молекулярного водорода и её связь с геодеформационными процессами на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне по данным наблюдений в 1999–2003 гг. // Геохимия. 2005. № 11. С. 1151–1160.

7. *Cicerone R.D., Ebel J.E., Beitton J.A.* Systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. V. 476. P. 371–396.

8. *Dieterich J.H.* Applications of rate-and state-dependent friction to models of fault slip and earthquake occurrence Treatise on Geophysics (Second Edition). 2007. 4(107). P. 93–110.

9. *Dubinchuk V.T.* Radon as a precursor of earthquakes // Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption: Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, Vienna, 9–12 Sept. 1991. Vienna, 1991. P. 6–22.

10. *Ohnaka M.* The physics of rock failure and earthquakes. Cambridge University Press, 2013. 270 p.

УДК 550.34

О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КАМЧАТСКОГО ФИЛИАЛА РОССИЙСКОГО ЭКСПЕРТНОГО СОВЕТА В 2019–2021 гг.

Чебров Д.В., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, danila@emsd.ru

Для оперативной оценки сейсмической опасности, прогноза землетрясений и извержений вулканов, возможных последствий их воздействий в 1998 г. было учреждено Камчатское отделение Федерального центра прогнозирования землетрясений (КамО ФЦПЗ) как структурное подразделение Геофизической службы РАН в рамках целевой программы «Развитие Федеральной системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений на 1995–2000 гг.», которое существовало и функционировало до февраля 2006 г. В соответствии с Положением о Российском экспертном совете по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска, утвержденным Совместным решением Российской Академии наук и МЧС России от 15 марта 2003 г., предусмотрено создание Камчатского филиала РЭС на базе Камчатского филиала Геофизической службы РАН и Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН. В феврале 2006 г. КамО ФЦПЗ было реорганизовано и продолжает свою работу как Камчатский филиал Российского экспертного совета (КФ РЭС).

Основная функция КФ РЭС – оперативная оценка сейсмической опасности, прогноз землетрясений и извержений вулканов, возможных последствий их воздействий. На этом этапе мониторинга производится комплексирование более 20 методик прогнозирования [4].

Заседания КФ РЭС проводятся еженедельно. При нештатной обстановке (усиление сейсмической и вулканической активности или прогнозы сильных землетрясений от других организаций и физических лиц) заседания проводятся так часто, как это необходимо.

За период сентябрь 2019 – август 2021 гг. КФ РЭС проведено 113 еженедельных заседаний, из которых 9 внеочередных, в связи с произошедшими землетрясениями с M больше 6.0 и вулканической активностью.

КФ РЭС передано 113 сообщений о сейсмической и вулканической опасности в Камчатском крае в РЭС, Координационный прогностический центр (КПЦ) ИФЗ РАН, Правительство Камчатского края, городскую администрацию, Главное Управление МЧС России по Камчатскому краю, Геофизическую службу РАН, центр "Антистихия" МЧС РФ, управление ФСБ по Камчатскому краю, командующему войсками и силами на северо-востоке РФ, главному федеральному инспектору по Камчатскому краю, в Минспецпрограмм Камчатского края, в ГКП "Единый ситуационно-мониторинговый центр". Передача заключений в средства массовой информации осуществляется через пресс-центр ГУ МЧС по Камчатскому краю.

При еженедельной оценке сейсмической опасности рассматриваются заключения о сейсмической обстановке по данным наблюдений за предвестниками сильных землетрясений, которые можно разделить на несколько групп в соответствии с природой используемых полей: сейсмологические, геофизические, геохимические, геодезические. Большинство методик подробно рассмотрено в [4], там же приведены примеры их применения.

В указанный период в работе КФ РЭС на регулярной основе принимали участие восемь научно-исследовательских организаций:

- Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН),
- Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН),
- Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН),
- Институт Физики Земли РАН (ИФЗ РАН, Москва),
- Физико-технический институт РАН (ФТИ РАН, Санкт-Петербург),
- Институт проблем передачи информации РАН (ИППИ РАН, Москва),
- ООО Центр геофизических прогнозов «Градиент» (Санкт-Петербург),
- Институт геологии и геохимии УрО РАН (Екатеринбург).

По Положению о КФ РЭС возможность подать прогноз предоставляется всем желающим, поэтому рассматриваются также прогнозы и оценки, подаваемые другими организациями и частными лицами, а также прогнозы, касающиеся других регионов мира. Так, например, в 2019–2021 гг. поступали прогнозные заключения от Доды Л.Н. (Тульский ГУ).

При оценке сейсмической опасности в 2019–2021 гг. на регулярной основе использовались следующие методы наблюдений за предвестниками сильных землетрясений:

- сейсмологические
- вариации сейсмической активности A10 (карты) (ИППИ РАН);
- обнаружение зон с аномальными значениями наклона графика повторяемости землетрясений (КФ ФИЦ ЕГС РАН);
- вариации крутизны спада огибающей коды слабых местных землетрясений (КФ ФИЦ ЕГС РАН);
- методика "Регион-Мир" (комплексное использование большой совокупности различных сейсмологических и космофизических параметров), (КФ ФИЦ ЕГС РАН);
- обнаружение сейсмических затиший по методикам *RTL* и *Z*-функция (КФ ФИЦ ЕГС РАН);
- обнаружение зон сейсмической активизации по методике ΔS и кластеризации землетрясений (КФ ФИЦ ЕГС РАН);
- параметр τ (вариации отношения скоростей сейсмических волн V_P/V_S) (ИФЗ РАН);
- изменения средних значений временных интервалов между сейсмическими событиями и их коэффициент вариации (ФТИ РАН);
- вариации параметров высокочастотного сейсмического шума (ВСШ), связанные с изменением приливного отклика чувствительности среды перед сильными землетрясениями (КФ ФИЦ ЕГС РАН);
- геофизические
- скважинные гидрогеодинамические (вариации уровня воды, атмосферного давления, температура и электропроводность подземных вод) (КФ ФИЦ ЕГС РАН);
- электротеллурические (КФ ФИЦ ЕГС РАН);
- параметры атмосферно-ионосферных полей (ИКИР ДВО РАН);
- скважинные геоакустические измерения (ИВиС ДВО РАН);
- измерения электрической составляющей электромагнитного поля Земли в СНЧ-диапазоне частот с помощью подземной антенны (ИКИР ДВО РАН);
- наблюдения УНЧ/СНЧ магнитного поля (КФ ФИЦ ЕГС РАН, ИФЗ РАН)
- изменение атмосферного давления; расчетные данные полей барической нагрузки на земную кору (ООО Центр геофизических прогнозов «Градиент»);
- геохимические
- вариации химического состава воды в скважинах и источниках (КФ ФИЦ ЕГС РАН);
- измерение объемной активности радона ^{222}Rn и водорода в подпочвенном газе (КФ ФИЦ ЕГС РАН);
- геодезические
- изменения положения GPS пунктов (КФ ФИЦ ЕГС РАН).

Текущий уровень сейсмичности в Камчатском крае оценивался по шкале "СОУС′09" [1]. Регулярные (еженедельные) оценки делались как для района, захватывающего наиболее сейсмоактивную часть Камчатки, так и для меньших по размеру подрегионов.

В 2021 г. в практику КФ РЭС внедрено рассмотрение карт уровня сейсмичности различного пространственного масштаба, что позволяет выделять аномалии различного уровня – от локального до регионального. Временное развитие выделенных аномалий отражено в представляемых трехмерных СОУСграммах, где координатами является время, длительность временного окна, уровень СОУС в цветовом коде.

В сентябре 2019 – августе 2021 гг. в Камчатском регионе (район с координатами φ = 49–62 *N*, λ = 152–169 *E*) произошли 24 землетрясения с классом $K_S \geq 12.5$ (включая афтершоки), что соответствует магнитуде $M_L \geq 5.5$ (рис. 1, табл. 1). Координаты эпицентров, время, магнитуды M_C и M_L соответствуют каталогу КФ ФИЦ ЕГС РАН; *R* – эпицентральное расстояние до г. Петропавловска-Камчатского. Значения магнитуд M_W и *mb* взяты из каталога NEIC (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/).

Для 20 событий таблицы 1 были даны прогнозы, либо были выявлены предвестники, как в реальном времени, так и ретроспективно (см. рис. 1).

Оценка и прогнозирование состояния вулканов

При оценке вулканической обстановки используются материалы о сейсмической активности вулканов, полученные в КФ ФИЦ ЕГС РАН [2, 3].

В сентябре 2019 – августе 2021 гг. поступали регулярные еженедельные заключения об активности вулканов Камчатки от сотрудников лаборатории исследований сейсмической и вулканической активности КФ ФИЦ ЕГС РАН, а также заключения о состоянии сейсмичности вулканов Ключевской группы (вулканы Ключевской, Безымянный, Удина, Зимина, Толбачик, включая Толбачинский дол и Толудскую зону) и Авачинской группы (вулканы Авачинский и Корякский) по методике СОУС'09 [2]. На основании прогнозных заключений сотрудников ЛИСВА КФ ФИЦ ЕГС РАН и по методике СОУС'09 [2] успешно спрогнозировано извержение вулкана Безымянный 21 октября 2020 г.

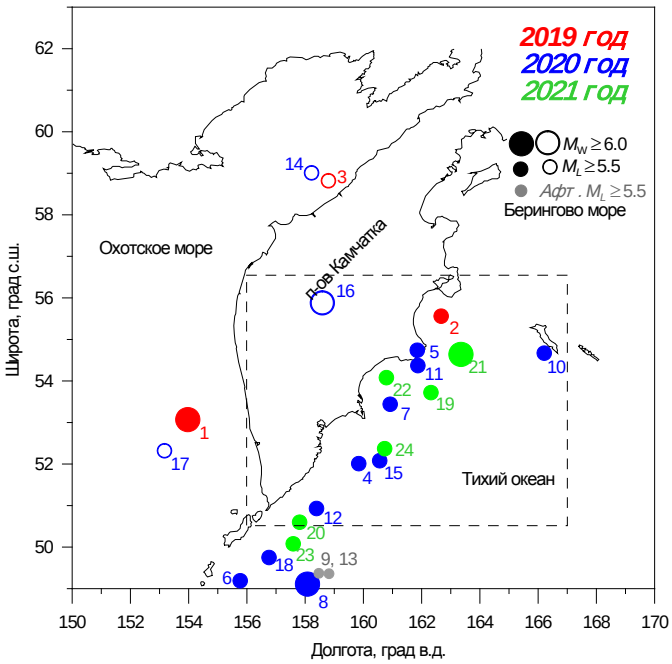


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений сентябрь 2019 – август 2021 гг. с $K_S \geq 12.5$ ($M_L \geq 5.5$) (нумерация согласно таблице 1). Пунктиром показан район КСО. Залитыми кружками показаны землетрясения, перед которыми были даны прогнозы, либо были выявлены предвестники, как в реальном времени, так и ретроспективно. Более крупными кружками показаны землетрясения с $M_W > 6.0$.

Выводы

В сентябре 2019 – августе 2021 гг. КФ РЭС продолжил свою работу в обычном режиме (регулярные еженедельные заседания, в особых случаях – внеочередные заседания), проведено 113 совещаний, на которых рассматривались заключения о прогнозе землетрясений по более чем 20 методикам от 8 организаций.

За рассматриваемый период произошло четыре землетрясения с магнитудой $M_W > 6.0$. Для трех из них были выделены предвестники в реальном времени и имелись зарегистрированные прогнозы.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

Список литературы

1. *Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.

2. *Салтыков В.А.* Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. № 3. С. 45–59.

3. *Сенюков С.Л.* Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 96–108.

4. *Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.

Таблица 1. Параметры землетрясений $K_S \geq 12.5$, произошедших в Камчатском регионе ($\varphi = 49–62$ *N*, $\lambda = 152–169$ *E*) в сентябре 2019 – августе 2021 гг.

№ п/п	Дата	Время	Широта, град.	Долгота, град.	*H*, км	*K*s	M_L	M_C	M_W	*R*, км	Балл *MSK-64*	**Прогноз** / Предвестник, выявленный в режиме реального времени / Предвестник, выявленный ретроспективно
1	20191120	08:26:05	53.07	153.97	497	14.0	6.3	5.6	6.3	308		**Методика «Регион-Мир» (В.А.Широков, КФ ФИЦ ЕГС РАН)** / Изменения атмосферного давления (В.Н.Боков, ООО "Градиент") / –
2	**20191223**	**16:19:05**	**55.56**	**162.67**	**21**	**12.9**	**5.7**		**5.2**	**385**	**Кордон Кроноки 3–4, Усть-Камчатск 2–3**	– / *Vp/Vs* (Л.Б.Славина ИФЗ РАН); Изменения атмосферного давления (В.Н.Боков, ООО "Градиент") / –
3	20191226	17:13:48	58.82	158.80	14	13.1	5.8	5.7	5.2	642	Палана, Тигиль 3–4	– / – / –
4	**20200116**	**16:31:10**	**52.01**	**159.84**	**29**	**12.8**	**5.7**		**5.4**	**137**	**ПТР 3–4, Елизово 3**	***Vp/Vs* (Л.Б.Славина ИФЗ РАН)** / Скважинные геоакустические (В.А.Гаврилов, ИВиС ДВО РАН); Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН) / –
5	**20200122**	**11:04:12**	**54.74**	**161.85**	**83**	**14.3**	**6.4**	**6.0**	**5.5**	**286**	**кордон Кроноки 5–6, кордон Семячик 4–5, Ключи, Мильково 4, Усть-Камчатск 3–4, ПТР 3**	**«*Z*-функция» (А.А.Коновалова, КФ ФИЦ ЕГС РАН); *RTL*-параметр (А.А.Коновалова, КФ ФИЦ ЕГС РАН)** / Скважинные геоакустические (В.А.Гаврилов, ИВиС ДВО РАН); Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН); *Vp/Vs* (Л.Б.Славина ИФЗ РАН); Изменения атмосферного давления (В.Н.Боков, ООО «Градиент») / Вариации наклона графика повторяемости γ (А.А.Коновалова, КФ ФИЦ ЕГС РАН)
6	20200216	07:35:35	49.19	155.77	69	12.7	5.6	5.0	5.2	463		– / *Vp/Vs* (Л.Б.Славина ИФЗ РАН); УНЧ/СНЧ магнитного поля (А.Ю.Щекотов, ИФЗ РАН); Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН) / –
7	**20200220**	**18:57:34**	**53.44**	**160.92**	**52**	**14.3**	**6.4**	**6.0**	**5.8**	**161**	**ПТР 4, Елизово 3–4**	**«*Z*-функция» (А.А.Коновалова, КФ ФИЦ ЕГС РАН); Скважинные геоакустические (В.А.Гаврилов, ИВиС ДВО РАН); Мониторинг концентрации подпочвенных газов (П.П.Фирстов, КФ ФИЦ ЕГС РАН); *ВСШ* (Салтыков В.А., КФ ФИЦ ЕГС РАН)** / Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН); УНЧ/СНЧ магнитного поля (А.Ю.Щекотов, ИФЗ РАН) / Вариации наклона графика повторяемости γ (А.А.Коновалова, КФ ФИЦ ЕГС РАН)

Продолжение Табл. 1.

8	20200325	02:49:20	49.11	158.08	48	16.8	7.7	7.5	7.5	430	Северо-Курильск 6–7, ПТР 4–5, Никольское 2–3	***Vp/Vs* (Л.Б.Славина ИФЗ РАН)** / Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН); УНЧ/СНЧ магнитного поля (А.Ю.Щекотов, ИФЗ РАН); «Фазовый портрет» (С.Э.Смирнов, ИКИР ДВО РАН) / –
9	20200325	17:21:45	49.37	158.47	53	12.9	5.7		5.1mb	400	Северо-Курильск 3–4	***Vp/Vs* (Л.Б.Славина ИФЗ РАН)** / Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН); УНЧ/СНЧ магнитного поля (А.Ю.Щекотов, ИФЗ РАН); «Фазовый портрет» (С.Э.Смирнов, ИКИР ДВО РАН) / –
10	**20200404**	**06:18:22**	**54.67**	**166.21**	**37**	**13.4**	**6.0**	**5.7**	**5.5**	**529**	**Никольское 4**	**«*Z*-функция» (А.А.Коновалова, КФ ФИЦ ЕГС РАН); *RTL*-параметр (А.А.Коновалова, КФ ФИЦ ЕГС РАН)** / УНЧ/СНЧ магнитного поля (А.Ю.Щекотов, ИФЗ РАН); Изменения атмосферного давления (В.Н.Боков, ООО «Градиент») / –
11	**20200501**	**07:04:47**	**54.37**	**161.87**	**52**	**12.7**	**5.6**	**5.1**	**5.0**	**262**	**Кордон Кроноки 4–5, ПТР 2**	– / УНЧ/СНЧ магнитного поля (А.Ю.Щекотов, ИФЗ РАН); Изменения атмосферного давления (В.Н.Боков, ООО «Градиент») / –
12	**20200514**	**01:22:47**	**50.93**	**158.39**	**51**	**12.6**	**5.6**		**4.8mb**	**228**	**ПТР 2, Северо-Курильск 2**	– / Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН) / –
13	20200614	21:23:22	49.36	158.82	30	13.2	5.9		5.1	401	Северо-Курильск 3–4, ПТР 3	– / *Vp/Vs* (Л.Б.Славина ИФЗ РАН); Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН) / –
14	20200901	00:51:10	59.01	158.22	7	13.6	6.1		5.6	665	Палана 4–5, Тигиль 3–4, Воямполка 2	– / – / –
15	**20200904**	**21:10:13**	**52.08**	**160.56**	**49**	**12.7**	**5.6**	**5.0**	**4.7mb**	**166**	**Вилючинск 2–3, ПТР 2**	– / Мониторинг концентрации подпочвенных газов (П.П.Фирстов, КФ ФИЦ ЕГС РАН); Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН) / –
16	**20200915**	**03:41:25**	**55.88**	**158.59**	**360**	**14.4**	**6.5**	**6.0**	**6.4**	**317**	**Кордон Кроноки 4–5, Усть-Камчатск 2, Вилючинск 2, ПТР 2**	– / – / –
17	20201008	18:24:49	52.32	153.17	561	13.2	5.9		5.0mb	371		– / – / –

Продолжение Табл. 1.

18	20201127	18:45:06	49.75	156.76	45	13.4	6.0	5.3	5.3	380	РНС Подгорная 5, Северо-Курильск 4–5, маяк Курбатова, кордон Прибрежный, п. Паужетка 3–4.	– / *Vp/Vs* (Л.Б.Славина ИФЗ РАН); *ВСШ* (В.А.Салтыков, КФ ФИЦ ЕГС РАН) / –
19	**20210117**	**08:31:53**	**53.72**	**162.32**	**48**	**12.8**	**5.7**		**5.1**	**258**	**ПТР ощущалось**	– / Скважинные гидрогеодинамические (Г.Н. Копылова, КФ ФИЦ ЕГС РАН) / –
20	**20210306**	**05:57:56**	**50.60**	**157.81**	**64**	**12.6**	**5.6**	**5.0**	**5.1**	**270**	**Северо-Курильск 4, маяк Чибуйный 3, корд. Прибрежный 2**	– / Скважинные гидрогеодинамические (Г.Н.Копылова, КФ ФИЦ ЕГС РАН); Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН) / –
21	**20210316**	**18:38:21**	**54.64**	**163.35**	**64**	**14.6**	**6.6**	**7.1**	**6.6**	**359**	**кордоны Кроноки, Аэродром, Усть-Камчатск 4-5, ГМС мыс Африка, Никольское, Крутоберегово, кордон Семячик 4, кордон Кипелые, ГМС Семячик 3-4, мыс Африка, Ключи, ПТР 3, Вилючинск, Термальный 2**	***Vp/Vs* (Л.Б.Славина ИФЗ РАН); Мониторинг концентрации подпочвенных газов (П.П.Фирстов, КФ ФИЦ ЕГС РАН); «*Z*-функция» (А.А.Коновалова, КФ ФИЦ ЕГС РАН); *RTL*-параметр (А.А.Коновалова, КФ ФИЦ ЕГС РАН); «*Z*-гамма» (А.А.Коновалова, КФ ФИЦ ЕГС РАН)** / Скважинные гидрогеодинамические (Г.Н.Копылова, КФ ФИЦ ЕГС РАН); Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН); *ВСШ* (В.А.Салтыков, КФ ФИЦ ЕГС РАН); Сейсмический и электромагнитный мониторинг (В.А.Гарифулин, Центр ГМСН и РР) / –
22	**20210417**	**15:45:20**	**54.08**	**160.79**	**71**	**13.3**	**5.9**		**5.0**	**187**	**ГМС Семячик, кордоны Семячик, Аэродром 5, кордоны Долина Гейзеров, Кроноки 4-5, мыс Шипунский 4, кордоны Мыс Налычево, Центральный 3, ПТР, Пионерский, Рыбачий, Вилючинск 2-3, Елизово 2**	– / Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН) /–

Окончание Табл. 1.

23	20210606	16:01:37	50.08	157.59	75	12.7	5.6	4.6	4.8	329	Северо-Курильск, кордон Травяной 4, кордон Озерный, Паужетка 3-4, маяк Круглый 2	– / Ионосферные наблюдения (В.В.Богданов, ИКИР ДВО РАН); Мониторинг концентрации подпочвенных газов (П.П.Фирстов, КФ ФИЦ ЕГС РАН) / –
24	**20210713**	**02:28:54**	**52.37**	**160.73**	**51**	**12.9**	**5.7**	**5.5**	**5.2**	**159**	**ПТР 2-3**	***ВСШ* (В.А.Салтыков, КФ ФИЦ ЕГС РАН)** / Мониторинг концентрации подпочвенных газов (П.П.Фирстов, КФ ФИЦ ЕГС РАН); *Vp/Vs* (Л.Б.Славина ИФЗ РАН); Скважинные геоакустические (В.А.Гаврилов, ИВиС ДВО РАН) / –

Примечание: жирным шрифтом отмечены землетрясения, попавшие в Камчатскую сейсмоактивную область (КСО, район с координатами φ = 50.5–56.5 *N*, λ = 156–167 *E*, пунктирная линия на рис. 1); серым цветом выделены строки афтершоков; ПТР – г. Петропавловск-Камчатский.

УДК 551.21

ОСОБЕННОСТИ МУЛЬТИПЛЕТОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РЕЖИМА «DRUMBEATS», ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ВО ВРЕМЯ ИЗВЕРЖЕНИЯ В. КИЗИМЕН В 2010-2013 гг.

Шакирова А.А., Фирстов П.П., Заводевкин И.А.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая Геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, shaki@emsd.ru

Введение

Мультиплеты, землетрясения с идентичными волновыми формами, наблюдаются в различных тектонических условиях. На вулканах мультиплеты обычно наблюдаются до и во время извержений [10], иногда сопровождают выжимание экструзивных куполов [5, 8]. Разделение землетрясений методом кросс-корреляции весьма распространено при выделении мультиплетов вулканических землетрясений и позволяет отслеживать изменение волновой формы сигнала [6, 7, 9]. Значение коэффициента корреляции R_{corr} находится в диапазоне значений от -1 до 1. Чем ближе R_{corr} к 1, тем сильнее прямая связь между переменными. При $R_{corr} = 0$ значимая связь между двумя переменными отсутствует.

Во время извержения в. Кизимен в 2010–2013 гг. регистрировался сейсмический режим «drumbeats», состоящий из квазирегулярных землетрясений с близкой магнитудой. Известно, что этот режим сопровождает выжимание экструзивных куполов [4]. Режим «drumbeats», наблюдаемый при извержении в. Кизимен, был весьма необычен, так как наряду с землетрясениями, которые возникали при выжимании вершинной экструзии, движение мощного вязкого лавового потока, продолжавшееся почти 1.5 года, также сопровождалось режимом «drumbeats». Иногда землетрясения следовали с точной частотой возникновения, прослеживающейся в течение нескольких суток. Однако, такая квазирегулярность наблюдалась не всегда, и временами возникновение землетрясений становилось более случайным.

С помощью кросс-корреляционного детектора DrumCorr [1] землетрясения режима «drumbeats» были сгруппированы в мультиплеты на основе сходства волновой формы. Изменение волновых форм сопоставлялось с вулканической активностью на протяжении всего извержения. В данной работе представлен первичный анализ полученных результатов.

Выделение мультиплетов землетрясений режима «drumbeats»

Входными данными для классификации землетрясений являлись суточные сейсмические записи с/ст «KZV» Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, расположенной в 2.6 км от вершины вулкана Кизимен, вертикальная составляющая SHZ, формат данных ASCII. Как шаблон, так и суточные сейсмограммы, подвергались широкополосной фильтрации в диапазоне 0.2–10 Гц. Шаблонное землетрясение выбиралось эмпирически. Рассчитанный коэффициент корреляции последующих и предыдущих сигналов рассматривался относительно шаблонного сигнала (рис. 1а). Порог коэффициента корреляции записей событий с шаблоном устанавливался равным $R = 0.5$. Когда количество коррелированных землетрясений снижалось, выбиралось новое шаблонное землетрясение.

За период 2010–2013 гг. было выделено 19 мультиплетов, содержащих 313217 землетрясений режима «drumbeats» из около 500000 зарегистрированных. Как будет показано далее, параметры мультиплетов и землетрясений из которых они состоят, определялись параметрами лавового потока и выжимающегося экструзивного купола.

Каждый мультиплет был представлен набором суточных файлов-отчетов (рис. 1в), в котором содержатся следующие данные: количество землетрясений в сутках (N) с соответствующим временем каждого землетрясения в формате чч:мм:сс, соответствующим ему коэффициентом корреляции R_{corr} относительно выбранного шаблона и амплитудой, мкм/с. Также в файл-отчет записывается значение среднесуточного коэффициента корреляции $\bar{R}_{corr}$, среднесуточной амплитуды $\bar{A}$ и среднесуточного периода между землетрясениями T_D. На основе T_D вычислялась среднесуточная частота $\bar{f}_D$. Значения $\bar{f}_D$, $\bar{A}$ и $\bar{R}_{corr}$ для всех выделенных мультиплетов приведены в таблице 1.

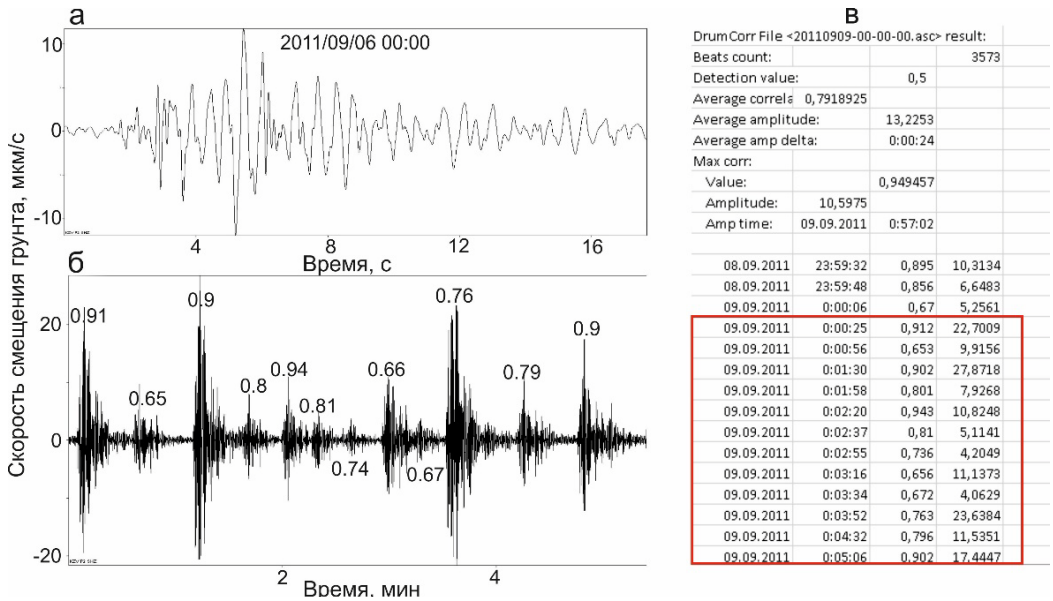


Рис. 1. Шаблонное землетрясение мультиплета № 10 (а), фрагмент сейсмограммы с/ст KZV, канал SHZ, начало отсчета времени сейсмической записи 00:00:23 (б), фрагмент файл-отчета за 9.09.2011 г. (в).

Таблица 1. Параметры мультиплетов землетрясений режима «drumbeats», выделенные кросс-корреляционным детектором DrumCorr.

№	Тип	Период	N	$\bar{R}_{corr}$	$\bar{f}_D$	$\bar{A}$
1		9.12.2010	1273	0.53-0.62	0.88	0.97
2	**III**	20.01.-30.01.2011	14547	0.54-0.62	0.02-1.62	1.36-2.94
3		13-16.02.2011	7991	0.54-0.80	0.16-3.33	1.23-3.34
4		27.02-07.03.2011	939	0.52-0.57	0.005-0.38	2.90-7.66
5		11.03-22.03.2011	22626	0.51-0.7	0.01-3.75	2.71-6.93
6	**I**	22.04-02.05.2011	16917	0.53-0.73	0.20-2.60	0.92-4.96
7		11.05-24.05.2011	25475	0.62-0.73	0.04-4.20	1.83-9.78
8		18.05-14.06.2011	36383	0.52-0.76	0.008-3.16	2.05-16.39
9		25.07-04.08.2011	5683	0.63-0.76	0.12-0.72	1.50-2.56
10		31.07-14.10.2011	125259	0.56-0.81	0.009-2.85	1.02-13.39
11		10.10-23.10.2011	11074	0.55-0.72	0.08-1.50	0.68-2.46
12		13.10-23.10.2011	879	0.52-0.56	0.09-0.14	1.08-1.85
13		10.10-21.10.2011	3302	0.52-0.56	0.008-0.35	0.85-3.55
14	**II**	10.10-23.10.2011	5378	0.55-0.58	0.006-0.90	0.73-2.06
15		06.11-22.11.2011	4468	0.56-0.61	0.09-0.39	0.91-2.47
16		06.11-18.11.2011	728	0.52-0.74	0.09-0.10	1.09-3.08
17		06.11-18.11.2011	1111	0.52-0.54	0.007-0.14	0.92-2.49
18		05.01-31.05.2012	25481	0.54-0.70	0.004-0.4	1.50-5.66
19	**III**	04.01-04.02.2013	3703	0.52-0.61	0.008-0.25	0.72-1.70
		Итого: 313217		0.51-0.81	0.004-4.20	0.68-16.35

Примечание: N – число землетрясений в мультиплете; $\bar{R}_{corr}$ – вариации среднесуточного коэффициента корреляции в мультиплете; $\bar{f}_D$ – вариации среднесуточной частоты землетрясений в мультиплете, мин$^{-1}$; $\bar{A}$ – вариации среднесуточной амплитуды в мультиплете, мкм/с.

Все землетрясения режима «drumbeats» были разделены на три типа: I тип сопровождал движение основного «языка» лавового потока, II тип – второго «языка» потока, III тип – выжимание вершинной экструзии [3]. Мультиплеты землетрясений также были отнесены к трем типам (таблица 1).

Мультиплеты №1–3, 19 характеризовались значениями $\bar{A} = 0.72–3.34$ мкм/с с достаточно высокой частотой следования $\bar{f}_D$ до 3.33 мин$^{-1}$ и по времени совпадали с выжиманием вершинной экструзии. $\bar{R}_{corr}$ землетрясений в эти периоды достигал значений 0.62. С декабря 2010 г. по февраль 2011 г. частота $\bar{f}_D$ увеличилась при увеличении $\bar{A}$.

В конце февраля 2011 г. на склоне был замечен лавовый поток, к тому моменту его длина составила 300 м [2], этому периоду, по всей видимости, соответствуют мультиплеты № 4–10. Так как

среднесуточная амплитуда землетрясений, начиная с мультиплета № 4, значительно увеличилась до значений $\bar{A} = 0.92–16.39$ мкм/с. Максимальная $\bar{f}_D$ землетрясений регистрировалась в мультиплетах № 5 и № 7 (в марте и мае 2011 г.), когда лавовый поток небольшой мощности двигался по крутому склону вулкана вблизи его вершины и постепенно спускался к подножию вулкана. Максимальный среднесуточный коэффициент корреляции землетрясений в эти периоды $\bar{R}_{corr} = 0.73–0.76$ говорит о сильной связи между землетрясениями и едином механизме их происхождения.

По мере удаления от вершины происходило увеличение мощности фронта лавового потока и уменьшение $\bar{f}_D$. Максимальная $\bar{A}$ была зарегистрирована в мультиплетах № 8 и № 10, когда лавовый поток спустился к подножию вулкана. При этом землетрясения наблюдались достаточно редко с $f_D \le 3.16$ мин$^{-1}$.

Из 19 мультиплетов выделяются два самых продолжительных – это № 10 (76 суток) и № 18 (146 суток). Мультиплет № 10, регистрировавшийся на последней стадии движения основного «языка» лавового потока, содержал 125259 землетрясений, при этом $\bar{A}$ и $\bar{f}_D$ были максимальными в средней части мультиплета (рис. 2). Высокая степень корреляции для 4048 и 3471 землетрясений наблюдалась соответственно 6.10 и 10.09.2011 г. с $\bar{R}_{corr} = 0.81$, а 10.09 в 9:12:16 произошло сильнейшее землетрясение из всех событий, попавших в мультиплеты, с $A = 40.03$ мкм/с и $R_{corr} = 0.91$.

Рис. 2. Среднесуточная амплитуда $\bar{A}$ и среднесуточная частота $\bar{f}_D$ землетрясений мультиплета №10 в период 31.07–14.10.2011; среднесуточный коэффициент корреляции $\bar{R}_{corr}$ в диапазоне значений 0.56–0.81.

В октябре–ноябре 2011 г. одновременно регистрировались землетрясения от нескольких источников (№ 11–17). Этому периоду соответствует формирование второго «языка» лавового потока, землетрясения были достаточно слабыми с $\bar{A} < 3.55$ мкм/с. В этот период в мультиплетах отмечается самая низкая корреляция $\bar{R}_{corr} < 0.62$.

Мультиплет № 18, состоящий из 25481 землетрясений, сопровождал движение второго «языка» лавового потока до конца эффузивного периода извержения (июнь 2012 г.). В начале мультиплета наблюдалась слабая корреляция между землетрясениями с $\bar{R}_{corr} < 0.62$ (рис. 3).

Рис. 3. Среднесуточная амплитуда $\bar{A}$ и среднесуточная частота $\bar{f}_D$ землетрясений мультиплета № 18 в период 5.01–30.05.2012 г.; среднесуточный коэффициент корреляции $\bar{R}_{corr}$ в диапазоне значений 0.54–0.71.

Землетрясения с более схожей волновой формой стали регистрироваться с середины февраля 2012 г. С увеличением коэффициента корреляции до значений $0.65 < \bar{R}_{corr} < 0.7$, частота $\bar{f}_D$ начала снижаться (рис. 3), что, по всей видимости означало, что второй «язык» лавового потока стал

достаточно мощным и продвигался медленнее, но работал один источник генерации землетрясений. При этом вариации $\overline{A}$ сильно не отклонялись от 4 мкм/с, что косвенно указывало на постепенное уменьшение скорости движения фронта лавового потока.

Выводы

С помощью кросс-корреляционного детектора DrumCorr было выделено 19 мультиплетов сейсмического режима «drumbeats», зарегистрированного во время извержения в. Кизимен в 2010–2013 гг. Коэффициент корреляции землетрясений в мультиплетах был достаточно высокий $\overline{R}_{corr} \sim 0.7$, а в некоторых случаях достигал 0.81. Сильная корреляция между сигналами говорит о высокой степени подобия между ними и едином не разрушающемся механизме их генерации.

Максимальный $\overline{R}_{corr}$ наблюдался в мультиплете № 10 и составил $\overline{R}_{corr} = 0.81$, что совпало по времени с движением основного «языка» лавового потока большой мощности. Самая низкая корреляция наблюдалась в мультиплетах №№ 11–15, 17 с $\overline{R}_{corr} < 0.62$, когда формировался второй «язык» лавового потока. В остальных мультиплетах $\overline{R}_{corr} \sim 0.7$. Максимальная корреляция записей землетрясений относительно шаблона в каждом мультиплете наблюдалась в ближайшей временной окрестности относительно времени выборки шаблона. Как правило, в начале и конце мультиплета корреляция землетрясений снижалась.

В целом, на качественном уровне можно констатировать, что структура мультиплетов режимов «drumbeats» I и II определялась такими параметрами лавового потока, как мощность фронта и скорость его движения, связанного с расходом лавового материала и крутизной склона вулкана. Землетрясения в мультиплетах №№ 1–3, 19, сопровождавшие выжимание вершинной экструзии, характеризовались небольшими значениями $\overline{A}$ до 3.34 мкм/с с $\overline{f}_D$ до 3.33 мин$^{-1}$ с низким $\overline{R}_{corr} < 0.62$.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/, http://www.gsras.ru/unu/).

Список литературы

1. *Заводевкин И.А., Шакирова А.А., Фирстов П.П.* Выделение землетрясений с близкими волновыми формами и магнитудой в потоке сейсмических событий (программа DRUMCORR) // Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография. Том XIX / Под ред. Е.М. Нестерова, В.А. Снытко. СПб.: Издво РГПУ им. А.И. Герцена, 2020. С. 68–72.

2. *Овсянников А.А., Малик Н.А*. Тефра извержения вулкана Кизимен в декабре 2010 г. – феврале 2011 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы: региональная научная конференция, посвящённая Дню вулканолога, 30 марта – 1 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 57–61.

3. *Фирстов П.П., Шакирова А.А*. Особенности сейсмичности в период подготовки и в процессе извержения вулкана Кизимен (Камчатка) в 2009–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2014. № 4. С. 3–20. https://doi.org/10.7868/S0203030614040026.

4. *Фирстов П.П., Шакирова А.А*. Сейсмический режим «drumbeats», предваряющий и сопровождающий извержения андезитовых и дацитовых вулканов и его особенности (обзор) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 3. Вып. № 43. С. 75–88. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-3-43-75-88.

5. *Frémont M., Malone S.* High precision relative locations of earthquakes at Mount St. Helens, Washington // Journal of geophysical research. 1987. V. 92. P. 10223–10236. https://doi.org/10.1029/JB092iB10p10223.

6. *Green, D. N., Neuberg J.* Waveform classification of volcanic low-frequency earthquake swarms and its implication at Soufriere Hills Volcano, Montserrat // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2006. V. 153. P. 51–63.

7. *Matoza R.S., Chouet B.A.* Subevents of long-period seismicity: Implications for hydrothermal dynamics during the 2004–2008 eruption of Mount St. Helens // Journal of geophysical research. 2010. V. 115. P. 1–26. https://doi:10.1029/2010JB007839.

8. *Power J. A., Lalla D.J.* Seismic observations of Augustine Volcano, 1970-2007: Chapter 1 in the 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska // Professional Paper 1769–1. 2010. P. 1–38. https://doi.org/10.3133/pp17691.

9. *Stephens, C. D., Chouet B.A*. Evolution of the December 14, 1989 precursory long-period event swarm at Redoubt Volcano, Alaska // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2001. V. 109. P. 133–148.

10. *Wellik J.J., Prejean S.G., Syahbana D.K.* Repeating Earthquakes During Multiple Phases of Unrest and Eruption at Mount Agung, Bali, Indonesia, 2017 // Front. Earth Sci. 2021. V. 9. P. 1–11. https://doi:10.3389/feart.2021.653164.

UDC 550.343

THE LASER TECHNOLOGY FOR EARTHQUAKE'S FORECAST AND FOR DIFFERENT APPROACHES OF SEISMIC HAZARD ASSESSMENT

Pankov F.[1], Norden D.[1], Pankov N.[1], Pigulevskiy P.[2], Feshchenko A.[2], Shcherbyna S.[2]

[1]Institute of Seismology and Geodynamics of V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia, pankovfn@gmail.com
[2]Institute of Geophysics NAS Ukraine of S.I. Subbotin, Kyiv, Ukraine

Introduction

Historically, the first laser-deformograph was developed by group of Geophysical Observatory of the Tavria National University named after I. Vernadsky (formerly Simferopol State University named after M.V. Frunze) and started to work in 1981. This laser complex allowed to carry out the measurements of the Earth's long time deformation. The measuring volume of the observatory was located in an adit (depth of about 20 meters), which connects the right rangefinder post with the main battery structure and has a series of sealed baffles (doors, hatches) that isolate it from external influences. In the capacity of the main tools for studying oscillatory processes in the environment, the Geophysical Observatory used two-beam laser interferometers of the Michelson type with spaced beams, which have very high metrological characteristics and use the wavelength of a frequency-stabilized laser as a reference. Engineering support of the interferometric complexes' functioning in the Geophysical Observatory was carried out by: F.N. Pankov, A.V. Buklersky, V.I. Tokarev [5].

Research Method

Laser technology has significantly changed during the last 20–30 years, and a Japanese company KEYENCE has developed a special laser device LK-031 [6] with one laser ray, that allows independence from air temperature influences, owing to the main part of the device, which is located inside a special leak-proof box [6]. This laser leak-tight device is connected to the special LK-2001 controller, and from there several millivolts are sent to a special amplifier (fig. 1, fig. 2). After this step, the analog part of the laser complex uses the special amplifier (F. Pankov), which allows about +/- 10 V for input to the special 8-channel 24-bit ADC (F. Pankov & D. Norden) [4]. The fact of using of 8-channel ADC allows to measure temperature and air pressure simultaneously with detecting the presence or absence of influences from these external sources on the state of laser complex for measuring Earth's deformation.

Fig. 1. A general scheme of a laser complex for measuring horizontal displacements

Fig. 2. LK-031 laser with a reflected red ray on a special metallic reflector with a mirrorless surface

To obtain the physical displacement units, a special approach was used to calibrate the laser device LK-031 on a special calibration device (fig. 3). This calibration device uses two infrared beams to measure the two components to move the external devices along the X and Z axes with clear periodic sine signals. The patented calibration device (fig. 3) was tested on a international standard RENISHAW XL-80 metrological laser device and received a special certificate of «UKRMETRTESTSTANDART» (fig. 4).

Fig. 3. Calibration of the metrological device on base the using of RENISHAW XL-80 laser for estimation metrological properties.

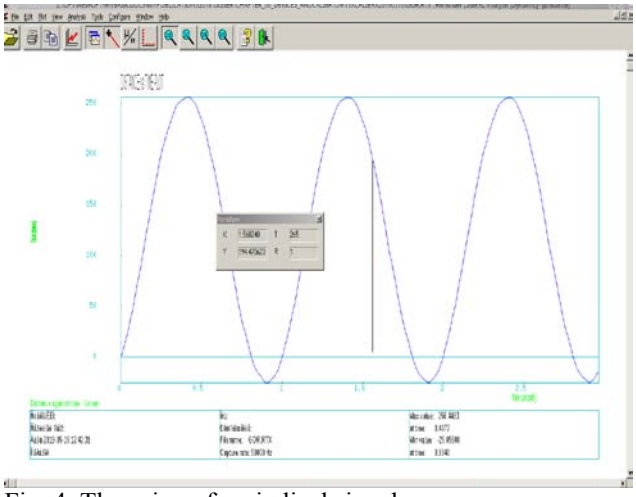


Fig. 4. The using of periodical signal «UKRMETRTESTSTANDART» from metrological laser RENISHAW XL-80 device for certification and for receiving permission to work in the area the calibration geophysical different devices.

After mechanical tests and the selection of optimal variants for measuring the displacement based on the use of laser devices, special studies were conducted to select the optimal discretization rate of the input analog data from various sources of geophysical parameters. As it was found, the optimal frequency for these streams of different physical nature is 8 Hz. It allows to gather information about typical remote seismic events with a low frequency and gives opportunity to obtain data from a low-frequency laser. An example of low-frequency laser data (8 Hz) is shown in fig. 5.

Spectral laser data (fig. 6) shows different frequency values in both main signals, because the KEYENCE LK-031 laser device has the ability to capture very low frequency data – from the minimum frequency value of 0 to the maximum value of 8 Hz, which is now used on a special unit in this special system to measure the deformation of the Earth's surface. To obtain real and meaningful information about the Earth's deformation, the optimal time period for continuing this measurement is at least 2–3 weeks.

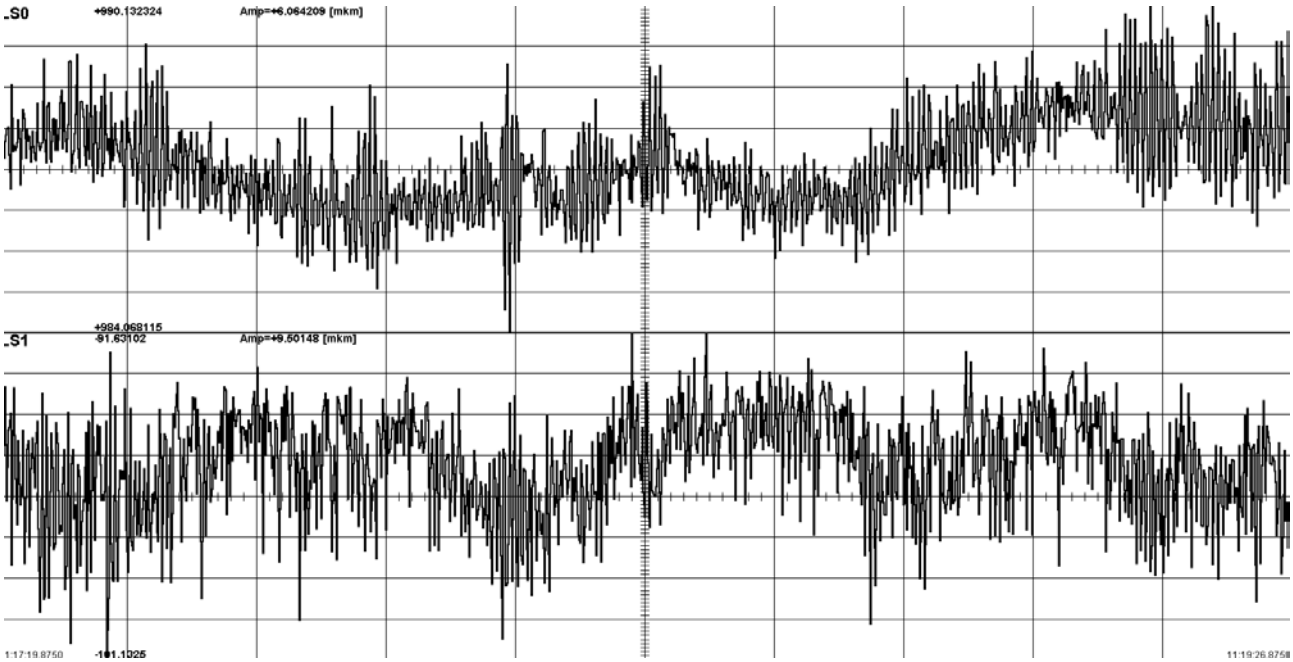


Fig. 5. Laser recordings of the Earth's surface deformation and external transport noise.

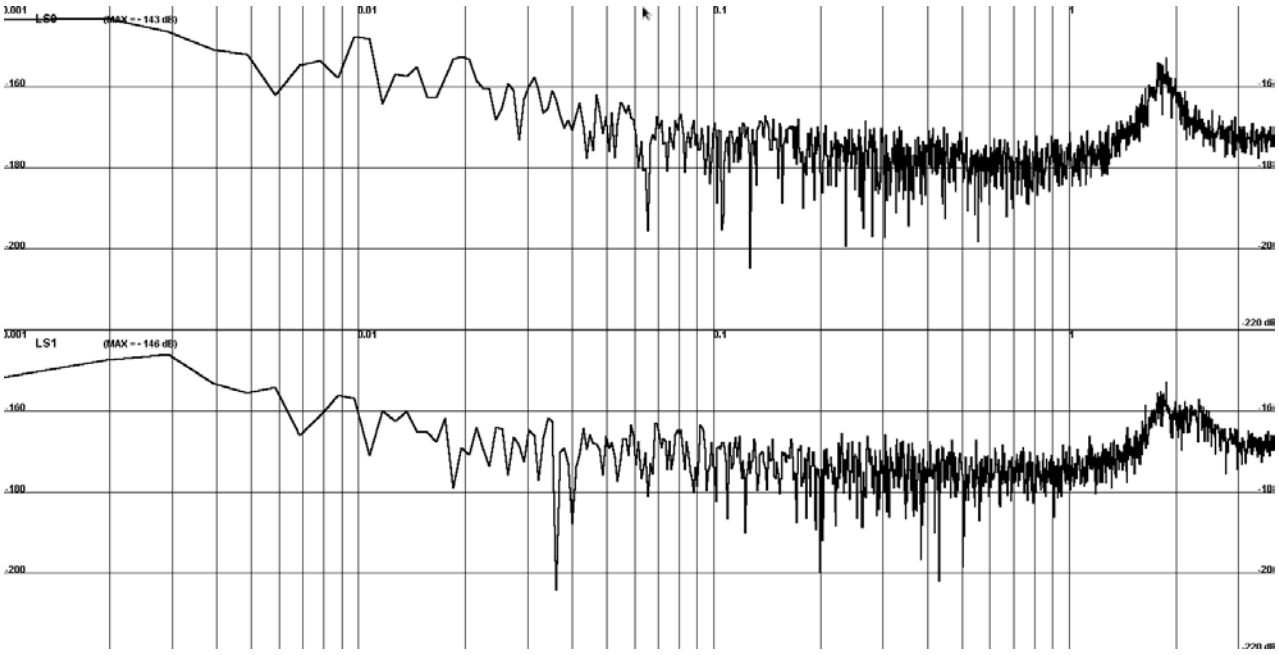


Fig. 6. The spectra of laser records (fig. 5) with reflecting as a low natural frequency and high technical frequency.

Research results

A long measurement period allows to get basic information about the properties of Earth's deformation in the area of its intrinsic nature. As we know, the deformation of the planet Earth can last for about 100 million years or more, and this long process of deformation of the mantle or the core is of a tectonic nature (fig. 7). Otherwise, there are shorter periods of deformation of the Earth, and they are based on external influences and forces. The group of external forces includes the gravitational forces of the Moon and the Sun. Both of these external sources of gravitational influences periodically deform the Earth's core and mantle. One horizontal laser Y-axis captured it, and after calculations, it was found that this stable fixation lasted about two weeks.

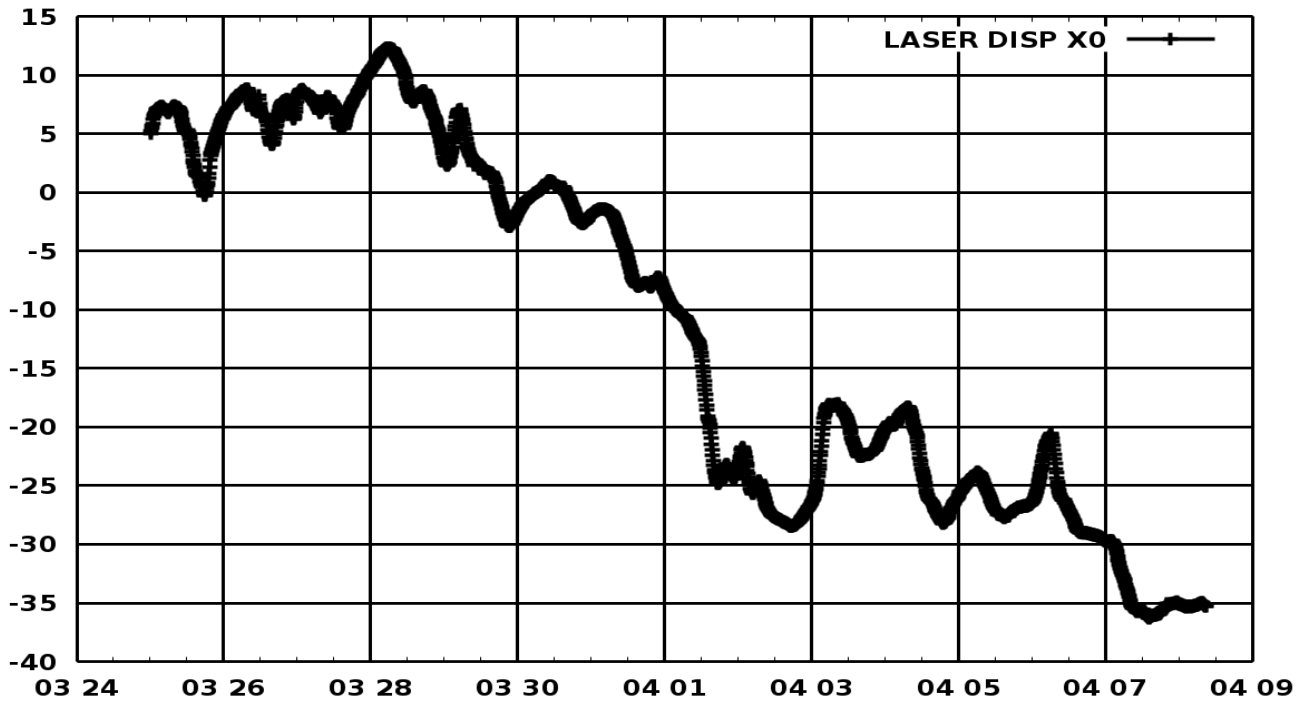


Fig. 7. The diurnal period of the Earth deformation fixed from 24 March to 09 April 2021

For a more accurate estimation of the period, it is optimal to calculate the data spectrum to obtain an existing or absent special frequency equal to the inverse value of the diurnal period of the Sun (fig. 8). As we can see, the maximum value of the spectral data is equal to one diurnal frequency. After this positive result, we can trust the new laser complex to measure the horizontal deformation of the Earth.

A more significant event in this process of horizontal displacement of the Earth based on the use of a laser deformograph is the detection of a horizontal gravitational anomaly before the earthquake that occurred in the active tectonic zone of Kamchatka-M6.6, 2021-03-16, 18:38 GMT (fig. 9).

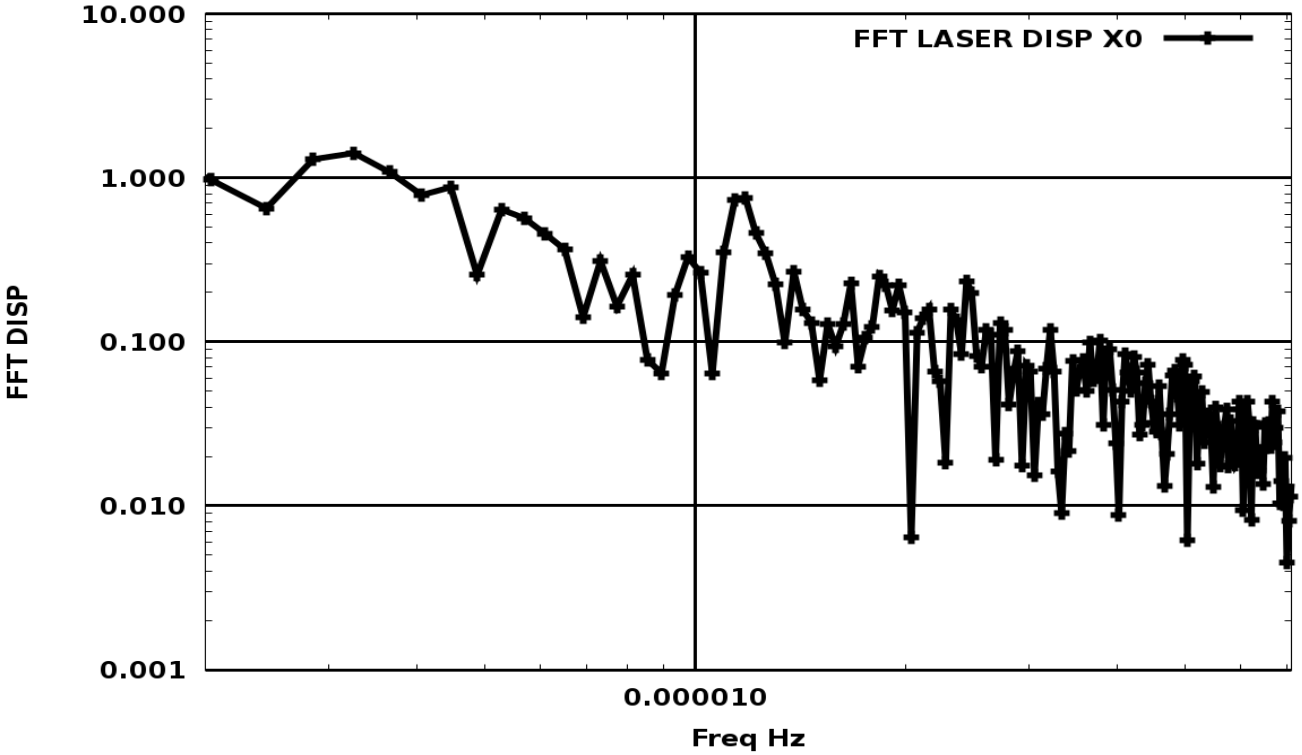


Fig. 8. The spectrum of horizontal laser data of the channel Y for searching diurnal period.

As we can see, a typical seismic record (fig. 9, top) shows no positive or negative information before, during, or after this strong seismic event. The air pressure (fig. 9, below) stopped changing in the same time period as the laser channel Y. The laser recording (fig. 9, center) shows the following changes in the Earth's deformation before, during, and after the Kamchatka earthquake:

1) The first part before it: the Y-deformation has grown. The reason for this may be the shifting of the tectonic structure in the East-West direction;

2) The second part before it: the Y-deformation has decreased. The reason for this may be the shifting of the tectonic structure in the opposite direction from west to east;

3) After the earthquake in Kamchatka: the Y-deformation has increased significantly. The reason for this may be the shifting of the tectonic structure in the East-West direction.

Before the Kamchatka earthquake, we see a preliminary correlation between the deformation of the Earth and the stabilization of atmospheric pressure. After the earthquake in Kamchatka, the air pressure began to rise. This step in the dynamics of atmospheric pressure has a sharp significance, since the cause may be a prolonged tectonic wave from the Kamchatka fault areas. The proof of this preliminary hypothesis may be the presence of significant amounts of deformation of the Earth after this strong earthquake.

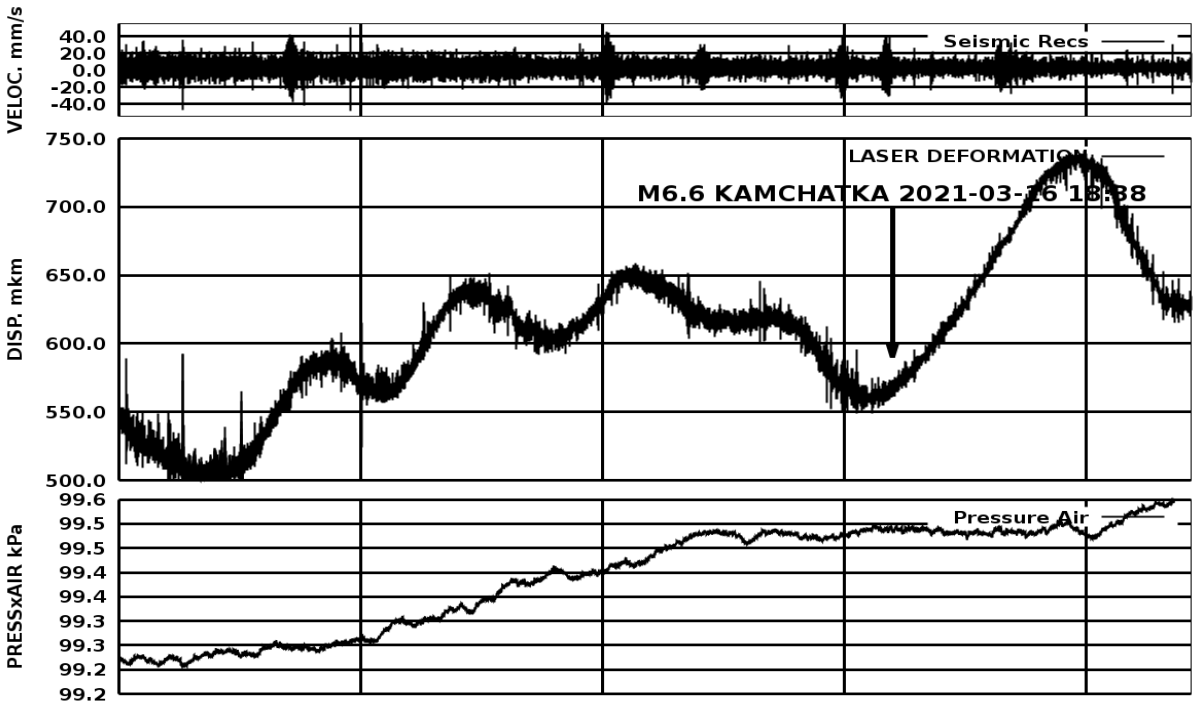


Fig. 9. Three different records of the Earth's different geophysical information before and after earthquake in the Kamchatka: top – vertical seismic record, middle – diurnal and anomalies horizontal Y displacement, the pressure of the air.

Conclusion

The preliminary results and conclusions of this research in the field of laser technologies for Earth science can be as follows. The use of long-term 2D laser complexes makes it possible:

1) to study long-term tectonic and artificial (technical) deformations in areas where they are dangerously active [1–3];

2) to collect various methods of laser data analysis and evaluating their significance based on statistical analysis approaches;

3) to increase the number of laser complexes to improve the quality of the data obtained in various fields of research;

4) to inform other interested scientific, state and commercial organizations about the latest achievements in the use of laser technology;

5) to develop special real-time software for analyzing the data streams of a particular laser;

6) to create a dedicated website for real-time and on-line analysis of laser data in various fields: earthquake forecasting and assessment of the stage of new buildings in areas of dangerous earthquakes;

Laser technology is a r ich scientific and technical method that allows scientists to solve various problems in the areas of dangerous earthquakes in Kamchatka.

References

1. *Brytskij A.I., Sherbina S.V.* Forecast especially dangerous seismic events with complex laser device // JGD. 2011. 11. N. 2. P. 32–34.

2. *Kendzera O.V., Byelov I.D., Shcherbina S.V., Lisovyi Yu.V., Ilyenko V.A., Haydaychuk V.V., Dyedov O.P., Cherevko I.A.* Experimental Verification of Calculated Vibrating Models of Great Lavra Bell Tower in Lavra Reserve // Geoinformatika. 2016. 58. N. 2. P. 68–78.

3. *Shcherbina S.V., Bricz`kyj O.I., Ilyenko V.A., Byelov I.D., Ostapenko V.V., Lisovyi Yu.V., Czubin O.A., Dyedov O.P., Pigulevskiy P.G.* Investigation into Soil Subsidence in Historical Part of Kyiv in the National Reserve "Sophia of Kyiv" // Geoinformatika. 2017. 61. N. 1. P. 72–79.

4. *Sherbina S.V., Lisovyi. Ju.V.* The software for on-line telemetric system of microseismic data collection and processing // JGD. 2008. 7. N. 1. P. 110–115.

5. The Geophysical Observatory of the Tavrikal National University – http://www.ccssu.crimea.ua/tnu/str_praz/observatory/index.htm

6. Ultra High-Speed / High-Accuracy Laser Displacement Sensor LK031. https://www.keyence.com/products/measure/laser-1d/lk/models/lk-031/

Цунами: опасность и предупреждение

УДК 550.344.42

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА УСЕЧЕННОГО СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЦУНАМИ

***Воронина Т.А.*[1], *Лоскутов А.В.*[2]**

[1]*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, vta@omzg.sscc.ru*
[2]*Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова, г. Москва, loskutov-imgg@yandex.ru*

Введение

Повышение надежности прогнозов цунами может быть частично достигнуто с помощью численного моделирования, которое позволяет оценить ожидаемое распространение и набег, высоту волн и время прибытия цунами в защищенные районы. Ключевым вопросом оценки возможных характеристик проявления волны на побережье остаются начальные условия, т.е. начальная форма поднятия воды (далее - источник цунами) в области сейсмического очага. Инверсия волновых форм цунами - широко распространенный в настоящее время подход для реконструкции источника цунами, поскольку сейсмические данные часто неточно переводятся в данные о цунами, кроме того, распространение волны цунами может можно моделировать более точно, чем сейсмические волны. Для восстановления источника цунами, полученном как решение обратной задачи математическими методами, в основном используются подходы, основанные на численном представлении функции Грина [3], на сопряженном методе [4] и методе минимальной невязки [7], нашедшие широкое применение в и развитие в последующих работах. В данной работе задача восстановления первоначальной формы волны цунами по измерениям формы пришедшей волны в серии удаленных приемников ставится как обратная задача математической физики. Эта задача является некорректной. Регуляризация оператора в этом случае осуществляется путем сужения оператора на подпространство, являющееся линейной оболочкой первых правых сингулярных векторов. Меняя величину размерности этого подпространства на основе анализа свойств оператора прямой задачи, определяемых системой наблюдения и батиметрией., можно контролировать погрешность решения. Этот подход к решению задачи восстановления источника цунами был предложен Т.А. Ворониной и В.А. Чевердой для модельных случаев в работах [1, 8, 9], а затем и для восстановления источника цунами по реальным данным [10, 11, 12]. Качество получаемого решения зависит, кроме уровня шумов, от системы наблюдения, выбранного подпространства решения и набора модельных функций, используемых для представления функции источника цунами.

Для успешного прогнозирования цунами первостепенное значение имеет скорость получения оценок высот волны. Это ставит вопрос об оптимальном планировании системы донных датчиков в районе обнаруженных локализаций прогнозной сейсмической активности для наилучшего восстановления параметров источников цунами от ожидаемых землетрясений.

Влияние таких характеристик, как количество и пространственное расположение записывающих устройств, было предметом обсуждения в статье [2]. В работах Ворониной Т.А. [8-12] исследовалась зависимость решения рассматриваемой задачи от количества и азимутального расположения регистраторов цунами для различных постановок. В данной работе представлена методика выбора оптимальной системы наблюдения.

Метод

Математическая постановка задачи и применяемыq подход к ее решению подробно изложен в [1,8-10]. Предполагается, что источником цунами является вертикальное смещение океанского дна, вызванное главным толчком землетрясения - поршневая модель цунами. Для всей области, от зоны генерации и вплоть до линии расположения мареографов для описания процесса распространения волн цунами может использоваться линейное приближение мелкой воды. Функция $\eta\,(x,y,t)$ - есть функция колебания уровня свободной поверхности и решение следующей начально-краевой задачи:

$$\eta_{tt} = \nabla^T\,(gh\,(x,y)\,\nabla\eta); \qquad (1)$$

$$\eta|_{t=0} = \varphi(x,y); \quad \eta_t\,|_{t=0} = 0; \qquad (2)$$

$$\frac{\partial\,\eta}{\partial\,\vec{n}}\,|_S = 0; \quad -c\overrightarrow{V}\cdot\vec{n} - \eta_{tt} + \frac{c^2\,\partial^2\,\eta}{2\partial\tau^2}\,|_\Gamma = 0; \qquad (3)$$

На береговой линии S выполняется условие абсолютно отражающей твердой стенки, глубина океана считается функцией двух переменных, область источника известна из сейсмических данных. На так называемых открытых морских границах Γ в данном алгоритме реализованы абсолютно поглощающие краевые условия второго порядка точности. Здесь $h(x,y)$ - гладкая функция, описывающая рельеф дна, g - ускорение силы тяжести, фазовая скорость волны определяется как $c(x,y) = \sqrt{g\,h(x,y)}$. Математическая постановка задачи в этих предположениях состоит в определении первоначального поднятия свободной поверхности $\eta\,(x,y,t)$, описываемого некоторой финитной функцией $\varphi(x,y)$ в области предполагаемого источника цунами в прямоугольнике $\Omega = [l1 \times l2]$ по колебанию уровня свободной поверхности, известному на некотором множестве точек

$$\eta(x,y,t)|_M = \eta_0(x_i,y_i,t),\ \ M = \{\,(x_i,y_i), i = 1,\dots,P\}. \qquad (4)$$

Аппроксимация задачи осуществляется на основе конечно-разностного подхода: использовалась явно-неявная разностная схема, построенная на четырехточечном шаблоне и равномерной прямоугольной разнесенной сетке. Схема имеет второй порядок аппроксимации по пространственным переменным и первый по времени. неизвестная функция $\varphi(x,y)$ ищется в виде конечного отрезка ряда Фурье по пространственным гармоникам с неизвестными коэффициентами $\{c_{mn}\}$

$$\varphi(x,y) = \sum_m^M \sum_n^N c_{mn}\, sin\frac{m\pi}{l1}x\ sin\frac{n\pi}{l2}y = \sum_m^M \sum_n^N c_{mn}\,\varphi_{mn}(x.y).$$

Для поиска этих коэффициентов решается система

$$\boldsymbol{A}\,\vec{\boldsymbol{c}} = \overrightarrow{\boldsymbol{\eta_0}}, \qquad (5)$$

где вектор $\vec{\boldsymbol{c}}$ состоит из всех коэффициентов $\{c_{mn}\}$, а вектор $\vec{\boldsymbol{\eta}}_{\boldsymbol{0}}$ - из мареограмм во всех точках наблюдения. Для полученной при этом матрицы выполняется SVD-анализ и строится обобщенное нормальное r-решение, которое и является восстановленной приближенно первоначальной формой волны цунами

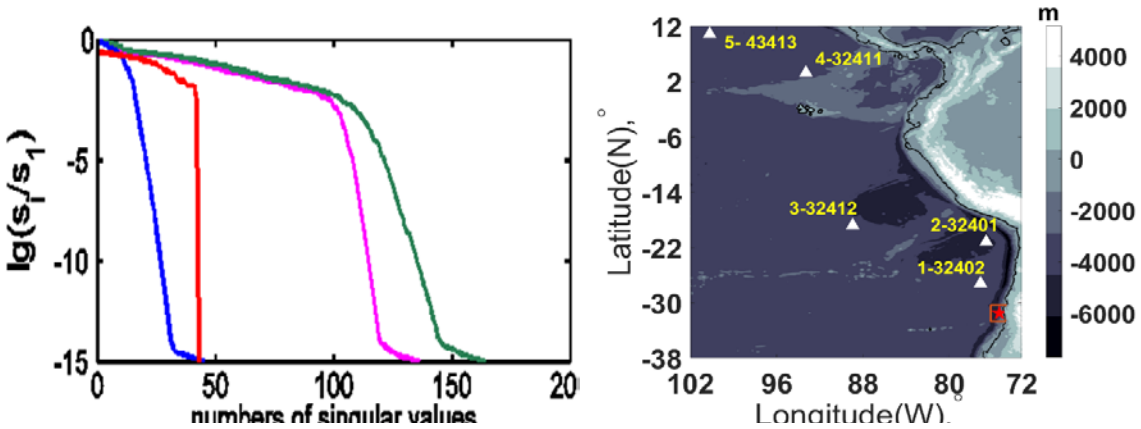
$$\boldsymbol{\varphi}^{[r]}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = \sum_{\boldsymbol{j=1}}^{\boldsymbol{j=r}} \boldsymbol{\alpha_j}\,\vec{\boldsymbol{v}}_{\boldsymbol{j}}(\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{y}) = \sum_{\boldsymbol{j=1}}^{\boldsymbol{j=r}} \boldsymbol{\alpha_j} \sum_{m=1}^{M}\ \sum_{n=1}^{N} \beta_{mn}^{j}\varphi_{mn}(x,\ y). \qquad (6)$$

Здесь $\alpha_i = \frac{\left(\vec{\eta}_0 \circ \vec{u}_i\right)}{s_i}$, где $\{\boldsymbol{s_i}, \vec{\boldsymbol{u}}_{\boldsymbol{i}}, \vec{\boldsymbol{v}}_{\boldsymbol{i}}\}$ - сингулярные числа, правые и левые сингулярные векторы матрицы системы (5). В рассматриваемой задаче сингулярные числа оператора быстро убывают с ростом их номеров, это и означает некорректность данной задачи. Меняя величину r, можно контролировать погрешность решения. Естественно, что с увеличением числа r повышается информативность получаемого r-решения. В конечном итоге величина r определяется поведением сингулярного спектра, которое зависит от системы наблюдения, батиметрии и уровня помех в данных.

Выбор оптимальной системы наблюдения

С первых попыток применения описанного подхода ([8]) для бассейна постоянной глубины ставился вопрос об оптимальном количестве и азимутальном покрытии регистраторов распространяющейся волны. Было установлено, что, в отсутствие шумов, увеличение количества датчиков улучшает качество инверсии, а при фиксированном их количестве – значительное влияние имеет увеличение азимутального покрытия до полного развернутого угла 2π. При этом удаленность датчиков от источника цунами, как и во всех последующих численных экспериментах, не сказывалась на результате инверсии. Исследования для модельного дна ([9]), имитирующего береговой шельф («корыто» Гусякова), когда в качестве начального поднятия дна бралась функция, представляющая собой комбинацию положительного и отрицательного смещений воды типа «пологого надвига с падением под островную дугу», показали, что наиболее значимым при восстановлении модельного источника являются данные, полученные датчиками, расположенных на направлении наибольшей изменчивости источника, что соответствовало наиболее интенсивному направлению распространению энергии. Увеличение линейной апертуры более, чем проекция источника на береговую линию, не приводило к уменьшению погрешности восстановления. Следующие численные эксперименты проводились для реальной батиметрии побережья Перу, упомянутого выше модельного источника и модельной системы наблюдения, состоящей из 14 датчиков [9] с хорошим азимутальным покрытием. В целом, все полученные ранее выводы подтвердились с той лишь разницей, что теперь наиболее информативным направлением стало направление, соответствующее углам падения и отражения от береговой линии направления наибольшей изменчивости синтетического источника. По данным семи датчиков на информационных направлениях хорошо восстанавливались мареограммы в остальных семи.

Выяснилось, что только расположение датчиков на наиболее информативных направлениях обеспечивает восстановление мареограмм не только в пунктах наблюдения, но и в тех, данные которых не использовались в инверсии.



а) б)

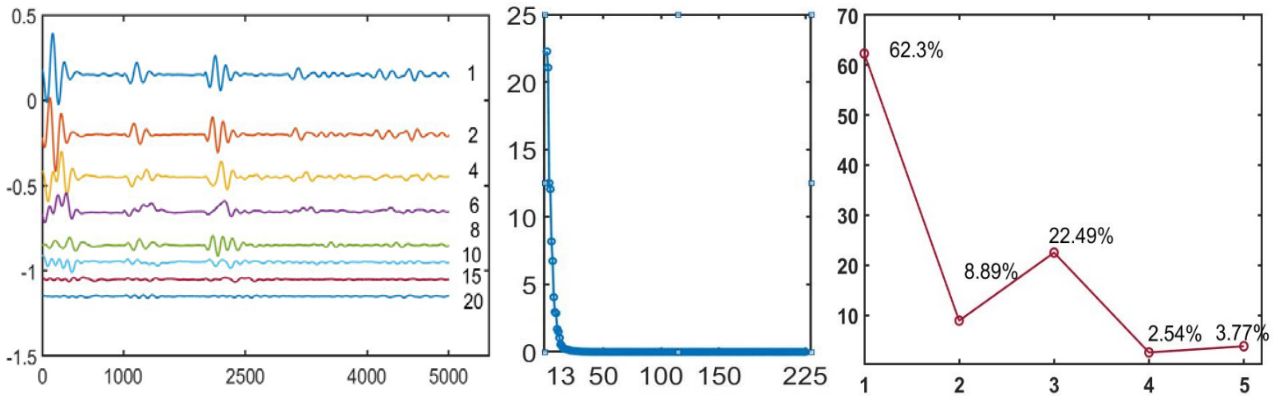
Рис. 1. а) типичные сингулярные спектры матрицы А из [12], соответствующие расчетам с 4-мя (синий), 3-мя (красный), 9-ю (сиреневый) и 10-ю (зеленый) датчиками; б) область моделирования для Иллапель цунами 16.09.2015. Белые треугольника – ДАРТЫ, красный прямоугольник – область поиска источника цунами; красная звездочка – эпицентр землетрясения.

Сравнение сингулярных спектров матрицы при разных системах наблюдения позволяет судить об эффективности этих систем. На Рис.1а представлены графики десятичных логарифмов сингулярных чисел матрицы А из работы [9] для расчетов с разным количеством датчиков. В рассматриваемой задаче сингулярные числа оператора быстро убывают с ростом их номеров, это и означает некорректность данной задачи. Свойства спектра определяются, в том числе и системой наблюдения. Чем длиннее первый пологий участок графика спектра, тем большее число r можно использовать, т.е. тем больше размерность подпространства решения и, следовательно, тем решение будет более информативно. Если датчики имеют лучшую локацию– меньшее их количество может иметь более «привлекательный» спектр. Как показали расчеты для реальных событий, графики спектров могут быть близки и выбор оптимальной системы наблюдения затруднен.

В данной работе представлен способ, позволяющий проанализировать распределение энергии волны цунами между датчиками системы наблюдения и выбрать располагающиеся на наиболее энергоемких направлениях. Метод продемонстрирован ниже на примере расчетов для чилийского Иллапель цунами 16.09.2015. В этом примере: M = 15; N = 15; количество датчиков равно 5, матрица A имеет размерность 225×5005, во всей области моделирования 1-минутная прямоугольная сетка (1921×3001), по времени отсчеты с интервалом 4 сек., батиметрия согласно GEBCO http://www.gebco.net/.

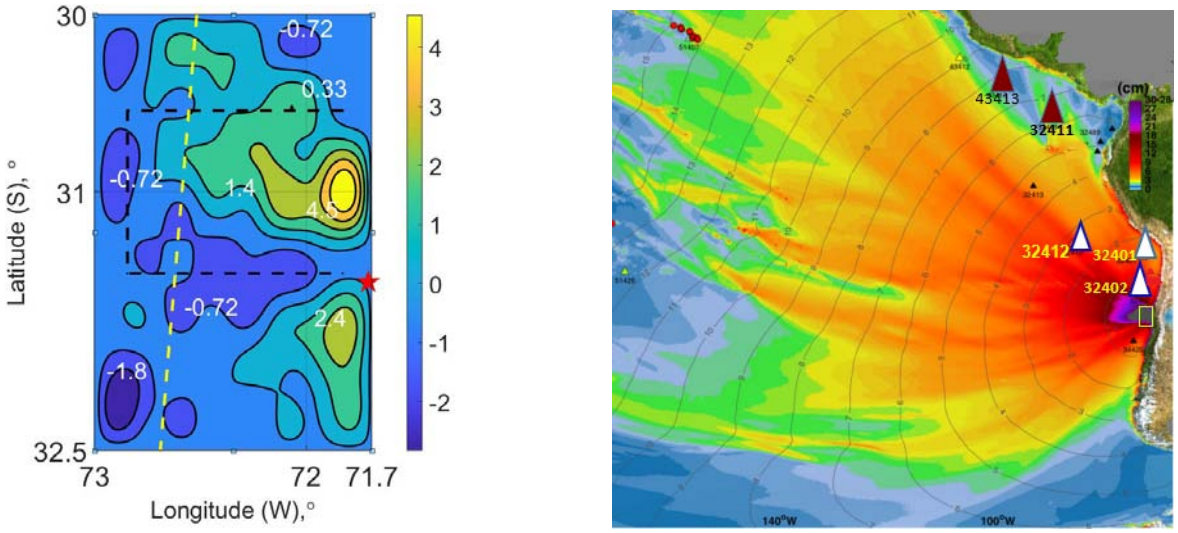
Для полученной матрицы А выполняется сингулярное разложение, определяется ее сингулярная система $\{\boldsymbol{v_i}, \boldsymbol{u_i}, \boldsymbol{s_i}\}$. Каждый правый сингулярный вектор $\boldsymbol{v_i}$ порождает моду $\{\boldsymbol{s_i}\ \boldsymbol{u_i}\}$, здесь $\boldsymbol{u_i}$ - левые сингулярные векторы той же матрицы, а $\boldsymbol{s_i}$ - ее сингулярные числа. Каждая мода состоит из мареограмм в каждом датчике, $A\ \boldsymbol{v_i} = \boldsymbol{s_i}\ \boldsymbol{u_i}$. Учитывая резкое убывание сингулярных чисел с ростом их номеров, можно утверждать, что только первые моды, соответствующие первым сингулярным числам, имеют значение в смысле переноса информации. Это четко прослеживается на графиках амплитуд волны в каждом датчике на Рис. 2а. Каждый из представленных графиков – это мода, номер которой указан справа и которая состоит из последовательно записанных мареограмм в ДАРТ-ах согласно системе наблюдения, представленной на Рис.1б. Рисунок 2б показывает, что первые моды, ассоциирующиеся с максимальными сингулярными числами, переносят 80% энергии. Доля энергии, переносимой i-той модой, оценивается по формуле $s_i^2 / \sum_i s_i^2$. На Рис. 2в, показано распределение суммарной энергии волны, переносимой всеми модами в каждом ДАРТ-е, понятно, что наиболее информативными являются данные ДАРТ-ов 32402, 32401 и 32412. Это подтверждается расчетами распространения энергии волны цунами, представленном в [6] на Рис. 3(б). Видно, что наибольшая энергия переносится в направлении ДАРТ32402 и ДАРТ32412 и только потом – ДАРТ32401, хотя он расположен существенно ближе к источнику цунами.

Как показано в [12], присутствие данных DART32402, DART32412, DART32412, как данных с направлений наиболее интенсивного распространения энергии цунами, позволяет восстановить мареограммы в точках акватории, соответствующих DART32411 и DART43413 без их участия. Если в инверсии не участвуют данные DART32412, они не восстанавливаются ни при каких вариантах системы наблюдения, что можно видеть на Рис. 4. Отсутствие данных со столь информативного направления не возмещается. На Рис.3а показан пример восстановления источника цунами по данным двух DART32401 и DART32402.



а) б) в)

Рис.2. а) графики *мод*; б) распределение в процентах энергии, переносимой каждой *модой;* в) распределение энергии волны цунами между датчиками (DART): 1-32402; 2-32401; 3-32412; 4-32411; 5- 43413.



а) б)

Рис. 3. а) распределение смещения поверхности океана в зоне поиска предполагаемого источника цунами, восстановленное с использованием данных DART 32401 и 32402; желтый пунктир – ось Атакамского Желоба; черный пунктир – область источниа цунами, вычисленная методом обращения лучей. б) распределение энергии волны Иллапель цунами 16.09.2015 согласно работе [6].

Заключение

Для достоверного восстановления источника цунами и мареограмм в рамках предложенного подхода надо использовать данные глубоководных датчиков уровня поверхности океана от наиболее информативной части системы наблюдения. В настоящей работе предложена методика поиска наиболее информативной части системы наблюдения, использование которой не только повышает точность восстановления, но и обеспечивает без дополнительных расчетов, вычисление высот волны в любых, заранее фиксированных точках акватории. Численные эксперименты с модельными системами наблюдения на этапе предварительных расчетов для зон прогнозируемой цунами опасности могут быть обоснованием для планирования размещения глубоководных датчиков. Такие датчики располагаются на направлениях наиболее интенсивного распространения энергии цунами.

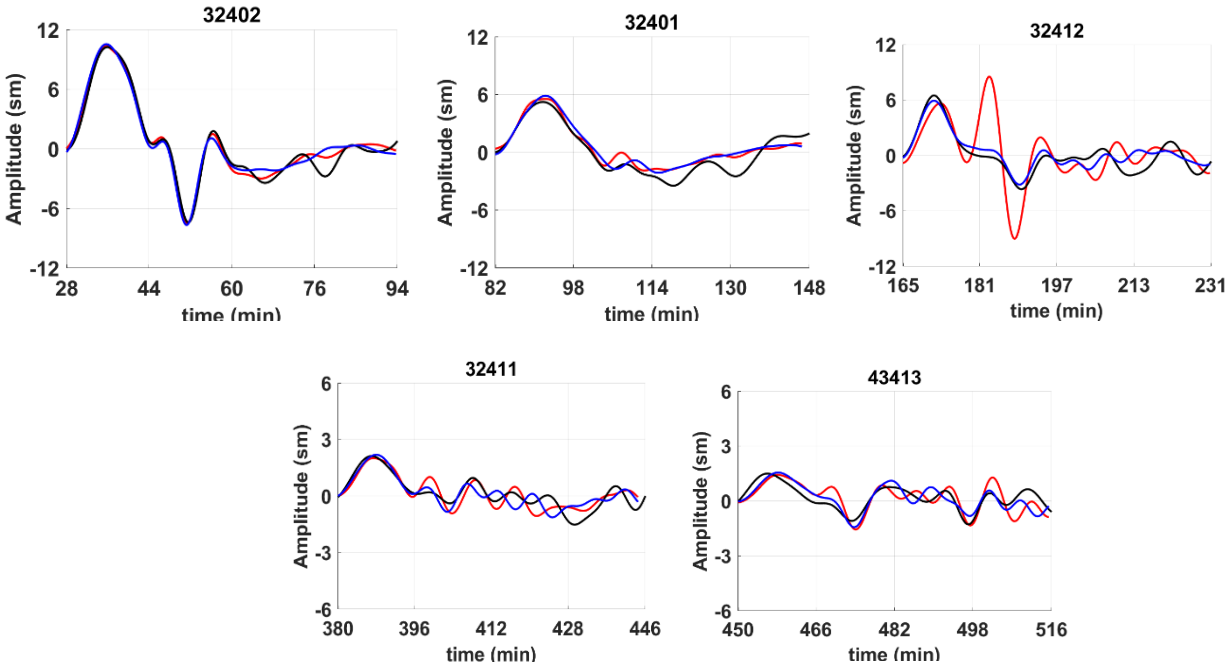


Рис.4. Сравнение наблюденных мареограмм (черные) и восстановленных при участии данных ДАРТ 32401 и 32402 (красные) и мареограмм, восстановленных, когда к указанным добавлены данные ДАРТ 32412 (синие); на оси Ox – время от начала события.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (0315-2020-0005).

Список литературы

1. *Воронина Т.А.* Определение пространственного распределения источников колебаний по дистанционным измерениям в конечном числе точек // СибЖВМ. 2004. Т.7. № 3. С. 203–211.

2. *Mulia I.E., Gusman A.R., Satake K.* Optimal design for placements of tsunami observing systems to accurately characterize the inducing earthquake // Geophysical Research Letters. 2017. №44. DOI: 10.1002/2017GL075791.

4. *Pires C., Miranda P.M.A.* Tsunami waveform inversion by adjoint methods // J. Geophys.Res. 2001. № 106. P. 19773-19796.

5. *Satake K.* Inversion of tsunami waveforms for the estimation of a fault heterogeneity: Method and numerical experiments // Journal of Physics of the Earth. 1987. V. 35. № (3). P. 241–254. https://doi.org/10.4294/jpe1952.35.241.

6. *Tang L., Titov V.V., Moore C., Wei Y.* Real-Time Assessment of the 16 September 2015 Chile Tsunami and Implications for Near-Field Forecast // Pure and Applied Geophysics, 2016. № 17. P. 369–367.

7. *Titov V.V., Gonzlez F.I., Bernard E.N., Eble M.C., Mofjeld H.O., Newman J.C., Venturato A.J.* Real-time tsunami forecasting: Challenges and solutions. // Nat. Hazards, Special Issue. U.S. National Tsunami Hazard Mitigation Program. 2005. №35 (1). P. 41–58.

8. *Voronina T.A., Tcheverda V.A.* Reconstruction of tsunami initial form via level oscillation // B ull. Nov. Comp.Center. Math. Model. in Geoph., 1998. № 4. P. 127–136.

9. *Voronin V.V., Voronina T.A., Tcheverda V.A.* Inversion method for initial tsunami waveform reconstruction // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2015. № 15. P. 1251–1263.

10. *Voronina T.A., Romanenko A.A.* The New Method of Tsunami Source Reconstruction With r-Solution Inversion Method // Pure Appl. Geophysics. 2016. V. 173. № 12. P. 4089–4099.

11. *Voronina T.A.* Recovering a Tsunami Source and Designing an Observational System Based on an r-Solution Method // Numerical Analysis and Applications. 2016. V. 9 № 4. P. 267-276. ISSN 1995–4239.

12. *Voronina T.A., Voronin V.V., Cheverda V.A.* The 2015 Illapel Tsunami Source Recovery by Inversion of DART Tsunami Waveforms Using the R-Solution Method // Pure and Applied Geophysics. 2019. V. 176. № 7. P. 2985–2993.

УДК 550.34

ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ РИОЦ «ПЕТРОПАВЛОВСК» В РАМКАХ СЛУЖБЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ И СЛУЖБЫ СРОЧНЫХ ДОНЕСЕНИЙ В 2019–2020

Губанова А.А., Крупина Е.М., Дрознин Д.В., Чебров Д.В.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, rioc3@emsd.ru

Введение

Службу предупреждения о возможности цунами с момента организации этой службы в г. Петропавловск-Камчатский выполняет сектор «Петропавловск-Цунами» (Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН), совместно с ФГБУ «Камчатское УГМС».

Дежурный персонал сектора «Петропавловск-Цунами» осуществляет регистрацию и обработку землетрясений Камчатки, Дальнего Востока и мира в трех режимах работы, а именно:

– отложенный режим работы (составление бюллетеня опорной станции «Петропавловск» [4]);

– оперативный режим работы, как Служба срочных донесений (ССД);

– оперативный режим работы, как Служба предупреждения о возможности цунами (СПЦ).

Сеть сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке для задач СПЦ по состоянию на 2020 г. состоит из 5 опорных сейсмических станций (ОЦС), 6 вспомогательных сейсмических станций (ВЦС), 16 пунктов регистрации сильных движений (ПР СД), данные которых в режиме реального времени пересылаются в три региональных информационно-обрабатывающих центра (РИОЦ) ФИЦ ЕГС РАН «Петропавловск», «Южно-Сахалинск», «Владивосток» [3]. Кроме того, для работы привлекаются станции Камчатской региональной сейсмической сети, Сахалинской региональной сейсмической сети и сети GSN (IRIS, USGS). Общее количество станций, которые могут быть привлечены к обработке по регламентам СПЦ и ССД, насчитывает порядка 70 цифровых приборов в Дальневосточном регионе.

Организация работы в рамках Службы предупреждения о возможности цунами

В ходе работ по развитию технического оснащения СПЦ был создан эффективный комплексный инструмент: «Обзорная панель оператора». Обзорная панель позволяет операторам дежурной смены отслеживать развитие сейсмического процесса, получать информацию о работе РИОЦ «Южно-Сахалинск», «Владивосток» и других сейсмических агентств, например Службы срочных донесений ФИЦ ЕГС РАН (г. Обнинск), оперативных каталогов NEIC USGS и EMSC.

Обзорная панель состоит из дисплеев реального времени (ДРВ); программы автоматической обработки (алгоритм Д. В. Дрознина); программы, отображающей текущую инструментальную интенсивность в пунктах установки приборов сильных движений [2]; оперативного каталога, объединяющего поступающие решения из NEIC и EMSC; интерактивной рабочей таблицы оператора, в которую сводятся решения каждого из Дальневосточных РИОЦ и других агентств, принимающих участие в обработке текущего события.

Оперативность мониторинга сейсмической активности обеспечивается как визуальным контролем ДРВ операторами дежурной смены, так и средствами автоматической сигнализации, срабатывающей в случае превышения заданного порога амплитуд на одной из станций. При регистрации сильного землетрясения в ближней зоне любой из сейсмических станций, входящих в СПЦ, дежурная смена обязана не позднее двух минут от момента регистрации землетрясения передать в Центр цунами сообщение о происходящем сильном землетрясении. По оптимальному набору сейсмических станций в программе DIMAS [1] производится определение параметров сильного землетрясения (координаты эпицентра, время в очаге, глубина гипоцентра), а также его магнитуда по поверхностным волнам (по опорной станции «Петропавловск», PET (M_S^{PET}) или сетевая M_S(20R) [5]). Передача сообщения в Центр цунами (ФГБУ «Камчатское УГМС») осуществляется в течение семи (или 10, 20, 30, 40) минут для эпицентральных расстояний (до станции PET) до 200 (или 1000, 2000, 3000 и 4000) км, соответственно.

По действующим регламентам сектор «Петропавловск-Цунами» передает по схемам оповещения сообщения о вероятном возникновении цунами (т.е. объявление тревоги цунами), согласно магнитудно-географическому критерию, при подводных землетрясениях с магнитудой $M_S^{PET} \geq 6.5$ (или $M_S(20R) \geq 7.0$) в радиусе до 1000 км от станции PET.

Организация работы в рамках Службы срочных донесений

В рамках работы ССД дежурная смена ведет мониторинг сейсмической обстановки:

– в Камчатском крае: оперативная обработка землетрясений с магнитудой $M_S \geq 4.5$ в радиусе до 1000 км от станции РЕТ, а также землетрясения с магнитудой $M_S \geq 4.0$ на удалении до 200 км от станции РЕТ.

– в Дальневосточном регионе: землетрясения с магнитудой $M_S \geq 5.0$ в радиусе до 2200 км от станции РЕТ;

– в Тихоокеанском регионе: сообщения с параметрами землетрясений с магнитудой $M_S \geq 6.0$ передаются в Центр Цунами; а также

– режим «мониторинг», который включает в себя поступающие решения для землетрясений, не попадающим по магнитудному критерию под регламент ССД (соответственно, без строгого ограничения по времени).

С ноября 2015 г. в оперативном режиме осуществляется рассылка (не позднее, чем через 20 мин от времени начала регистрации землетрясения) бланков определенной инструментальной интенсивности [2], для пунктов с установленными приборами сильных движений, по городу при $I \geq 1$ и по Камчатскому краю при $I \geq 3$.

Результаты работы в 2019 г.

За период с 01.01.2019 по 31.12.2019 года РИОЦ «Петропавловск» в оперативном режиме обработал 1379 событий. В режиме ССД 571 событие.

В зоне ответственности (1000 км) обработано 755 событий, в режиме ССД передано 388 информационных сообщений. По региону «Дальний Восток» (1000-2200км) обработано 315 событий. Из них 49 событий в режиме ССД.

Таблица 1. Количество событий, обработанных по станции РЕТ, за период с 01.01.2019 по 31.12.2019

	Бюллетень станции «Петропавловск»	ССД РИОЦ «Петропавловск»
$\Delta_{PET} < 1000$ км:	1794	388
1000 км $< \Delta_{PET} <$ 2200 км:	138	49
$\Delta_{PET} >$ 2200 км	1443	104
Всего землетрясений	3375	1379

В 2019 г. в Дальневосточном регионе (до 2200 км) произошло 6 землетрясений (Таблица 2) с магнитудой по поверхностной волне, по опорной станции, более 6.0 ($M_S^{PET} > 6.0$). В том числе, в зоне ответственности СПЦ (до 1000 км от РЕТ) произошли два события с морскими координатами. Все землетрясения обработаны согласно действующим нормативам. Тревога цунами в 2019 г. не объявлялась.

Таблица 2. Землетрясения с $M_S > 6.0$ за период с 01.01 2019 по 31.12.2019

№	Дата и время	φ,°	λ,°	*H*, км	M_S^{PET}	Δ_{PET},°	Действия в рамках СПЦ
1	2019/04/02 21:35:31.7	52.39	178.19	43	6.5	11.8	Тревога не объявлялась
2	2019/04/11 08:18:02.5	39.35	143.05	10	6.2	17.4	Тревога не объявлялась
3	2019/05/23 08:45:15.6	51.13	-178.11	62	6.0	14.4	Тревога не объявлялась
4	2019/06/25 09:05:29.8	56.19	164.48	52	6.2	4.6	Тревога не объявлялась
5	2019/06/26 02:18:08.6	56.36	163.84	71	6.4	4.4	Тревога не объявлялась
6	2019/11/24 00:53:57.9	51.33	-178.42	39	6.1	14.0	Тревога не объявлялась

Результаты работы в 2020 г.

За период с 01.01.2020 по 31.12.2020 года всего РИОЦ «Петропавловск» в оперативном режиме обработал 1412 событий. В режиме ССД 664 события.

В зоне ответственности (1000 км) обработано 750 событий, в режиме ССД передано 404 информационных сообщения. По региону «Дальний Восток» (1000-2200км) обработано 332 события. Из них 65 в режиме ССД.

В 2020 г. в Дальневосточном регионе произошло 6 землетрясений (Таблица 4) с магнитудой по поверхностной волне более 6.0 ($M_S^{PET} > 6.0$). Все землетрясения обработаны согласно действующим нормативам. В зоне ответственности СПЦ (до 1000 км от РЕТ) произошли два

землетрясения, относящиеся по магнитудно-географическому критерию к цунамигенным. На одно из событий в марте 2020г. в соответствии с регламентами Службы предупреждения о цунами была объявлена «Тревога цунами». Эпицентр события находился в открытом море, а магнитуда превысила пороговое значение.

Таблица 3. Количество событий, обработанных по станции РЕТ, за период с 01.01.2020 по 31.12.2020

	Бюллетень станции «Петропавловск»	ССД РИОЦ «Петропавловск»
Δ_{PET} < 1000 км:	1574	404
1000 км < Δ_{PET} < 2200 км:	165	65
Δ_{PET} > 2200 км:	1573	110
Всего землетрясений:	3312	1412

Таблица 4. Землетрясения с M_S > 6.0 за период с 01.01 2020 по 31.12.2020

№	Дата и время	φ,°	λ,°	*H*, км	M_S^{PET}	Δ_{PET},°	Действия в рамках СПЦ
1	2020-01-09 08:38:09.1	62.27	171.19	40	6.9	18.3°	Тревога не объявлялась
2	2020-01-23 05:53:04.0	52.13	-177.31	59	6.2	14.5	Тревога не объявлялась
3	2020-02-13 10:33:42.1	45.85	149.21	25	6.0	9.4	Тревога не объявлялась
4	2020-05-23 02:49:17.8	48.92	157.89	79	7.1	4.1	Объявление тревоги цунами
5	2020-09-01 00:51:17.9	58.66	159.31	42	6.0	5.6	Тревога не объявлялась
6	2020-12-20 17:23:16.9	40.56	143.16	25	6.3	16.2	Тревога не объявлялась

Сектор «Петропавловск-Цунами» выполняет задачи в рамках ССД и СПЦ круглосуточно и непрерывно в оперативном режиме, что подразумевает жесткие временные рамки.

В Таблице 5 сведены параметры распределений Δ*T* для зоны ответственности СПЦ (до 200 км и 1000 км от РЕТ). Для составления таблицы было проанализировано 251 сейсмическое событие, из них в зоне 200 км – 52 события и в зоне 1000 км – 199 событий. Медианное значение Δ*T* для зоны 200 км составляет 3.73 мин и для зоны 1000 км 6.27 мин.

Таблица 5. Параметры распределения времени реакции РИОЦ «Петропавловск» в зависимости от местоположения эпицентра за период с 01.01 2019 по 31.12.2020

	$T^{200км}$, мин	$T^{1000км}$, мин
$x_{0.5}$	3.72	6.26
$x_{0.75}$	4.13	8.90
$x_{0.90}$	6.21	14.33
$x_{0.95}$	7.84	18.95

Скорость реакции СП СПЦ для землетрясений в ближней зоне (200 км) в большинстве не превышает 7 минут (с момента начала регистрации события специализированными станциями) и 20 минут в дальней зоне.

Список литературы

1. *Дрознин Д.В.*, *Дрознина С.Я.* Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.

2. *Дрознин Д.В.*, *Чебров Д.В.*, *Дрознина С.Я.*, *Ототюк Д.А.* Автоматизированная оценка интенсивности сейсмических сотрясений по инструментальным данным в режиме квазиреального времени и ее использование в рамках Службы срочных сейсмических донесений на Камчатке // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53. № 3. С. 5–19.

3. *Чебров В.Н., Гусев А.А., Гусяков В.К., Мишаткин В.Н., Поплавский А.А.* Концепция развития системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 4. С. 41–57.

4. *Чебров В.Н.*, *Дрознин Д.В.*, *Захарченко Н.З.* и др. Опорная сейсмическая станция «Петропавловск» для службы предупреждения о цунами // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 1. С. 5–15.

5. *Чубарова О.С.*, *Гусев А.А.*, *Ототюк Д.А.*, *Скоркина А.А.* Региональные шкалы магнитуд по поверхностным волнам и их возможности для предупреждения о цунами // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 1–7 октября 2017 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. - Петропавловск-Камчатский. 2017 г. С. 240–244.

УДК 550.344.42

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН ЦУНАМИ С ПОЛУПОГРУЖЕННЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ С НЕРОВНЫМ ДНИЩЕМ

Гусев О.И., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б.

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск, gusev_oleg_igor@mail.ru

Введение

В настоящее время некоторые высокотехнологичные конструкции размещаются в акваториях морей и океанов. Это обстоятельство обуславливает значительный риск критического волнового воздействия на эти конструкции во время их создания и эксплуатации, вызванного, в частности волнами цунами. В перечень такого рода конструкций входят хранилища сжиженного природного газа, плавучие атомные, волновые и приливные электростанции, причальные и волнозащитные сооружения, нефте-газодобывающие платформы в виде плавучих (заякоренных) полупогруженных тел в прибрежных зонах. Конструирование, размещение и эксплуатация таких объектов в цунамиопасных зонах требует оценок силового воздействия цунами на эти объекты. Расчёт воздействия этих длинных волн на конструкцию, в частности, позволяет рассчитать необходимую массу (расположение) якорей, предохраняющих конструкцию от недопустимых перемещений, способных привести к катастрофическим последствиям от выброса на берег и столкновения с другими объектами.

Задачи о взаимодействии поверхностных волн с полупогруженными телами исследуются более полувека с использованием аналитических методов, экспериментального (проведение лабораторных экспериментов) и численного моделирования. Так, в работе [10] в рамках линейной модели потенциальных течений получены аналитические решения для волн бесконечно малой амплитуды и показано, что с увеличением длины полупогруженного тела при фиксированной его осадке высота отраженной от тела волны растет. Аналитические решения [5] для задачи о взаимодействии группы волн с полупогруженным телом демонстрируют, в частности, рост волновой силы, действующей на тело с его заглублением. Лабораторные исследования выполняются в гидродинамических лотках (2D-постановка) с горизонтальным дном [9] и дном в виде плоского склона [1,2], а также в бассейнах (3D-постановка) с ровным дном (например, [4]). Сложности такого подхода заключаются в трудоёмкости и дороговизне работ, а также в естественных ограничениях на длину и форму генерируемых волн. Зачастую данные лабораторных исследований служат для валидации математических моделей [1,2,4,9]. Наиболее развитым инструментом исследования задач о взаимодействии волн с полупогруженными телами на сегодняшний день является численное моделирование. В качестве математических моделей используются полные модели гидродинамики, такие как уравнения Навье-Стокса [11] и Эйлера, модель потенциальных течений [4], и их 2D-варианты [1,3,12], а также модели мелкой воды первого [6] и второго [9] длинноволнового приближения.

Отметим, что при проектировании объектов, предназначенных для эксплуатации в цунамиопасных зонах, требуются вероятностные оценки цунамиопасности (технологии Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (PTHA)), для получения которых необходимо выполнять сценарные расчёты с сотнями и тысячами вариантов сейсмического источника. Однако, даже с возросшими в настоящее время доступными вычислительными мощностями такие расчёты выполняются, как правило, в рамках бездисперсионных моделей мелкой воды, что подтверждает целесообразность дальнейшего развития экономичных численных алгоритмов для моделей этого класса.

Настоящая работа посвящена исследованию, выполненному в рамках подхода, изложенного в статье [8], который предполагает решение нелинейно-дисперсионных уравнений мелкой воды второго приближения при помощи выделения подзадачи для проинтегрированного по глубине давления. При этом для решения задач о взаимодействии волны с полупогруженным телом используются идеи из работы [7]. Особенность настоящей работы заключается в рассмотрении случая с неровным днищем конструкции, что является важным шагом к рассмотрению задач для конструкций близких по конфигурации к реальным.

Математическая постановка

Рассматривается упрощённая математическая постановка задачи в декартовой системе координат Oxy (параметры течения и геометрия области не зависят от одной из горизонтальных координат), ось Ox которой совпадает с невозмущённой поверхностью идеальной несжимаемой жидкости (плотность $\rho \equiv 1$), а ось Oy направлена вертикально вверх (Рис. 1). Дно акватории полагается горизонтальным и задаётся уравнением $y = -h_0 = \text{const}$, а днище конструкции – уравнением $y = d(x)$, $-h_0 < d < 0$. Конструкция считается неподвижной (не зависит от времени t), с вертикальными боковыми гранями, расположенными на расстоянии x_l и x_r от левой границы области $D = [0, l]$, $0 < x_l < x_r < l$, при этом $D = D_e \cup D_i$, $D_e = [0, x_l] \cup [x_r, l]$, $D_i = (x_l, x_r)$.

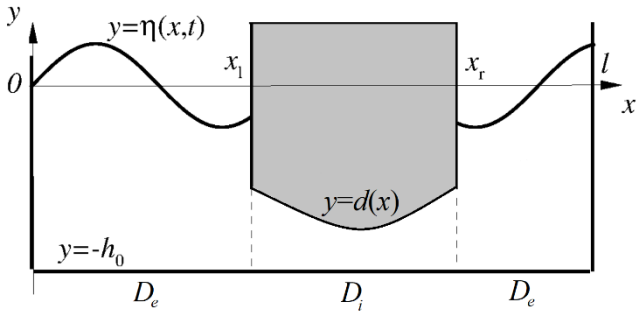


Рис. 1. Схема расчетной области в задаче о взаимодействии волн с полупогруженными объектами

В подобласти D_e свободная поверхность жидкости задаётся уравнением $y = \eta(x,t)$, $H = h_0 + \eta(x,t)$ – полная глубина, а осреднённая по глубине горизонтальная скорость обозначается $u(x,t)$. Уравнения SGN-модели [8] записываются в следующем виде:

$$H_t + (Hu)_x = 0, \tag{1}$$

$$(Hu)_t + \left(Hu^2\right)_x + p_x = 0, \tag{2}$$

где проинтегрированное по глубине давление $p = gH^2/2 - \varphi$, φ – его дисперсионная часть,

$$\varphi = \frac{H^3}{3} R_1, \quad R_1 = u_{xt} + uu_{xx} - u_x^2.$$

Для вычисления φ используется уравнение [8], которое в одномерном случае с горизонтальным дном принимает вид

$$(k\varphi_x)_x - k_0\varphi = F, \tag{3}$$

где $k = 1/H$, $k_0 = 3/H^3$, $F = g\eta_{xx} + 2u_x^2$. На границе области D используются граничные условия свободного прохода волн, а на границе области D_i – условие [7]

$$\eta_x = 0$$

и условия сопряжения, указанные ниже.

В области D_i (под конструкцией) справедливы следующие уравнения [7]:

$$\underline{Q}_x = 0, \tag{4}$$

$$\underline{u}_t + \underline{uu}_x + \frac{P_x}{S} = \frac{\hat{p}}{S} d_x, \tag{5}$$

где $S(x) = h_0 + d(x)$ – толщина слоя жидкости под телом, $\underline{u}(x,t)$ – скорость, $Q(t) = S(x)\underline{u}(x,t)$ – массовый расход, $P(x,t)$ – проинтегрированное по толщине слоя давление, $\hat{p}(x,t)$ – давление на днище конструкции. Последнее можно выразить через P [7]:

$$\hat{p} = \frac{P}{S} - g\frac{S}{2} + \frac{S^2}{3}\underline{R}_1,$$

$\underline{R}_1 = \underline{u}_{xt} + \underline{uu}_{xx} - \underline{u}_x^2$. Подставляя это выражение в (5) и учитывая (4), после преобразований получим

$$\frac{1+S_x^2/3}{S}\dot{Q}+\left(\frac{1+S_x^2/3}{2S^2}\right)_x Q^2+\left(\frac{P}{S}\right)_x=-\frac{g}{2}S_x. \tag{6}$$

В численном алгоритме расчёт в области D_i не выполняется, а используется проинтегрированное по области D_i уравнение (6), которое, с учётом (4) примет вид

$$I_1\dot{Q}+I_2Q^2+\left(\frac{P}{S}\right)\Big|_{x_r}-\left(\frac{P}{S}\right)\Big|_{x_l}=I_3, \tag{7}$$

где I_1, I_2 и I_3 не зависят от времени и искомых функций P и Q:

$$I_1=\int_{D_i}\frac{1+S_x^2/3}{S}dx,\quad I_2=\frac{1+S_x^2/3}{2S^2}\Big|_{x_r}-\frac{1+S_x^2/3}{2S^2}\Big|_{x_l},\quad I_3=-\frac{g}{2}\big(S(x_r)-S(x_l)\big).$$

Первое условие сопряжения [7]

$$Hu\big|_{x_{l-0}}=\dot{Q}=Hu\big|_{x_{r+0}}, \tag{8}$$

выражает в математической форме тот факт, что масса жидкости, втекающей слева под тело (вытекающей слева из-под тела) равна массе жидкости, вытекающей справа из-под тела (втекающей справа под тело), и обе эти величины равны массовому расходу $Q(t)$ жидкости под телом. Во втором условии задаются также связи давления [7] вне тела и под ним на общей границе (x_l или x_r), что в одномерном случае с горизонтальным дном можно записать как

$$\frac{P}{S}\Big|_{\substack{x_{l+0}\\x_{r-0}}}=\left[g\left(H-\frac{S}{2}\right)-\frac{\varphi}{2H^3}\left(3H^2-S^2\right)\right]\Bigg|_{\substack{x_{l-0}\\x_{r+0}}}, \tag{9}$$

В численном алгоритме используется метод предиктор-корректор [8], в котором за счёт условий (7) – (9) удаётся исключить область D_i из расчёта величины φ и для уравнения (3) использовать метод прогонки. Подробное описание метода в настоящей работе не приводится в силу ограничения на объем текста.

Результаты

Рассматривается модельная задача о взаимодействии уединённой волны с полупогруженным фиксированным телом с двумя вариантами днища: «скос» (Рис. 2,*а*) и треугольный вырез/выступ (Рис. 3,*а*). Расчеты проведены для разных углов наклона. Вершина уединённой волны [8] с амплитудой $a_0/h_0=0.1$ расположена в точке $x_0/h_0=10$, на достаточном удалении от границ области ($x/h_0=0$) и конструкции ($x_l/h_0=20$). Длина тела $L/h_0=5$, выбрана таким образом, чтобы правая граница конструкции имела абсциссу $x_r/h_0=25$, а длина всей области равнялась $l/h_0=45$. Для расчётов использовалась равномерная сетка с $N=900$ интервалов и шагом $\Delta x/h_0=0.05$. Сравнением с результатами расчётов на более подробной сетке было показано, что выбранного разрешения достаточно для сходимости результатов с приемлемой точностью. Заметим, что расчёты с таким количеством узлов вычислительной сетки занимали всего несколько секунд на персональном компьютере.

На Рис. 2,*а* представлена конфигурация задачи с полупогруженным телом со скошенным днищем, угол скоса α относительно оси Ox изменялся в диапазоне от −5 до 5 градусов. На этом же рисунке приведены рассчитанные по SGN-модели записи двух виртуальных мареографов, расположенных в точках x_0 и в точке $x/h_0=35$, симметричной относительно центра тела. Записи первого мареографа (Рис. 2,*б*) позволяют оценить амплитуду отражённой от конструкции волны, а записи второго (Рис. 2,*в*) – прошедшей. Графики показывают, что при уменьшении угла α объём тела становится больше, и оно оказывается более значимым препятствием для набегающей волны, поэтому амплитуда отражённой волны увеличивается, а прошедшей – падает. Аналогичные выводы можно сделать, анализируя результаты расчётов со вторым вариантом днища, треугольным вырезом/выступом, представленные на Рис. 3. При этом выступ становится дополнительным препятствием, значительно увеличивая амплитуду отражённой волны (Рис. 3,*б*) и уменьшая амплитуду волны прошедшей (Рис. 3,*в*). Напротив, вырез в днище уменьшает амплитуду отражённой волны и увеличивает амплитуду прошедшей. Результаты расчетов показывают также, что угол и, соответственно, объём выреза, влияют в меньшей степени, чем объём выступа. Заметим, что расчеты, проведенные авторами работы [3] демонстрируют одновременное уменьшение прямоугольным

вырезом в днище амплитуд отражённой и прошедшей волн. Это противоречие с выводами настоящей работы требует дополнительного исследования.

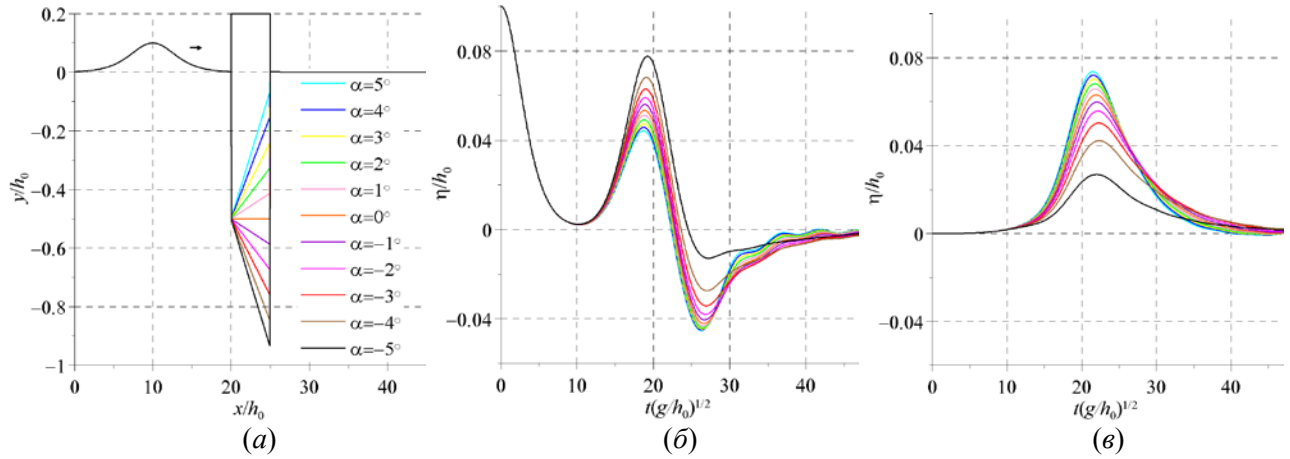


Рис. 2. Вид начальной волны и формы полупогруженного тела со скошенным днищем с углами наклона от -5 до 5 градусов (*а*) и записи виртуальных мареографов, расположенных в точках $x = 10h_0$ (*б*) и $x = 35h_0$ (*в*), в расчётах с использованием SGN-модели

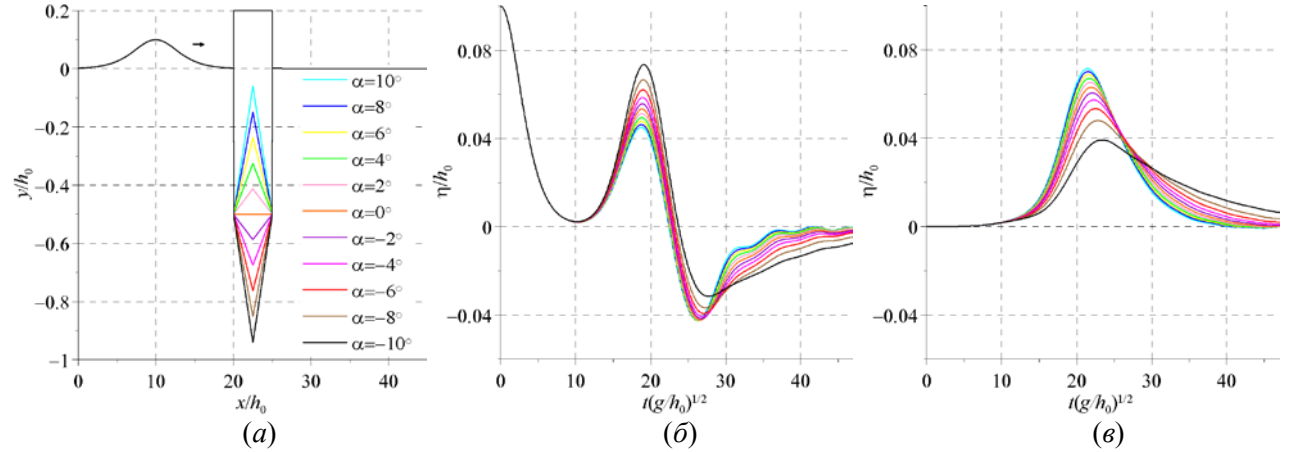


Рис. 3. Вид начальной волны и формы полупогруженного тела с треугольным вырезом (выступом) с углами наклона от -10 до 10 градусов (*а*) и записи виртуальных мареографов, расположенных в точках $x = 10h_0$ (*б*) и $x = 35h_0$ (*в*), в расчётах с использованием SGN-модели

Заключение

В докладе изложен численный метод исследования взаимодействия длинных волн с неподвижным полупогруженным телом, основанный на нелинейно-дисперсионной модели мелкой воды второго приближения и обеспечивающий учет при численном моделировании эффектов, вызванных частотной дисперсией, становящихся одни из ключевых эффектов, определяющих динамику длинных поверхностных волн, в том числе, волн цунами в прибрежной зоне. Продемонстрированы примеры использования этого метода для решения некоторых модельных задач, и, в частности, показано, что выступ в днище конструкции увеличивает амплитуду отражённой от неё волны и уменьшает амплитуду волны, прошедшей под конструкцией, а вырез в днище влияет на картину взаимодействия противоположным образом.

Развитие настоящего исследования видится в

- дальнейшей верификации метода при помощи сравнений с результатами расчётов, проведенных в рамках полной модели потенциальных течений;
- переходе к полной (плановой) постановке;
- адаптации алгоритма для расчёта силового воздействия на конструкцию с учетом более сложной геометрии ее днища и переменного по пространству рельефа дна.

Предложенный метод может быть применен для поддержки принятия решений при конструировании и эксплуатации высокотехнологичных прибрежных объектов, такие как хранилища сжиженного газа, плавучие атомные электростанции и т.п.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-71-00127).

Список литературы

1. *Камынин Е.Ю., Максимов В.В., Нуднер И.С., Семенов К.К., Хакимзянов Г.С.* Исследование взаимодействия уединенной волны с частично погруженным неподвижным сооружением // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. № 4 (10). С. 39–54.

2. *Нуднер И.С., Семенов К.К., Лебедев В.В., Хакимзянов Г.С., Захаров Ю.Н.* Численная модель гидроволновой лаборатории для исследования взаимодействия морских волн с гидротехническими сооружениями // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24. № 1. С. 86–105.

3. *Chang C.-H., Wang K.-H., Hseih P.-C.* Fully nonlinear model for simulating solitary waves propagating through a partially immersed rectangular structure // Journal of Coastal Research. 2017. V. 33. N. 6. P. 1487-1497.

4. *Chen L., Wang K.H.* Experiments and computations of solitary wave interaction with fixed, partially submerged, verticalcylinders // J. Ocean Eng. Mar. Energy. 2019. V. 5. P. 189–204.

5. *Fang Q., Guo A.* Analytical and experimental study of focused wave action on a partially immersed box // Math. Probl. Eng. 2019. article ID 9850302.

6. *Khakimzyanov G.S.* Numerical simulation of the interaction of a solitary wave with a partially immersed body // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2002. V. 17. N. 2. P. 145–158.

7. *Khakimzyanov G.S., Dutykh D.* Long wave interaction with a partially immersed body. Part I: Mathematical models // Communications in Computational Physics. 2020. V. 27, N. 2. P. 321–378.

8. *Khakimzyanov G., Dutykh D., Fedotova Z., Gusev O.* Dispersive Shallow Water Waves. Theory, Modeling, and Numerical Methods. Lecture Notes in Geosystems Mathematics and Computing. Basel, Birkhauser, 2020.

9. *Lu X., Wang K.H.* Modeling a solitary wave interaction with a fixed floating body using an integrated analytical–numerical approach // Ocean Eng. 2015. V. 109. P. 691–704.

10. Mei C.C., Black J.L. Scattering of surface waves by rectangular obstacles in waters of finite depth // J. Fluid Mech. 1969. V. 38. P. 499–511.

11. *Park J.C., Kim M.H., Miyata H.* Three-dimensional numerical wave tank simulations on fully nonlinear wave–current–body interactions // J. Mar. Sci. Technol. 2001. V. 6. P. 70–82.

12. *Sun J.L., Wang C.Z., Wu G.X., Khoo B.C.* Fully nonlinear simulations of interactions between solitary waves and structures based on the finite element method // Ocean Eng. 2015. V. 108. P. 202–215.

УДК 551.466

АНАЛИЗ И УТОЧНЕНИЕ ОПЕРАТИВНОГО КАТАЛОГА ЦЕНТРА ЦУНАМИ ЗА ПЕРИОД 2000-2020 ГОДЫ

Ивельская Т.Н.

ФГБУ «Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», г. Южно-Сахалинск, ivelskaya@mail.ru

Введение

Гидрофизическая подсистема цунами (наряду с сейсмической подсистемой и подсистемой связи) существует с момента организации в Сахалинской области (1958 г.) службы предупреждения о цунами и относится к компетенции Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Подсистема включает в себя сеть морских гидрометеорологических станций и постов на Сахалине и Курильских островах, средства связи и регистрации цунами, круглосуточную службу сбора, обработки информации и принятия соответствующих решений в г. Южно-Сахалинске (Центр цунами) [6, 4].

В повседневном режиме работы подсистема решает текущие задачи по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, входящие в нее подразделения руководствуются действующим законодательством, ведомственными нормативными документами, приказами и распоряжениями руководства Росгидромета и начальника Сахалинского УГМС. В режиме повышенной готовности (при регистрации сильного землетрясения или обнаружении необычных колебаний уровня моря) подсистема переключается на цунами, а входящие в нее подразделения руководствуются соответствующими Порядками работ при ЧС [6].

В настоящей работе выполнены анализ тревог цунами, выпущенных Сахалинским филиалом ФГБУН Геофизической Службы и Центром цунами ФГБУ «Сахалинское Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» и уточнение оперативного каталога Сахалинского Центра цунами за период 2000 – 2020 гг. Определены заблаговременность предупреждения, продолжительность тревожного режима, эффективность действий Сахалинской Службой предупреждения о цунами (СПЦ) [2-4]. В связи с требованиями по оформлению материалов вставить соответствующие таблицы в полном объеме не представляется возможным.

Анализ каталога

Каталог проявлений цунами на побережье Сахалинской области ведется Центром цунами ФГБУ «Сахалинское УГМС» с начала 1990 – х годов. Поскольку заполнялся каталог, как правило, в оперативном режиме, была вероятность, что данные, например, о слабых цунами, поступавшие от наблюдателей или из мареограмм, спустя значительное время после события, могли не войти в каталог. Информационной основой для данного исследования послужил архив мареограмм с записями цунами 1952 г., хранящийся в фондах УГМС и оцифрованных записи цунами из архива лаборатории цунами ИМГиГ ДВО РАН. Кроме того, было были уточнены и дополнены параметры цунамигенных землетрясений (магнитуда, координаты, глубина), согласно каталога ИМГиГ ДВО РАН. Было внесено более сотни уточнений и дополнений.

В таблице 1 приведены оценочные сведения о работе Сахалинской Службы предупреждения о цунами после ввода в эксплуатацию объектов ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий ЧС природного и техногенного характера в РФ 2006 – 2010 гг».

Таблица 1. Показатели работы отдельно гидрофизической и сейсмической подсистем, а также в целом Сахалинской СПЦ за период 2010 – 2020 гг.

Подсистемы Сахалинской СПЦ	Оправдываемость предупреждения о цунами		
	Выпущено предупреждений	Оправдалось	%
Гидрофизическая подсистема	1	1	100
Сейсмическая подсистема	5	2	40
В целом по службе	6	3	50

Для сравнения в таблицах 2 и 3 приведены показатели работы Сахалинской СПЦ за период с 2006 года, т.е., до и после реализации ФЦП.

Таблица 2. Показатели работы отдельно гидрофизической и сейсмической подсистем, а также в целом Сахалинской СПЦ за период 2006 – 2011 гг.

Подсистемы Сахалинской СПЦ	Оправдываемость предупреждения о цунами		
	Выпущено предупреждений	Оправдалось	%
Гидрофизическая подсистема	1 (2010)	1	100
Сейсмическая подсистема	3 (2006. 2007, 2011)	3	100
В целом по службе	4	4	100

Таблица 3. Показатели работы отдельно гидрофизической и сейсмической подсистем, а также в целом Сахалинской СПЦ за период 2006 – 2020 гг.

Подсистемы Сахалинской СПЦ	Оправдываемость предупреждения о цунами		
	Выпущено предупреждений	Оправдалось	%
Гидрофизическая подсистема	1 (2010)	1	100
Сейсмическая подсистема	7 (2006. 2007, 2011, 2013, 2017, 2018, 2020)	4	60
В целом по службе	8	5	63

Краткое описание некоторых событий

1) 28 февраля 2010 года, Чили (дальняя зона). Тревога выпускалась Центром цунами ФГБУ «Сахалинское УГМС». Наблюдалось цунами на Курильских островах. Оправдалось.

2) 11 марта 2011 года, Япония (ближняя зона). Тревога выпускалась ИОЦ «Южно-Сахалинск». Цунами наблюдалось на Курильских островах. Оправдалось.

3) 24 мая 2013 г., Охотское море (ближняя зона). Тревога выпускалась ИОЦ «Южно-Сахалинск» на охотоморском побережье Сахалина и Курильских островах. Цунами не наблюдалось. Не оправдалось. Землетрясение 24 мая 2013 года в Охотском море показало, что необходимо внести поправки в регламент, чтобы отсечь те глубины, при которых не бывает цунами для исключения заведомо ложных тревог цунами. В работах Поплавского А.А. [5], Иващенко А.И. [1] показано, что практически не бывает цунами при глубине очагов землетрясений большей 80-100 км. Согласно каталогу, наибольшее число цунамигенных землетрясений приходится на глубину 40 и 60 км.

4) Сильное землетрясение 2 апреля 2014 г, Чили (дальняя зона). Центром цунами предупреждение не выпускалось, только - оповещение для порт-пунктов Курильских островов о возможном подходе слабого цунами, с рекомендациями по ограничению работ в портах, соблюдению правил безопасности на берегу и необходимости для населения держаться на безопасном расстоянии от береговой черты. Наблюдалось слабое цунами на Курильских островах.

5) Сильное землетрясение 17 сентября 2015 г., Чили (дальняя зона). Центром цунами ФГБУ «Сахалинское УГМС» предупреждение не выпускалось, только - оповещение для порт-пунктов Курильских островов о возможном подходе слабого цунами с рекомендациями по ограничению работ в портах, соблюдению правил безопасности на берегу и необходимости для населения держаться на безопасном расстоянии от береговой черты. Наблюдалось слабое цунами на Курильских островах.

6) 18 июля 2017 года, Командорские острова (ближняя зона). Тревога выпускалась ИОЦ «Южно-Сахалинск» только для Северо-Курильского района. Цунами не наблюдалось. Не оправдалось.

7) 21 декабря 2018 года, Командорские острова (ближняя зона). Тревога выпускалась ИОЦ «Южно-Сахалинск» только для Северо-Курильского района. Цунами не наблюдалось. Не оправдалось. 25 марта 2020 года, район северных Курил. Тревога выпускалась ИОЦ «Южно-Сахалинск» только для Северо-Курильского района. В Северо-Курильске визуально наблюдалось прохождение вон цунами на фоне сгонно-нагонного явления и прилива. Высота волн цунами

оценивалась в пределах 30 - 50 см. Важно учитывать влияние прилива на формирование максимальных высот волн, так как воздействие цунами обусловлено суммарным подъемом уровня. Надо отметить, что для Северо-Курильска, на полной воде, достаточно цунами высотой 1 метр, чтобы вызвать серьезные подтопления объектов. Центром цунами ФГБУ «Сахалинское УГМС» был выпущен отбой угрозы цунами после начала фазы отлива.

Заключение

Количество объявленных тревог цунами и выпущенных оповещений об угрозе цунами в тихоокеанском бассейне за период 2000 – 2020 года составило 114. В 112 случаях землетрясения были цунамигенными. Сахалинской службой предупреждения о цунами за этот же период выпускались 12 раз. Показана 100%-оправдываемость предупреждений о цунами, выпущенных гидрофизической подсистемой Сахалинской СПЦ (Центром цунами ФГБУ «Сахалинское УГМС»).

Уточненный каталог можно использовать при разработке регламента работы Сахалинской СПЦ.

Список литературы

1. *Иващенко А.И., Го Ч.Н.* Цунамигенность и глубина очага землетрясения // Волны цунами. – Ю. Сахалинск: СахКНИИ, 1973. С. 152–155.

2. *Ивельская Т.Н., Шевченко Г.В.* Об учете особенностей проявления Чилийского цунами (май 1960) в северо-западной части Тихого океана при оценке риска воздействия на прибрежные объекты // Материалы XII Совещания географов ДВО РАН, 2004. С. 174.

3. *Ивельская Т.Н., Поплавский А.А., Спирин А.И., Золотухин Д.Е.* Симуширские цунами 2006 и 2007 г.г.: проявления на Курильских островах и акватории Тихого океана // Проблемы комплексного геофизического мониторинга дальнего Востока России, первая региональная научно-техническая конференция, 11-17 ноября 2007 года, Петропавловск-Камчатский, тезисы докладов. С. 40.

4. *Ивельская Т.Н., Шевченко Г.В., Храмушин В.Н.* Российская Служба предупреждения о цунами – история и современное состояние//История наук о Земле. 2012. Т.5, №1. С. 5 – 20.

5. *Поплавский А.А., Бобков А.О.* О распределении дальневосточных землетрясений по глубине и магнитуде // Строение, геодинамика и металлогения охотского региона и прилегающих частей северо-западной тихоокеанской плиты: материалы международного научного симпозиума (24 – 28 сентября 2002 г.): сб. статей. Южно-Сахалинск, 2002. Т. 2. С. 64 – 88.

6. *Ivelskaya T.* The analysis of activity of a Sakhalin Tsunami Warning Service for the period of its existence (1958-1999) and actions of the Tsunami Centre in case of tsunami threat // IOC-IUGG Joint International Workshop on Tsunami Warning Beyond 2000 Theory, Practice and Plans; Seoul, Republic of Korea, 30 September - 2 October: Abstracts. P. 3.

7. *Ivelskaya T.N., Dushenko P.V., Shevchenko G.V., Kovalev P.D.* The using of information about sea level in tsunami warning service // IUGG XXIII General Assembly Tsunami Simposium on JSS07 “Tsunamis: Their Science, Engineering and Hazard Mitigation: Abstracts/, 9 July - 10 July, 2003-Sapporo, Japan.

УДК 551.465

ПОВТОРЯЕМОСТЬ ЦУНАМИ И ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ ДЛЯ ПОБЕРЕЖЬЯ ЮЖНЫХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ

Кайстренко В.М.

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск,
vict-k@mail.ru

Ведение

Южные Курильские острова - один из наиболее цунамиактивных регионов Тихоокеанского кольца. Все землетрясения с магнитудой $M \geq 8$ и значительная часть землетрясений с магнитудой $M \geq 7.5$ сопровождались разрушительными цунами (рис. 1). Более того, этот район подвержен атакам цунами от удаленных очагов мощнейших землетрясений, таких как Чилийское 1960 г. и Тохоку 2011 г. Использование натурных данных, собранных в каталогах [6, 10], затруднено их неполнотой для большинства побережий. В этой связи полнота и качество натурных данных о проявлениях исторических цунами на Южных Курильских островах может считаться удовлетворительными.

Проявления гигантского Камчатского цунами 1952 г. достаточно полно документировано только для юга Камчатки и для Северных Курильских островов. В каталогах имеются только два значения заплесков этого цунами на Южных Курильских островах. Поэтому 1953 год выбран стартовым для проведения статистического исследования. Большинство используемых данных – заплески цунами на побережье. Для относительно слабых цунами с высотой менее 1 м ряды заплесков удалось продолжить данными о высотах цунами над приливом, зарегистрированных на четырех мареографных станциях и системах цифровой уровенной регистрации Гидрометеослужбы и ИМГиГ ДВО РАН.

Для статистического исследования использовались высоты цунами, превосходящие 0.5 м. Имеется две причины для использования именно такого порогового значения высоты цунами. Во-первых, наличие пробелов в данных, особенно в области малых значений, не позволяет провести правильное ранжирование (1). Во-вторых, наличие объяснимой экспоненциальной аппроксимации функции повторяемости для высот цунами $h \geq 0.5$ *m* позволяет строить теорию функции повторяемости и получать аналитические зависимости для статистик [7].

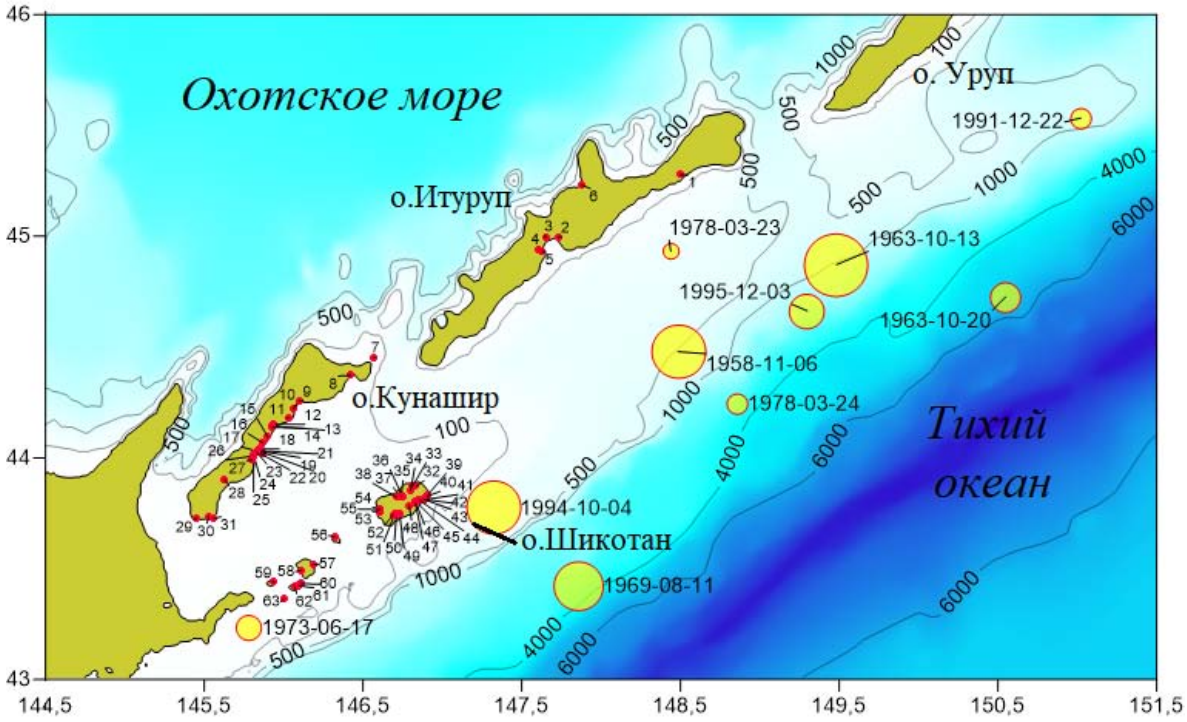


Рис. 1. Эпицентры цунамигенных землетрясений у побережья Южных Курильских островов и нумерованные позиции пунктов с данными о высотах цунами.

Функция повторяемости высот цунами

Данные о высотах цунами на побережье следует рассматривать как случайный ряд и для каждого пункта ранжировать в соответствии с величиной

$$h_1 \geq h_2 \geq h_3 \geq \ldots \quad (1)$$

Распределение данных о заплесках цунами на побережье южных Курильских островов очень неоднородно, и для оценки цунамиопасности были выбраны 63 пункта (рис.1) из соображений репрезентативности по положению и количеству данных.

Функция повторяемости цунами (ФПЦ) – важнейшая характеристика цунамиактивности, и знание этой функции позволяет количественно оценивать цунамиопасность. В соответствии с определением, ФПЦ – это средняя частота событий в заданном месте x с высотой, равной или превышающей пороговое значение h

$$\varphi(h) \overset{def}{=} \left\langle \frac{N(заплеск \geq h)}{T} \right\rangle, \quad (2)$$

где N есть число таких событий, произошедших за период времени T.

Эта функция по построению положительная и невозрастающая. Аналитическая форма функции повторяемости цунами неизвестна, и серьезной проблемой является построение ее адекватной аналитической аппроксимации. Аналогичная нерешенная проблема имеет место в сейсмологии при построении зависимости магнитуда–повторяемость землетрясения – так называемый закон Гутенберга-Рихтера, которому посвящена обширная литература.

Ряд математических свойств функции повторяемости приходится постулировать на основе соображений физического характера [7].

Функция повторяемости цунами и ее основной аргумент h – физические величины, поэтому по теореме Бэкингема, соотношение (2) должно иметь безразмерную форму [2]. В общем случае для этого необходимы два масштабных параметра f и H^* частоты и высоты, соответственно. Тогда:

$$\varphi(x;h) = f(x) \cdot \Phi(x; \frac{h}{H^*(x)}). \quad (3)$$

Переменная x здесь рассматривается как индикатор места (безразмерные широта и долгота).

Распространение цунами из океана к берегу характеризуется малым параметром – отношением глубин в прибрежной зоне (метры) и в шельфе / океане (сотни метров / километры), что влечет за собой асимптотическое упрощение структуры функции повторяемости. Характерная длина волны цунами в открытом океане составляет десятки – первые сотни километров, поэтому волновое поле в океане гладкое и существенно не изменяется на расстояниях порядка десятков километров, что подтвердила регистрация Чилийского цунами 2010 г и Тохоку цунами 2011 г сетью датчиков уровня NOWPHAS у СВ участка побережья Хонсю длиной около 300 км [8].

Таким образом, заплески цунами на побережье оказываются зависимыми через зону океана с большими глубинами, что приводит к слабой изменчивости частоты цунами f для региона размером порядка 300 км. При этом формула (2) упрощается [7]:

$$\varphi(x;h) = f \cdot \Phi(\frac{h}{H^*(x)}), \quad (4)$$

Физический смысл параметра f – асимптотическая частота сильных цунами в регионе, которая медленно изменяется вдоль берега и может считаться региональной постоянной. Параметр H^* – характеристическая высота цунами, пропорциональная среднему коэффициенту трансформации $K(x)$ высоты цунами при ее распространении из океана к берегу. Этот параметр существенно изменяется вдоль берега и в принципе может быть получен в рамках численного моделирования распространения цунами.

Корректный метод построения функции повторяемости

Совокупность данных о высотах цунами, наблюденных в некотором месте, следует рассматривать как случайный ряд, ранжированный в соответствии с величиной

$$h_1 \geq h_2 \geq h_3 \geq \ldots \quad (5)$$

Поток цунами можно рассматривать как приближенно Пуассоновский, заметные отклонения от которого связаны с относительно частыми и слабыми событиями [5], поэтому вероятность того, что за период времени T произойдет n цунами с максимальной высотой, равной или превосходящей пороговую высоту h, дается формулой

$$P_n(\textit{заплеск} \geq h) = e^{-\varphi(h)\cdot T} \cdot \frac{[\varphi(h)\cdot T]^n}{n!}. \quad (6)$$

Несмотря на то, что распределение каждой *k*–ой по величине высоты цунами h_k в ряду (5) зависит от номера *k*, периода наблюдений *T* и от неизвестной функции повторяемости цунами $\varphi(h)$, распределения соответствующих частот $\varphi_k = \varphi(h_k)$ оказываются гамма-распределениями, не зависящими от вида неизвестной функции повторяемости $\varphi(h)$, поскольку вероятности в (6) зависят от функции $\varphi(h)$ параметра *h*, но не от параметра *h* непосредственно. При этом средние величины частот φ_k, логарифмов частот $\ln(\varphi_k)$, их дисперсии и стандартные отклонения вычисляются аналитически:

$$\overline{\ln \varphi(h_k)} = \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s} - 0.577... - \ln T, \quad (7)$$

$$D_k = D(\ln \varphi(h_k)) = \frac{\pi^2}{6} - \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s^2}. \quad (8)$$

Пример функции повторяемости высот цунами для Южно-Курильска приведен на рисунке 2. Анализ данных показывает, что функции повторяемости для больших высот цунами (цунами с малыми высотами не опасны) можно аппроксимировать экспонентой [7]:

$$\varphi(x,h) = f \cdot e^{-\frac{h}{H^*(x)}}. \quad (9)$$

Параметры функции повторяемости *f* и *H** могут быть определены с помощью взвешенного метода наименьших квадратов [1. 3], либо методом максимального правдоподобия с использованием параметров гамма-распределений частот φ_k, с просто вычисляемыми модами, средними и дисперсиями (7-8).

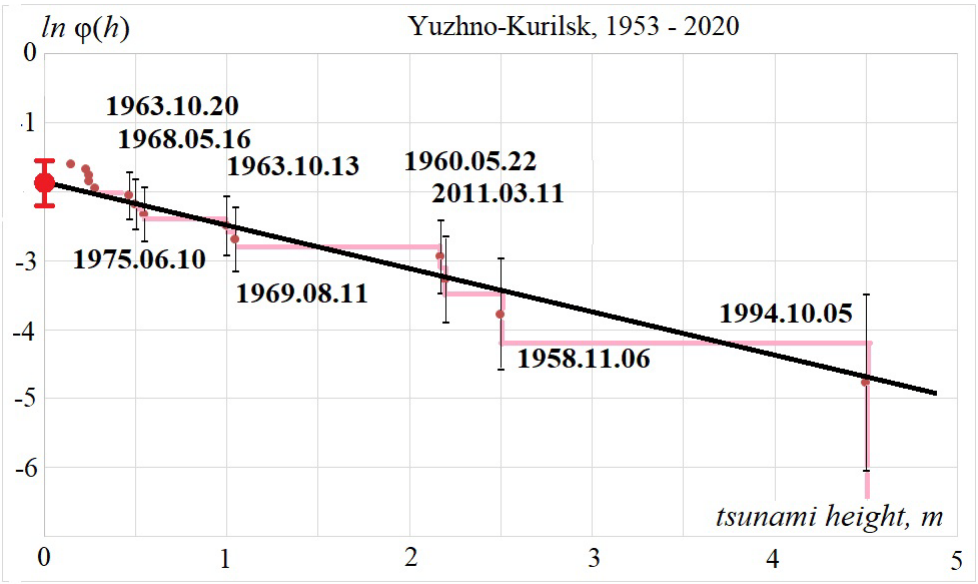


Рис. 2. Эмпирическая функция повторяемости для Южно-Курильска, построенная по высотам исторических цунами с $h \geq 0.5$ м за период времени 1953–2020 гг. и ее аппроксимация. Всем величинам $\overline{\ln \varphi(h_k)}$ (красные кружки) соотнесены диапазоны соответствующих стандартных отклонений. Асимптотическая частота больших цунами для Южно-Курильска $f = 0.15 \pm 0.04$ год$^{-1}$ отмечена красным кружком на оси ординат. Характеристическая высота цунами в Южно-Курильске равна $H^* = 1.6$ м и $1/H^* = 0.6 \pm 0.2$ 1/м.

Синтетический каталог высот цунами в Южно-Курильске

Имея надежный ряд данных для Южно-Курильска, мы построили функцию повторяемости. Точность оценок параметров цунамиактивности $f = 0.15 \pm 0.04$ 1/год и $H^* = 1{,}6 \pm 0{,}5$ м, полученных за период наблюдений 67 лет (1953 – 2020 гг), оказалась ожидаемо невысокой. Можно рассмотреть обратную ситуацию: использовать параметры $f_0 = 0.15 \pm 0.24$ 1/год и $H_0^* = 1.6$ м в качестве входных и построить по ним синтетические ряды высот цунами $h \geq 0.5$ на заданный период времени $T = 250$ and 500 лет (рис. 3), а по ним оценить «выходные параметры» *f* и *H** и их дисперсии. В результате

получены оценки: $f = 0{,}15 \pm 0{,}01$ год$^{-1}$ и $H^* = 1{,}5 \pm 0{,}16$ м для $T = 250$ лет и $f = 0{,}15 \pm 0{,}006$ год$^{-1}$ и $H^* = 1{,}5 \pm 0{,}08$ м для $T = 500$ лет. Таким образом, для получения параметров цунамиактивности с приемлемой точностью 5-10 % нужны полные ряды высот цунами в заданном месте длительностью не менее 250 лет.

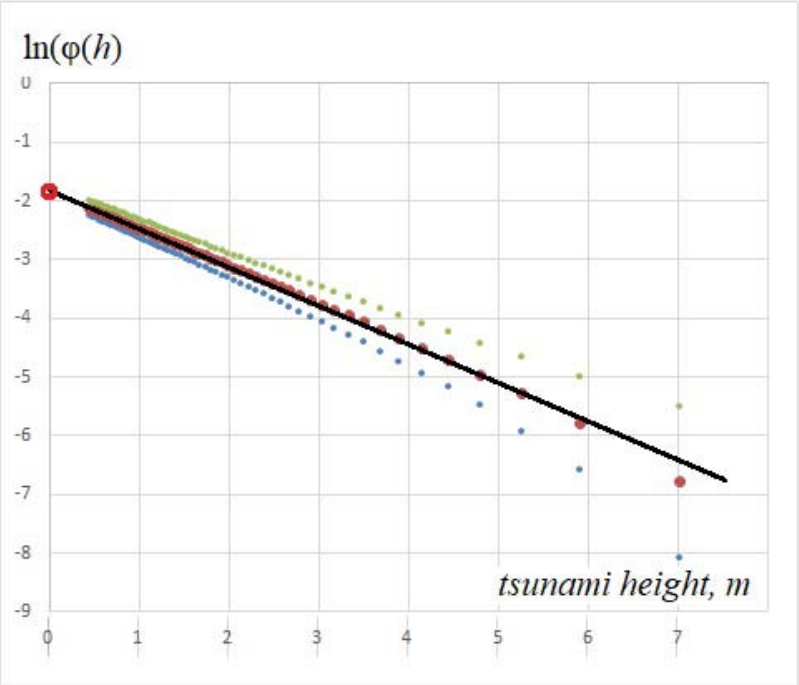


Рис. 3. Синтетическая функция повторяемости для Южно-Курильска на период 500 лет, $h \geq 0.5$ м, 55 событий. Всем величинам $\overline{\ln \varphi(h_k)}$ (красные кружки) соотнесены диапазоны соответствующих стандартных отклонений.

Ряды наблюдений цунами указанной длительности имеются на Северо-Восточном побережье Хонсю и на Тихоокеанском побережье Южной Америки, но в них документированы только сильнейшие события, так что эти ряды не являются полными.

Серьезный прогресс в улучшении качества оценок цунамиактивности возможен с привлечением данных о палеоцунами, но в настоящее время в технологии получения оценок из данных о палеособытиях имеется много нерешенных проблем.

Карта цунамиопасности для региона Южных Курильских островов

Считая медленно изменяющуюся частоту сильных цунами f единой для всего региона Южных Курильских островов, можно создать и проанализировать сводную региональную модель, включающую данные о проявлениях цунами в 63 пунктах региона.

Данная сводная региональная модель для 63 пунктов позволила вычислить частоту сильных цунами $f = 0.16$ год$^{-1}$ для всего региона Южных Курильских островов с заметно меньшей относительной погрешностью $\sigma(\ln(f) = 0{,}11$ по сравнению со значениями этого же параметра $\sigma(\ln(f) = 0.26$, полученными в частной модели для Южно-Курильска с наиболее длинным рядом данных (рис.2). Вычисленные при этом характеристические высоты цунами для 63 пунктов можно рассматривать в качестве «скелета» карты цунамирайонирования региона.

Поскольку на большей части побережья данные о проявлениях цунами отсутствуют, для определения характеристических высот цунами для всего побережья было проведено численное моделирование наиболее значительных исторических цунами 1958, 1960, 1963, 1969, 1975, 1994 и 2011, заплески которых использовались при создании базовой «скелетной» модели. Тогда заплески, полученные в результате численного моделирования, можно использовать для расчета характеристических высот цунами H^* аналогично тому, как характеристические высоты цунами вычислялись на основе только натурных данных. В результате получена карта цунамирайонирования для региона Южных Курильских островов (рис. 4).

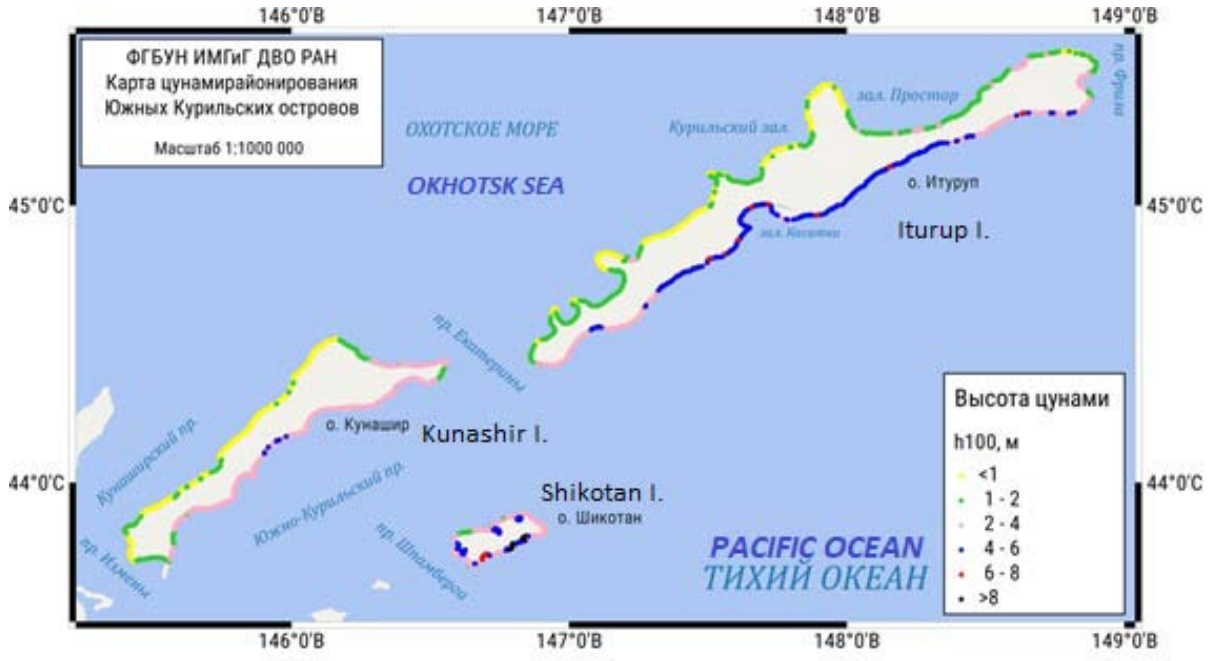


Рис. 4. Карта цунамирайонирования побережья Южных Курильских островов по высоте цунами h_{100} с периодом повторяемости 100 лет в масштабе 1:1,000,000 [4, 9].

Заключение

На базе исторических цунами за период 1953-2020 годов построена региональная функция повторения цунами для 63 пунктов на побережье Южных Курильских островов. Проанализировано экспериментальное подтверждение гладкости функции повторяемости цунами в океане, полученное по уровневым записям сети NOWPHAS. Для порта Южно-Курильск продемонстрирован корректный метод построенния функции повторения цунами и получены оценки возможных ошибок параметров этой функции. Получила развитие теория для вероятностной модели пуассоновского типа для последовательности цунами, согласующаяся с историческими данными цунами в районе Южных Курил. На этой основе построена карта цунамирайонирования для региона Южных Курильских островов. Синтетический каталог высот цунами, построенный для Южно-Курильска, позволил проанализировать зависимость априорных ошибок параметров цунамиактивности от длительности периода наблюдений.

Список литературы

1. *Айвазян С.А, Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. Москва. Финансы и статистика. 1983. С. 471 с.

2. *Седов, Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. Москва. Наука. 1977. 439 с.

3. *Химмельблау, Д.* Анализ процессов статистическими методами. Москва. Мир. 1973. 957 с.

4. *Шевченко Г.В., Лоскутов А.В., Кайстренко В.М.* Новая карта цунамирайонирования Южных 3. Курильских островов // Геосистемы переходных зон. 2018. Том 2, №3. С. 225–238.

5. *Geist, E., and Parsons, T.* Probabilistic Analysis of Tsunami Hazards // Natural Hazards. 2006. Vol. 37. С. 277–314.

6. *Historical Tsunami Database for the Pacific (HTDB/PAC)*. Retrieved August 15, 2021, from http://tsun.sscc.ru/htdbpac/.

7. *Kaistrenko, V.* Tsunami Recurrence Function: Structure, Methods of Creation, and Application for Tsunami Hazard Estimates // Pure Appl. Geophys. 2014. Vol. 171. P. 3527–3538.

8. *Kawai, H., Satoh, M., Kawaguchi, K., and Seki, K.* Characteristics of the 2011 Tohoku tsunami waveform acquired around Japan by NOWPHAS equipment // Coastal Engineering Journal. 2013. Vol. 55, N 3. 1350008 (27 pages).

9. *Shevchenko, G., Loskutov, A., and Kaystrenko V.* New map of tsunami-hazard for the south Kuril Islands // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 265. 03001.

10. *Tsunami Data and Information*. Retrieved May 15, 2021, from http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml doi:10.7289/V5PN93H7.

УДК 551.24

ДЕТАЛЬНОЕ КАРТИРОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ ЦУНАМИ 1923 И 1952 ГГ. НА ПОБЕРЕЖЬЕ ХАЛАКТЫРСКОГО ПЛЯЖА (АВАЧИНСКИЙ ЗАЛИВ, КАМЧАТКА)

***Пинегина Т. К.*[1,2]**

[1]*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,*
[2]*Институт физики Земли, Москва,*
pinegtk@yandex.ru

Введение

В настоящее время территория Халактырского пляжа, расположенного на побережье Авачинского залива поблизости от Петропавловск-Камчатской городской агломерации, активно осваивается туристическими и спортивными компаниями. На территории пляжа располагаются визит-цент, серфинг-клуб, кемпинги, глэмпинги, ежедневно пляж посещают множество отдыхающих и туристов. Халактырский пляж находится в цунамиопасной зоне, поэтому в случае возникновения угрозы цунами, необходимо разработать пути эвакуации для посетителей, находящихся в различных зонах пляжа. Для этих целей, летом 2020 г. на наиболее посещаемом участке побережья Халактырского пляжа (от мыса Толстый до устья р. Халактырка), длиной в 5-6 км и шириной около 1 км, было проведено детальное картирование отложений цунами 1923 и 1952 гг., стоящих в ряду наиболее катастрофических событий за период исторических наблюдений на Камчатке (с 1737 г.) [2, 3]

Методика исследований

Во время проведения исследований, на территории Халактырчкого пляжа (рис. 1) закладывались неглубокие шурфы, и в них описывались отложения цунами 1952 и 1923 гг. Отложения цунами в данном районе представлены темно-серыми песками, аналогичными пляжевым, их мощность в среднем варьирует от десяти см до нескольких мм в зоне выклинивания. Отложения этих цунами имеют хорошую сохранность в геологических разрезах, ниже них по разрезу располагается горизонт тефры извержения Конуса Штюбеля вулкана Ксудач (КШт$_3$) 1907 года нашей эры [1], который позволяет однозначно отделить отложения недавних исторических цунами от более древних (рис. 2)

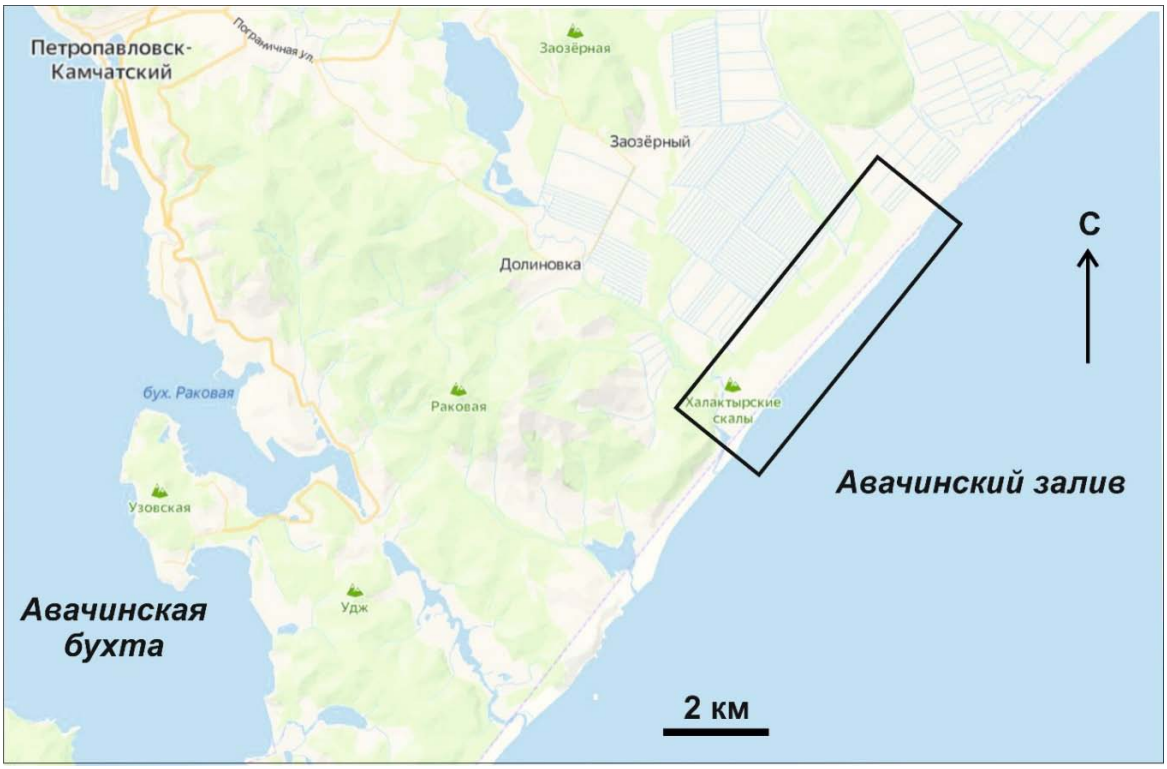


Рис. 1. Район детальных исследований (черный прямоугольник) отложений цунами на Халактырском пляже.

Во время извержения конуса Штюбеля - стратовулкана, который возник в последней кальдере Ксудача ~1700 л.н., в 1907 г. была выброшена тефра объемом около 1,5-2 км^3[1]. Высота эруптивной колонны во время извержения 1907 г. превышала 22 км. Вблизи конуса Штюбеля горизонты тефры 1907 г. имеют двучленное строение: нижняя часть представлена черными андезитобазальтовыми лапилли и бомбами шлака, верхняя - светлыми пемзовыми лапилли и бомбами. Ось пеплопада извержения 1907 г. была направлена преимущественно на северо-восток и выпадение пепла наблюдалось в секторе от г. Охотск до п. Оссора. Пепел этого извержения служит прекрасным маркирующим горизонтом к северу от вулкана Ксудач вплоть до широты Авачинского вулкана. Отличительная особенность тефры конуса Штюбеля - низкое содержание K_2O и отсутствие роговой обманки. На Халактырском пляже тефра КШт$_3$ представлена грубым пемзовым песком серого цвета мощностью 2-4 см.

Рис. 2. Пример разреза с отложениями тефры исторических извержений Конуса Штюбеля 1907 г. (КШт$_3$), Авачинского вулкана (АВ) 1779 г. (так называемая тефра капитана Кука), и отложений исторических цунами. Яркий желтый пепел в нижней части разреза – от извержения Бараньего Амфитеатра (ОП) расположенного у подножья вулкана Опала, около 500 года нашей эры.

Полученные результаты и выводы

В результате проведенной работы, на территории Халактырского пляжа были выделены участки, где цунами имели максимальную дальность заплесков вглубь суши, участки с наиболее характерными (средними) заплесками для 1923 и 1952 гг., а также участки, не подвергавшиеся воздействию этих цунами (рис. 3). Оказалось, что практически везде горизонтальный заплеск цунами 4 февраля 1923 г. на 50-150 метров превышал дальность заплеска цунами 5 ноября 1952 г., хотя в каталоге цунами на Камчатке [2], данные о проявлениях этого цунами на Халактырском пляже отсутствуют. Наиболее далекие заплески, величиной более 1.5 км наблюдались на южной оконечности пляжа в районе устья р. Халактырка. В других местах дальность заплеска, восстановленная по отложениям цунами, не превышала 400-500 м.

В настоящее время в мире существует несколько работ, в которых проводится сравнение реальных горизонтальных заплесков цунами и расстояния от уреза воды максимально удаленных отложений цунами. Так, в работе МаккИннес и др. [5] на примере Курильских цунами 2006 и 2007 гг. было показано, что дальность реальных заплесков отличается от «седиментационных» лишь на 5 %.

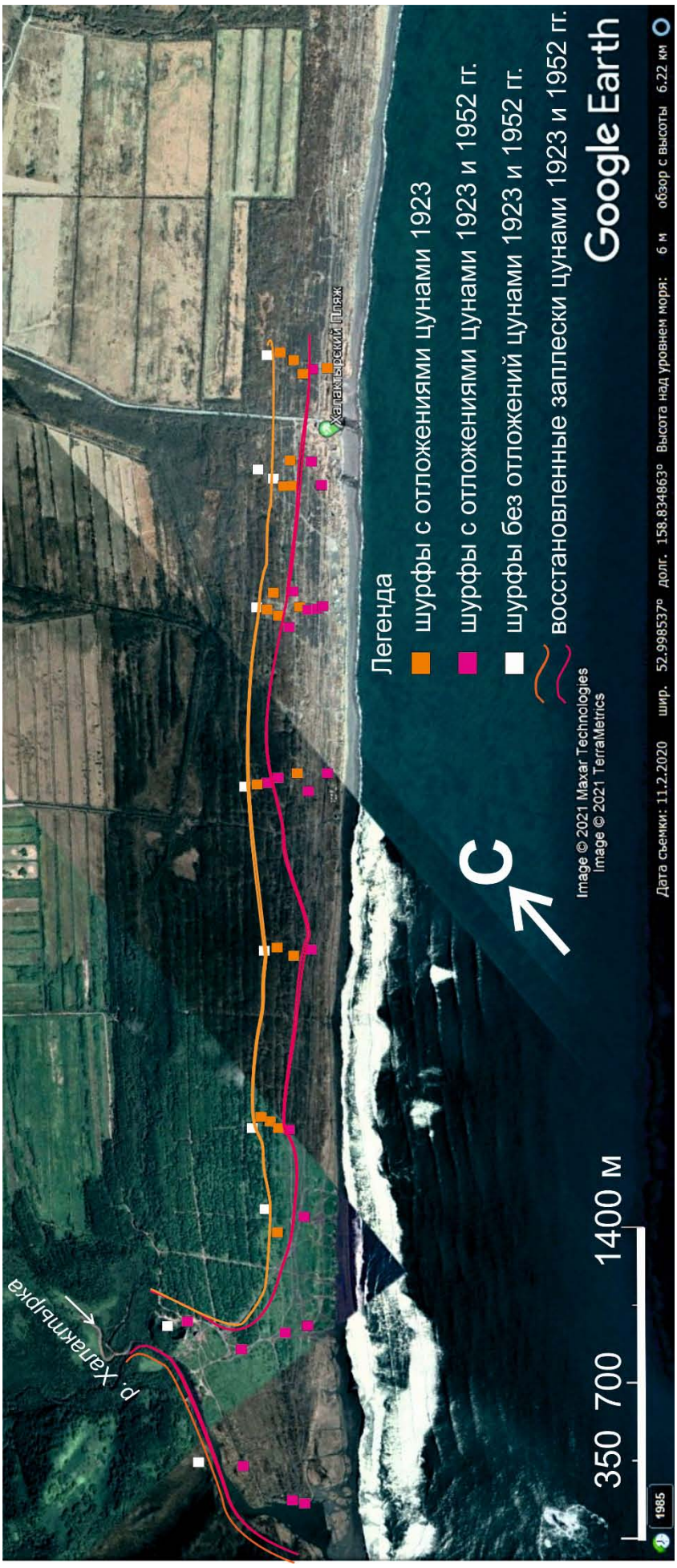


Рис. 3. Фрагмент космического снимка (ресурс Google Earth) на территорию обследованного участка Халактырского пляжа с положением шурфов и восстановленными по отложениям цунами линиями максимальных горизонтальных заплесков цунами.

В работе Джеффа и др. [4], выполненной на островах Суматра, Ниас и Симелу после цунами 2004 г. также приводятся данные, показывающие незначительные отличия реальных и седиментационных заплесков, но при этом с двумя исключениями: в одном случае разница заплесков достигала 27 %, а во втором случае – 43. Вероятно, это было связано с тем, что замеры проводились в поселках, на территории которых было недостаточно песчаных отложений, которые волна цунами могла бы перенести. В связи вышесказанным, и исходя из того, что на территории Халактырского пляжа имеется достаточно песчаного материала для его переноса волнами цунами, можно полагать, что реальные заплески исторических цунами 1952 и 1923 гг. незначительно отличались от восстановленных нами по их отложениям. Полученные данные необходимо использовать при создании маршрутов эвакуации для посетителей пляжа (с учетом наличия у них транспорта и без него) в случае объявления тревоги цунами.

Работа выполнена при финансировании Минобрнауки России, грант №14.W03.31.0033 (рук. Н.М. Шапиро), Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ; Гос. темы НИР ИВиС ДВО РАН № 0282-2019-0005, Глубинное строение, сейсмичность и геодинамика Курило-Камчатской островодужной системы.

Список литературы

1. *Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Базанова Л.И., Сулержицкий Л.Д.* Сильные и катастрофические эксплозивные извержения на Камчатке за последние 10 тысяч лет // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН, Петропавловск - Камчатский, 2001, 428 с.

2. *Заякин Ю.Я., Лучинина А.А.* Каталог цунами на Камчатке. Обнинск: ВНИИГМИМЦД, 1987. 50 с.

3. *Пинегина Т.К., Базанова Л.И.* Новые данные о параметрах исторических цунами на побережье Авачинского залива (Камчатка) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно - научный центр». Серия: «Науки о Земле». 2016. № 3. Вып. 31. С. 5–17.

4. *Jaffe B., Borrero J., Prasetya G., Peters R. et all.* Northwest Sumatra and Offshore Islands Field Survey after the December 2004 Indian Ocean Tsunami // Earthquake spectra. 2006. V. 22. P. 105–135. doi: 10.1193/1.2207724.

5. *MacInnes B., Bourgeois J., Pinegina T.K., Kravchunovskaya E.A.* Before and after: geomorphic change from the 15 N ovember 2006 K uril Island tsunami // Geology. 2009. Vol. 37. N11. P. 995–998. doi: 10.1130/G30172A.

Моделирование в геофизике

УДК 551.594

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКАХ ЭКСПЛОЗИЙ ВУЛКАНА ЭБЕКО (О. ПАРАМУШИР)

Акбашев Р.Р., Фирстов П.П.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, arr@emsd.ru

Введение

Действующий стратовулкан Эбеко (50°41′20″ с.ш., 156°00′54″ в.д.) высотой 1156 м н.у.м., расположенный на о. Парамушир (рис. 1а), по частоте извержений является одним из активнейших вулканов Курильской островной дуги. Он располагается в северной части хребта Вернадского на острове Парамушир. В 7 км к востоку от него расположен г. Северо-Курильск.

Во время извержений вулкана Эбеко формируются эруптивные облака (ЭО), высота которых может достигать 4-5 км н.у.м. Условия стратификации атмосферы определяют перенос масс пепла и газов ЭО на различные расстояния. Довольно часто в г. Северо-Курильск выпадает пепел.

С точки зрения электрических эффектов, ЭО – сложная движущаяся и изменяющаяся во времени объемная электростатическая структура. В такой электростатической структуре объемные заряды могут достигать значений пробоя воздуха [5]. Поэтому формирование и распространение ЭО, как правило, сопровождается вулканической грозой [6]. Носителем зарядов в ЭО являются продукты извержения – вулканический пепел в широком диапазоне размеров (~ 0.1–100 мкм), аэрозоли и газы, в которых на пары воды приходится до 98% массы всех летучих.

В период с 29.07.2020 г. по 05.08.2020 г. на склоне в. Эбеко в непосредственной близости от кратера вулкана (3 и 4 км) работали временные пункты наблюдения (ПН) градиента потенциала электрического поля атмосферы (V' ЭПА). Вместе со стационарным пунктом SKR (г. Северо-Курильск), расположенном в 7 км от кратера, они образовывали радиальный профиль относительно кратера вулкана (рис.1). В качестве датчиков использовались электростатические флюксметры ЭФ-4 [1].

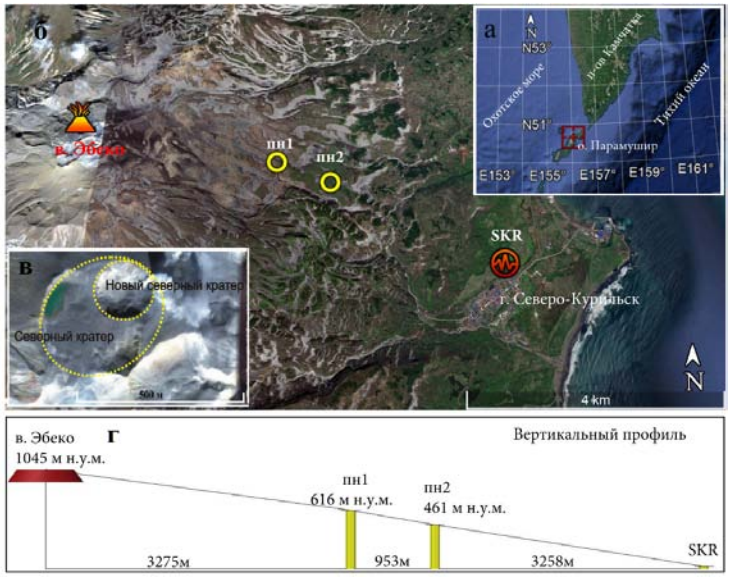


Рис.1. Географическое положение вулкана Эбеко (а), расположение пунктов наблюдений на горизонтальной (б) и вертикальной плоскости (г), кратер вулкана Эбеко (в).

В представленной работе показаны результаты натурных наблюдений V' ЭПА при прохождении ЭО от извержений вулкана Эбеко и физического моделирования пепловых облаков с регистрацией V' ЭПА. На основании этих результатов показано, что в формировании наблюдаемых объемных зарядов ЭО участвуют процессы перераспределения зарядов между нижней областью ЭО и поверхностью Земли, когда нижняя область ЭО имеет физическое взаимодействие с поверхностью.

По всей видимости, такие процессы характерны для других вулканов с эксплозивным типом извержений.

Анализ зарегистрированных откликов *V′* ЭПА на прохождение ЭО

В результате натурных наблюдений было зарегистрировано 24 отклика *V′* ЭПА, когда ЭО распространялось вблизи или над ПН. Выделено три типа откликов:

I) бухтообразный, отрицательной полярности (рис. 2а), зарегистрировано 17 событий или 71%;

II) бухтообразный, отрицательной полярности, но в области минимума наблюдается положительное возмущение импульсного типа (рис. 2а), превышающее фоновое значение *V′* ЭПА – 5 событий (21%);

III) биполярный отклик (рис. 2а), форма которого, как показано в работе [2], свидетельствует о прохождении горизонтального диполя 2 события или 8%.

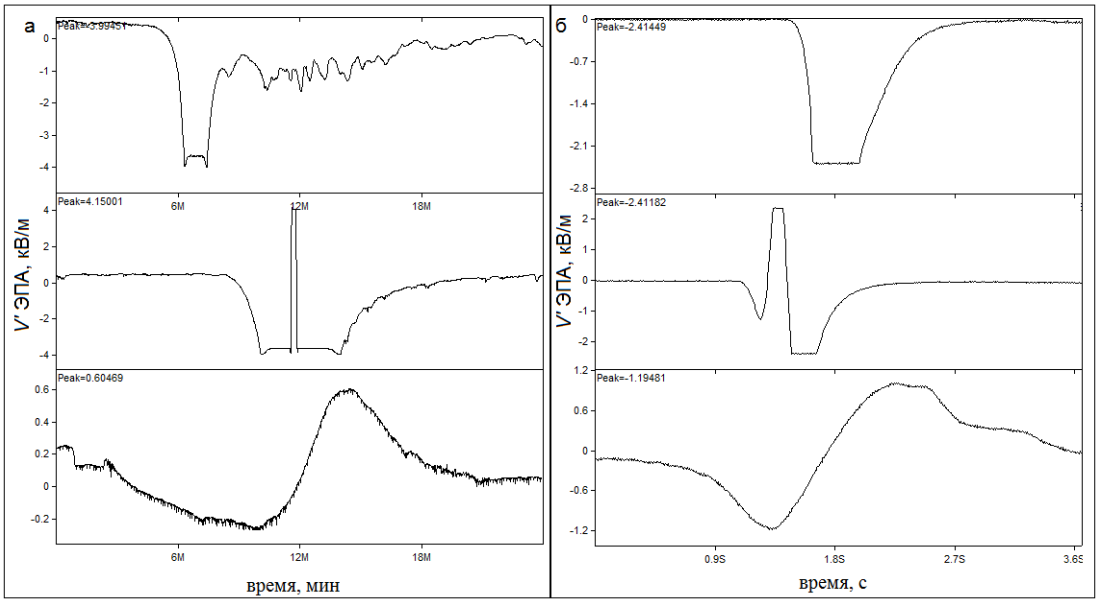


Рис. 2. Примеры зарегистрированных откликов V′ ЭПА I тип, II тип, III тип:
а – по данным натурных наблюдений; б – по данным физического моделирования.

Анализ данных видеонаблюдения из временных ПН и с/с SKR в комплексе с данными баллонного зондирования позволили восстановить параметры и особенности распространения ЭО, для которых были зарегистрированы отклики в вариациях *V′* ЭПА. В результате анализа данных выявлена взаимосвязь выделенных типов откликов *V′* ЭПА с особенностями распространения ЭО. По всей видимости, в формировании объемных зарядов в ЭО важное значение оказывают условия распространения нижней области ЭО относительно поверхности склона вулкана.

Физическое моделирование откликов в вариациях *V′* ЭПА связанных с особенностями распространения пеплового облака

С целью подтверждения природы зарегистрированных откликов, было проведено физическое моделирование. Для этих целей был отобран пепел со склона вулкана Эбеко и подготовлен экспериментальный стенд. Экспериментальный стенд (рис. 3) позволил смоделировать пепловое облако и задавать его направление и скорость распространения относительно поверхности земли. Устройство экспериментального стенда выполнено таким образом, чтобы заряжение пепла происходило за счет трибоэлектрического эффекта. Процесс формирования объемных зарядов моделируемого ЭО контролировался двумя электростатическими датчиками ЭФ-4.

Основными элементами конструкции стенда являются две конусные емкости (воронки) (рис. 3), которые формируют камеру для закладки пеплов. К нижней воронке подведен шланг от компрессора, вторая воронка задает направление инжекции пепловой смеси. Внутренняя полость воронок проклеена алюминиевой лентой. Для предотвращения поступления пепла в шланг, нижняя воронка имеет шарообразный клапан, выброс пеплов из камеры происходит за счет подачи в воронку сжатого воздуха от компрессора. Пепел под воздействием давления воздуха из камеры устремляется

в узкое горлышко воронки. Такая конструкция значительно повышает трибоэлектрический эффект заряжения пепла [3, 4, 7, 8]. В результате формируется пепловое облако. Для задания направления распространения и скорости распространения пеплового облака, на стенд установлен вентилятор с диффузором для формирования потока воздуха. Вентилятор с диффузором установлен таким образом, чтобы имелась возможность задавать угол наклона диффузора. Предусмотрена возможность регулирования скорости вращения вентилятора для задания необходимой скорости потока воздуха. Для усиления эффекта электростатической индукции и эффекта перераспределения зарядов между нижней областью пеплового облака и поверхностью, по траектории движения пеплового облака была установлена металлическая сетка размером 100*500 см. В начале и конце сетки устанавливались электростатические флюксметры: положение А – 1.5 м от пепловой камеры, положение Б - 5 м (рис. 3).

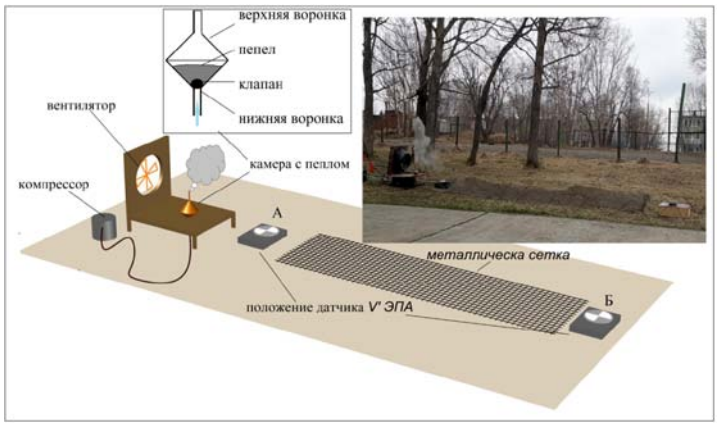


Рис. 3. Схема стенда для физического моделирования объемного заряда ЭО.

Физическое моделирование откликов ***I*** *типа.* В этом случае диффузор вентилятора устанавливался в такое положение, чтобы и верхняя и нижняя области пеплового облака распространялись максимально высоко от поверхности. С помощью вентилятора обеспечивалась различная скорость движения распыленного пепла. Было проведено 10 опытов. Во всех случаях регистрировался отклик бухтообразной формы отрицательной полярности (рис. 2б).

Физическое моделирование откликов типа ***II****.* Для этого случая распыление пепла проводилось под меньшим углом к горизонтали, так чтобы нижняя часть пеплового облака соприкасалась с поверхностью в позиции А, где был установлен флюксметр. Для усиления эффекта под датчик *V′* ЭПА устанавливалась металлическая сетка (20*20 см). В результате серии из 4 опытов были зарегистрированы отклики, похожие по форме записи на отклики **II** типа (рис. 2б).

Физическое моделирование откликов ***III*** *типа.* Для моделирования **III** типа отклика, датчик *V′* ЭПА устанавливался в положение Б, параметры потока воздуха и положение диффузора вентилятора подбирались таким образом, чтобы нижняя область пеплового облака взаимодействовала с заземленной металлической сеткой (рис. 3). В некоторых испытаниях вентилятор не был включен, пепловое облако распространялось в условиях естественной атмосферы. В результате серии из 4 опытов были зарегистрированы отклики (рис. 2б) по форме подобные ***III*** *типу*, которые были зарегистрированы при натурных наблюдениях.

Выводы

На основании результатов натурных наблюдений *V′* ЭПА и физического моделирования авторами предложена новая феноменологическая модель формирования объемных электростатических зарядов в ЭО. Согласно которой в момент взаимодействия нижней области ЭО с поверхностью склона вулкана происходит перераспределение зарядов (рис. 4). Перераспределение зарядов, по всей видимости, в какой-то степени контролируется эффектом наведенной электростатической индукции на поверхность склона вулкана от основного заряда ЭО, который локализован в верхней области ЭО (рис. 4). Процесс продолжается до момента, когда возникает компенсация объемных зарядов между нижней и верхней областями ЭО, и/или до момента отрыва нижней области ЭО от поверхности (рис. 4).

Предложенная модель дополняет известные процессы формирования объемных зарядов в ЭО [2].

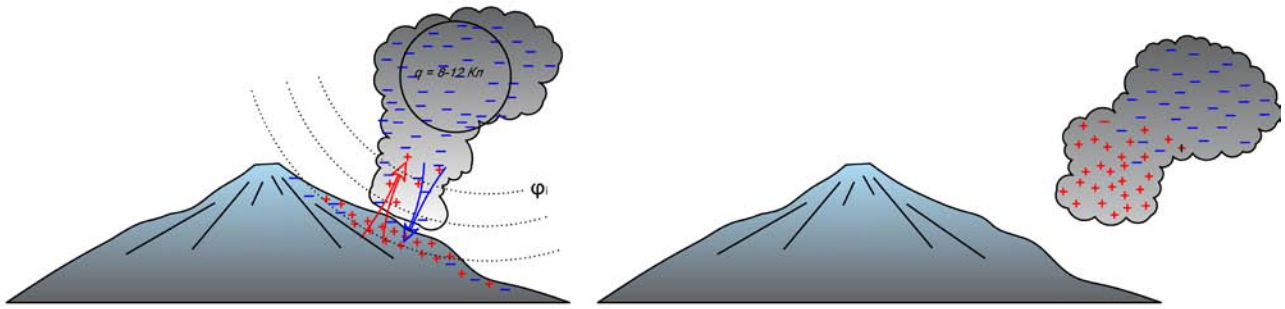


Рис. 4. Феноменологическая модель формирования объемных зарядов в ЭО.
q – заряд ЭО, на момент когда оно достигло максимального подъема; φ – потенциал электрического поля, которое генерируется основным объемным электростатическим зарядом ЭО.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Ефимов, В.А., Орешкин Д.М., Фирстов П.П., Акбашев Р.Р.* Применение электростатического флюксметра ЭФ–4 для исследований геодинамических процессов // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 4. С. 35–46.

2. *Чернева Н.В., Фирстов П.П.* Формирование локального электрического поля атмосферы на Камчатке под влиянием природных процессов // Владивосток: Дальнаука. 2018. С. 127.

3. *Alois S., Merrison J., Iversen J.J., Sesterhenn J.* Contact electrification in aerosolized monodispersed silica microspheres quantified using laser based velocimetry. 2017. J. Aerosol Sci. 106, 1–10. doi:10.1016/j.jaerosci.2016.12.003

4. *Aplin K.L., Bennett A.J., Harrison R.G., Houghton I.M.P.* Electrostatics and in situ sampling of volcanic plumes. 2016. Volcanic ash: Hazard observation and monitoring (pp. 99–113). Amsterdam: Elsevier. ISBN: 978–0–081004050.

5. *Mather T.A., Harrison R.G.* Electrification of volcanic plumes // Surveys in Geophicsis. 2006. V. 27. P. 387–432.

6. McNutt S.R., Williams E.R. Volcanic lightning: global observations and constraints on source mechanisms //Bull Volcanol. 2010. V. 72. № 10. P. 1153–1167.

7. *Mendez Harper J., Dufek J., McDonald G.D.* Detection of sparkdischarges in an agitated mars dust simulant isolated from foreign surfaces // 2021. Icarus, 357, 114268.

8. Hatakeyama H., Uchikawa K. On the disturbance of the atmospheric potential gradient caused by the eruption–smoke of the volcano Aso // Pap Meteor Geophys. 1951. V. 2. P. 85–89.

УДК 550.347

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБИННОГО СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ ЛОВОЗЕРСКОГО И ХИБИНСКОГО МАССИВОВ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЧАСТЬ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА)

Гоев А.Г.[1, 2], Резниченко Р.А.[1], Тарасов С.А.[1], Федоров А.В.[3]

[1] Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва,
andr.goev@gmail.com
[2] Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты
[3] Кольский филиал Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН", г. Апатиты

Введение

Регион исследования расположен на северо-востоке Балтийского щита и широко известен своей уникальной геологией и, в особенности, своими массивными палеозойскими интрузиями (рис. 1). В течение XX и начале XXI века проводились междисциплинарные исследования по комплексной реконструкции процесса формирования Хибинского и Ловозерского плутонов и создания моделей строения этих комплексов. Были проведены многочисленные петрографические и минералогические исследования, описывающие около 500 различных минералов и пород плутонов [5, 26 и др.]. Основным источником геохронологических данных является изотопный анализ пород массивов [3, 6, 16, 25 и др.]. В число геофизических методов исследований района входят площадные магнитные и гравитационные съемки. Количество работ, посвященных глубинному строению плутонов относительно невелико, наиболее значимыми из них являются [10] и [4].

Единственным источником данных о скоростном строении подкоровой части литосферы исследуемого региона в настоящий момент являются данные глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). В 1986 году, с использованием химических и ядерных взрывов, был отработан сверхдлинный профиль Мурманск – Кызыл ("Кварц"), общей протяженностью 4300 км, проходящий через изучаемую область. Из-за того, что Хибинский массив находится вблизи северной оконечности профиля, максимальная глубина просвечивания составляет 120–130 км.

Целью представленной работы является исследование скоростной структуры земной коры и верхней мантии северо-восточной части Балтийского щита по данным широкополосных станций Апатиты и Ловозеро (рис. 1). Полученные скоростные модели, возможно, позволят выявить возможные различия в скоростном строении Хибинского и Ловозерского плутонов, а также установить их связь с древними мантийными процессами.

Рис.1 Схема района исследования и основные магматические комплексы - Хибинский и Ловозерский массивы. На врезке область исследования показана черным прямоугольником. Треугольниками обозначены сейсмические станций Апатиты и Ловозеро.

Методика наблюдений и исходные данные

В работе были использованы сейсмические данные двух широкополосных сейсмических станций ГС РАН Апатиты (APA) и Ловозеро (LVZ) начиная с 2000 года. Станция Ловозеро оснащена датчиком Streckeisen STS-1 с периодом 360 с. Регистрация на станции Апатиты в период с 2000 по 2010 годы велась с использованием широкополосного датчика Guralp CMG-3T с периодом 120 с., а начиная с 2010 с использованием датчика Guralp CMG-3ESPC с периодом 60 с.

Для восстановления глубинного строения земной коры и верхней мантии исследуемой области был применен метод функций приемника [13, 23]. Он активно используется при решении задач восстановления глубинного скоростного строения регионов с различным геодинамическим режимом по данным, в том числе, одиночных широкополосных сейсмических станций (например, [20, 26]). Метод обычно разделяют на две составляющие, по типам анализируемых обменных фаз – P функция приемника (или PRF) использует обменные и кратные волны P-S (P_s) и, соответственно, S функция приемника (или SRF), использующая обменные и кратные волны S-P (S_p). Эффективно дополняя друг друга, вместе они позволяют получить устойчивый скоростной разрез земной коры и верхней мантии. Использование только PRF сопряжено с рядом проблем и, в первую очередь, с риском ложного обнаружения слабо контрастных мантийных границ. Это связано с тем, что амплитуда обменной волны от сейсмической границы зависит, в первую очередь, от контраста скоростей в выше и нижележащих слоях. В общем случае, скорости в мантии меняются не слишком резко и генерируют обменные волны малых амплитуд. Эти фазы наблюдаются на сейсмограмме позже прихода первых обменных и кратных волн от контрастных границ в коре и существенно зашумляются последними. С целью преодоления этой проблемы в 2000 году в работе [13] была предложена методика SRF. Ее главным преимуществом является то, что обменные волны S_p наблюдаются на сейсмограмме раньше прихода первой поперечной волны и, как следствие, волновая картина не осложнена многократными колебаниями. Более того, чем глубже находится граница обмена, тем раньше на сейсмограмме будет наблюдаться обменная волна от нее.

Для получения индивидуальных функций приемника был использован подход, многократно апробированный и детально описанный в литературе [13, 23]. По этой причине мы кратко остановимся только на наиболее важных аспектах методики. В первую очередь, сейсмические события отбираются в соответствии с эпицентральными расстояниями. Для PRF источники возбуждений должны находиться в диапазоне расстояний 40^0 – 100^0 от приемников, для SRF – 60^0 – 100^0. Такие удаления обеспечивают, с одной стороны, достаточную глубину проникновения сейсмических волн для исследования верхней мантии, а с другой – позволяют избежать “зоны тени”. Для получения параметров анализируемых событий (а именно – времени в очаге, глубины и координат) использовался каталог CMT (Global Centroid Moment Tensor Catalog) [11, 12]. Также эмпирически установлено, что события с магнитудой менее 5.5 чрезвычайно редко пригодны для обработки и потому не использовались. Для дальнейшего анализа отбирались события с импульсной формой колебания первой падающей волны (P для PRF и S для SRF) и высоким (более 3) отношением сигнал/шум.

Моделирование

Для восстановления скоростных разрезов использовалась совместная инверсия PRF и SRF в предположении латерально однородной и изотропной Земли в районе станции. Поиск оптимальных моделей проводится с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта [18]. Синтетические функции приемника вычислялись с использованием матричного алгоритма Томсона – Хаскелла [14]. Преобразование к “плоской” Земле применялось согласно Бисвасу [8]. Плотность определяется скоростью продольной волны по закону Берча [7]. Для получения скоростных моделей генерируется множество случайных пробных моделей. Они состоят из тринадцати слоев. Свободными параметрами являются: скорость поперечной волны, отношение Vp/Vs и мощность каждого слоя. Для стабилизации инверсии, скорости на глубине 300 км фиксируются на значениях согласно IASP91 [15]. Дополнительными инвертируемыми параметрами, наряду с PRF и SRF, являются невязки времен пробега фаз 410 и 660 км в верхней мантии для продольных и поперечных волн относительно модели IASP91 (Δtp и Δts). Эти параметры рассчитывались по методике, приведенной в [24]. Для получения окончательного распределения варьируемых параметров пространство параметров модели было разбито на ячейки. Окончательное решение представлено как область сгущения минимизированных случайных исходных моделей, синтетические PRF и SRF от которых лучше всего соответствуют наблюденным данным. Полученные апостериорные функции распределения визуализируются с использованием цветовой палитры. Выделяются те ячейки, через которые прошло наибольшее

количество отобранных минимизированных пробных моделей. Использованный механизм получения решения обратной задачи подробно описан в [1].

Известно, что функции приемника, состоящие из обменных и кратных волн, характеризуют скоростную структуру того района, где они сформировались. Чтобы сопоставить между собой скоростные структуры областей Хибинского и Ловозерского массивов, а также сравнить их со структурой близлежащей части Балтийского щита, рассчитанные индивидуальные PRF и SRF для каждой из станций были разделены на два комплекта. Первый – с точками обмена внутри массивов, второй – вне их. Разделение производилось на основе азимутального распределения использованных при обработке событий и относительного расположения сейсмических станций и изучаемых интрузий. Тем самым, было сформировано четыре комплекта данных, которые инвертировались раздельно. В группе функций приемника, характеризующих Хибинский массив, содержится 139 индивидуальных PRF и 65 SRF; Ловозерский массив – 60 PRF и 49 SRF; Балтийский шит по данным станции APA – 93 PRF и 57 SRF; Балтийский шит по данным станции LVZ – 160 PRF и 98 SRF. Для каждого подмножества данных было рассчитано 15 000 случайных пробных моделей. Для получения окончательных скоростных разрезов было выбрано порядка 1% моделей из каждого комплекта, которые лучше всего соответствуют наблюдаемым данным (рис. 2).

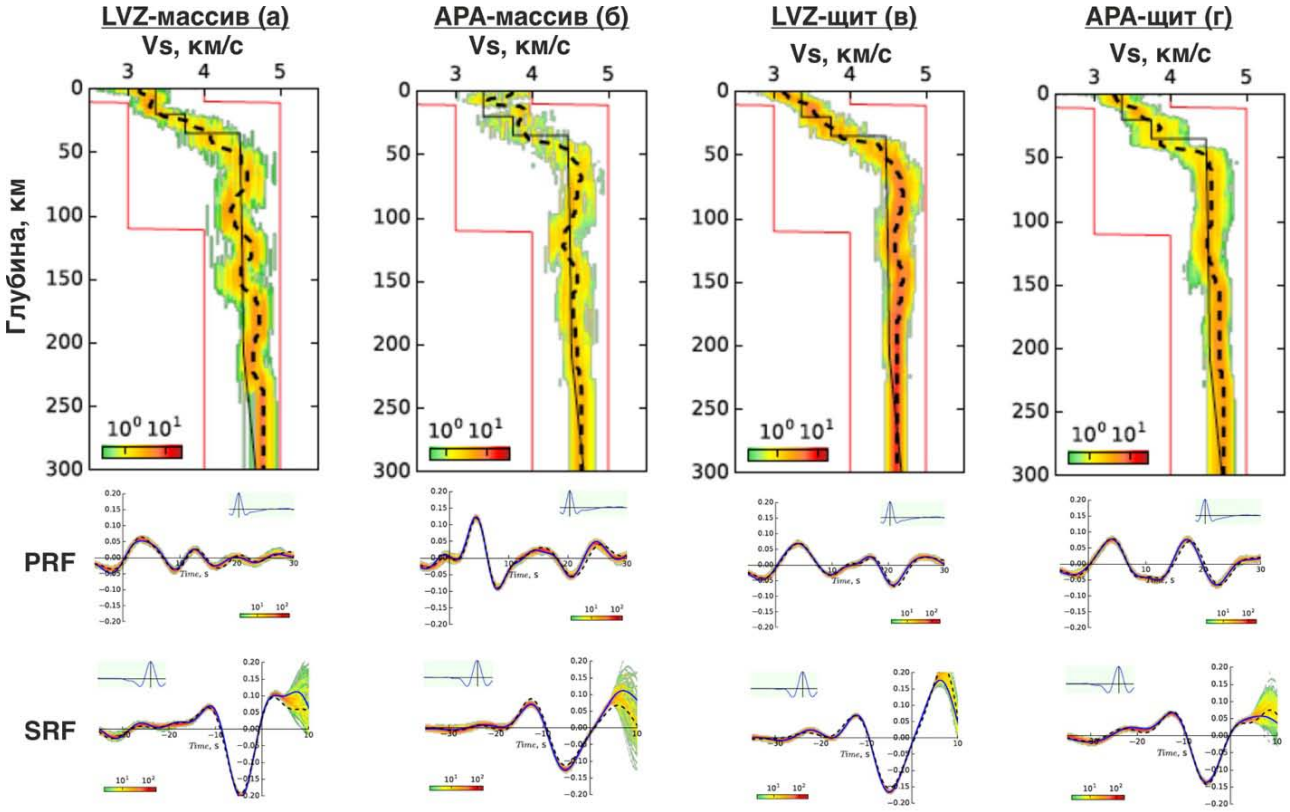


Рис. 2 Скоростные модели поперечных волн для станций APA и LVZ. Модели Ловозерского и Хибинского массивов - а, б; близлежащих областей Балтийского щита - в, г. Цветами показаны поля сгущения индивидуальных минимизированных случайных моделей. Пунктирными линиями показаны медианные модели. Красные линии обозначают границы формирования случайных начальных моделей. Черные линии представляют модель IASP91. Наблюдаемые PRF и SRF показаны синими линиями.

В построенных скоростных моделях верхней мантии наиболее значимой особенностью является слой пониженных, относительно стандартной модели IASP91, скоростей на глубинах 90 - 140 км. Выявленный слой является “средне литосферной неоднородностью” или MLD. Этот слой обнаружен практически повсеместно под древними платформами на глубине порядка 100 км [22]. Однако глубины залегания его кровли и мощность различаются для различных тектонических структур [9, 19, 21]. Для западной части Балтийского щита он обнаружен на глубинах 90 – 130 км. [17].

Скоростные модели коры и коро-мантийного перехода для всех выделенных групп данных приведены на рисунке 3. Скоростная структура Хибинского массива (рис. 3б) отличается существенно более высокими, чем выявлено на остальных моделях, скоростями Vs до глубины 20 км.

Также в модели выделяется слой пониженных скоростей на глубинах 5 – 11 км. Граница Мохо для моделей Хибинского массива, а также для Балтийского щита по данным обеих станций (рис 3б, в, г) определена достаточно резким разделом на глубине порядка 40 км. Коро-мантийный переход для модели Ловозерской интрузии (рис 3а) имеет более градиентный характер и залегает на глубине порядка 48 км.

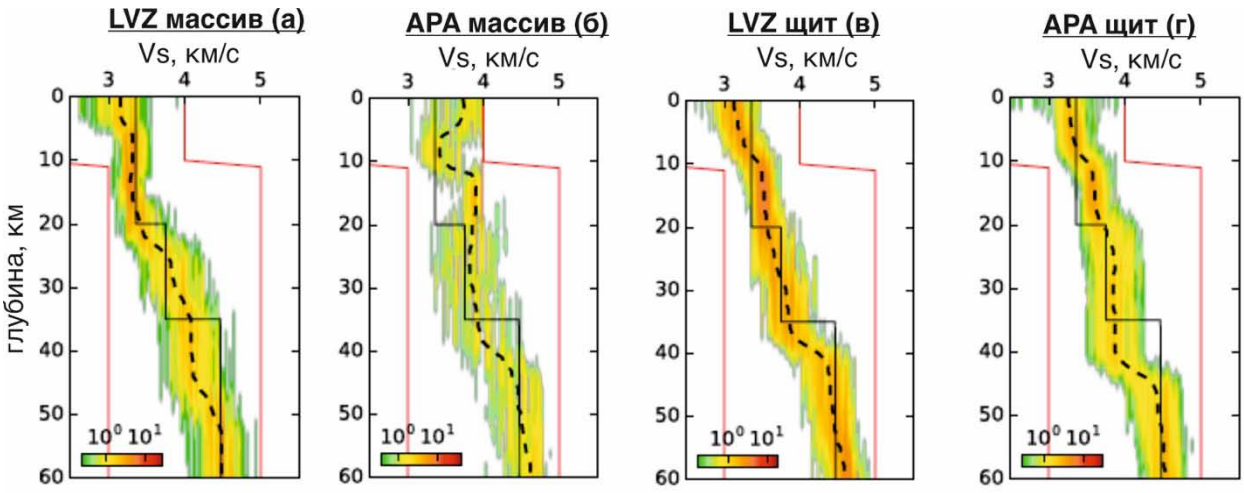


Рис. 3 Детальные скоростные модели земной коры и коро-мантийного перехода для выделенных групп данных. Обозначения на рисунке аналогичны рис. 2.

Заключение

В работе представлены результаты моделирования скоростного строения Хибинской и Ловозерской интрузий методом приемных функций. Основной чертой строения верхней мантии является наличие MLD на глубинах 90 – 140 км. Природа этой скоростной аномалии до конца не ясна. Однако она, по всей видимости, имеет глобальный характер и выявляется под древними кратонами Америки, Австралии, Африки, а также под остальной частью Балтийского щита.

На основе моделирования выявлена аномалия зоны Мохо под Ловозерской интрузией. Показано что она залегает на 8 км глубже чем для остальных моделей и имеет более градиентную структуру. Объяснить такое несоответствие в моделях можно механизмом формирования плутонов. По комплексу геолого-геохимических, а также палеомагнитных данных высказываются предположения о плюмовой природе этих структур. В таком случае, вероятно, выявленная аномалия связана с древним плюм-литосферным взаимодействием. Отсутствие аналогичной особенности на модели Хибинской интрузии вероятно связано с тем, что она имеет не вертикальную структуру, а смещается с глубиной в сторону Ловозерского массива [2] и точки обмена (точки в которых сформированы обменные волны, составляющие функции приемника) под ней принадлежат не Хибинской интрузии, а Балтийскому щиту.

Финансирование работы

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке – «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира». Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00161 и в соответствии с темой НИР № АААА-А19-119022090015-6.

Список литературы

1. Алешин И.М. Построение решения обратной задачи по ансамблю моделей на примере инверсии приемных функций // ДАН. Науки о Земле. Том. 496. № 1. 2021. С. 63–66.

2 Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В., Жирова А.М., Глазнев В.Н. Модель формирования Хибино-Левозерского рудоносного вулкано-плутонического комплекса // Геология рудных месторождений. Том 55. № 5. 2013. С. 397–414.

3 Баянова Т.Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма // Санкт-Петербург. 2004. 174 с.

4. Егорова Т.П., Павленкова Г.А. Сейсмо-плотностные модели земной коры и верхней мантии Северной Евразии по сверхдлинным сейсмическим профилям “Кварц”, “Кратон” и “Кимберлит” // Физика Земли. 2015. № 2. С. 98–115.

5. Елисеев Н.А., Ожинский И.С., Володин Е.Н. Геолого-петрографический очерк Хибинских тундр / Международный геологический конгресс. 17 сессия. СССР. 1937: Северная экскурсия. Кольский полуостров. Л.; М.: ОНТИ, Гл. ред. геол.-развед. и геодез. лит. 1937. С. 51–93.

6. Amelin Y.V. and Zaitsev A.N. Precise geochronology of phoscorites and carbonatites: the critical role of Useries disequilibrium in age interpretations // Geochim. Cosmochim. Acta. Vol. 66. №. 13. 2002. P. 2399–2419.

7. Birch F. The velocity of compressional waves in rocks in 10 kilobars, part 2 // J. Geophys. Res. vol. 66. 1961. P. 2199–2224.

8. Biswas N.N. Earth-flattening procedure for the propagation of Rayleigh wave // Pure. Appl. Geophys., 96. 1972. P. 61–74.

9. Chen C., Gilbert H., Fischer K.M., Andronicos C.L., Pavlis G.L., Hamburger M.W., Marshak S., Larson T., Yang X. Lithospheric discontinuities beneath the US Midcontinent–signatures of Proterozoic terrane accretion and failed rifting // Earth and Planetary Science Letters. Vol. 481. 2018. P. 223–235.

10. Dricker I.G., Roecker S.W., Kosarev G.L., Vinnik L.P. Shear-wave velocity structure of the crust and upper mantle beneath the Kola peninsula // Geophys. Res. Lett., vol. 23. № 23. 1996. P. 3389–3392.

11. Dziewonski A.M., Chou T. A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J Geophys Res., vol. 86. 1981. P. 2825–2852.

12. Ekström G., Nettles M., Dziewonski A.M. The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes // Phys. Earth Planet In. Vol. 200–201. 2012. P. 1–9.

13. Farra V., Vinnik L. Upper mantle stratification by P and S receiver functions // Geophys. J. Int., vol. 141. 2000. P. 699–712.

14. Haskell, N.A. Crustal reflection of plane P and SV waves // J. Geophys. Res., vol. 67. № 12. 1962. P. 4751–4767.

15. Kennett B. L. N., Engdahl E. R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophys. J. Int., vol. 105. 1991. P. 429–465.

16. Kramm U., Kogarko L.N., Kononova V.A., and Vartiainen H. The Kola Alkaline Province of the CIS and Finland: Precise Rb-Sr ages define 380–360 Ma age range for all magmatism // Lithos. Vol. 30. 1993. P. 33–44.

17. Perchuc E., Thybo H. 1996. A new model of upper mantle P-wave velocity below the Baltic Shield: Indication of partial melt in the 95 to 160 km depth range // Tectonophysics. Vol. 253. 1996. P. 227–245. (14)

18. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P. Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing // Cambridge University Press, New York. 2007.

19. Rychert C.A., Shearer P.M. A global view of the lithosphere-asthenosphere boundary // Science. Vol. 324. 2009. P. 495–498.

20. Schneider F. M., Yuan X., Schurr B., Mechie J., Sippl C., Kufner S. Murodkulov, S. The Crust in the Pamir: Insights from Receiver Functions // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2019.

21. Sun W., Fu L.Y., Saygin E., Zhao L. Insights Into Layering in the Cratonic Lithosphere Beneath Western Australia // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. Vol. 123. 2018. P. 1405–1418.

22. Thybo, H., Perchuc, E. The Seismic 8° Discontinuity and Partial Melting in Continental Mantle // Science., Vol. 275. 1997. P. 1626-1629.

23. Vinnik L.P. Detection of waves converted from P to S in the mantle // Phys. Earth Planet In., vol.15. 1977. P. 39–45.

24. Vinnik L., Kozlovskaya E., Oreshin S., Kosarev G., Piiponen K., and Silvennoinen H. The lithosphere LAB LVZ and Lehmann discontinuity under central Fennoscandia from receiver functions // Tectonophysics. Vol. 667. 2016. P. 189–198.

25. Wu F.Y., Yang Y.H., Marks M.A.W., et al. In situ UPb, Sr, Nd, and Hf isotopic analysis of eudialyte by La (MC) ICPMS // Chem. Geol., vol. 273. 2010. P. 8–34.

26. Xuelei Li., Zhuo Jia., Nanqiao Du. Structural Characteristics of Moho Surface Based on Time Series Function of Natural Earthquakes // Remote Sens. 2021. 13(4). 763.

27. Yakovenchuk V.N., Ivanyuk G.Yu., Pakhomovsky Y.A., Selivanova E.A., Men’shikov Yu.P., Korchak J.A., Krivovichev S.V., Spiridonova D.V. & Zalkind O.A. Punkaruaivite, LiTi2[Si4O11(OH)](OH)2•H2O, a new mineral species from hydrothermal assemblages, Khibiny and Lovozero alkaline massifs, Kola peninsula, Russia // Can. Mineral. Vol. 48. 2010. P. 41–50.

УДК 550.34

ЗАКОНОМЕРНОСТИ АКУСТОЭМИССИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СДВИГОВОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МОДЕЛЬНОГО РАЗЛОМА

Морозова К.Г., Остапчук А.А.

Институт динамики геосфер им. академика М.А.Садовского РАН, г.Москва
morozova@idg.chph.ras.ru

Аннотация

Данная работа посвящена исследованию акустической эмиссии (АЭ), сопровождающей эволюцию модельного разлома, центральная зона которого заполнена гранулированным материалом. Широкий спектр режимов скольжения разлома был реализован благодаря изменению вещественного состава и гранулометрии заполнителя. В работе представлен новый метод количественной категоризация АЭ, основанный на анализе параметра волновой формы. В потоке АЭ, сопровождающем относительное смещение блоков, можно выделить две моды АЭ. Выявлены систематическое снижение *b-value* моды II при зарождении как быстрых, так и медленных динамических событий, в то же время *b-value* моды I характеризуется случайными вариациями.

Введение

Блочная иерархическая структура земной коры определяет ее подвижность и локализацию деформаций в межблочных зонах. Разломы и крупные трещины контролируют закономерности накопления и высвобождения энергии упругой деформации в блочном массиве. В настоящее время доминирует представление о том, что именно фрикционная неустойчивость на разломах является наиболее вероятным механизмом неглубоких землетрясений [3, 11]. Динамика разломно-блоковой системы активно исследуется в численных и лабораторных экспериментах [5, 8]. В лабораторных экспериментах аналогом разломов является контакт жестких блоков, которые скользят относительно друг друга, при этом режим прерывистого скольжения считается аналогом сейсмического цикла [3].

Несмотря на то, что в лабораторных экспериментах условия критерия подобия по отношению к натурным явлениям не выполняются, в лабораторных экспериментах можно получить ценные сведения о механике фрикционного скольжения разломов [6]. АЭ эксперименты способны качественно воспроизвести основные статистические законы, описывающие естественную сейсмичность (закон Гутенберга-Рихтера, закон Омори, обратный закон Омори) [4, 10]. Также обнаруживаются другие качественные сходства с динамикой естественной сейсмичности, например, формирование сейсмического затишья перед сильными событиями, вариации скейлинговых параметров, спектральных характеристик сейсмического шума и т.д. [7, 9]. Несмотря на имеющийся задел в понимании динамики разломно-блоковых систем, интерпретация данных сейсмологического и геоакустического мониторинга зачастую затруднена или вовсе невозможна.

В настоящей работе представлены результаты серии лабораторных экспериментов, в которой был разработан новый метод анализа АЭ, основанный на категоризации АЭ по параметру волновой формы. Применение нового метода анализа позволило проследить эволюцию напряженного состояния модельного разлома и подготовку динамических событий разного типа.

Методика проведения лабораторных экспериментов

Лабораторные эксперименты по исследованию эволюции модельного разлома были проведены в постановке слайдер-модели. Схема установки показана на рис. 1. Модельный разлом представлял собой межблоковый контакт, заполненный слоем гранулированного материала (3) между подвижным (1) и неподвижным блоком-основанием (2). Подвижный блок скользит вдоль контакта под действием нормального и сдвигового усилий. В ходе экспериментов велась непрерывная запись сигнала АЭ в диапазоне частот 20-80 кГц с частотой дискретизации записи f_s 1 МГц. Подробно методика проведения экспериментов представлена в работе [2].

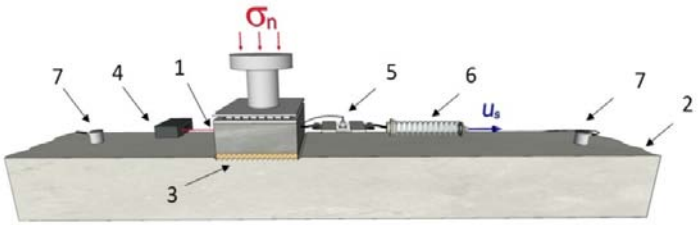


Рис. 1. Схема проведения эксперимента. 1 – мраморный блок 8см×8см×4.5см, 0.8 кг, 2 – гранитный стержень 2.5м×0.1м×0.1м, 3 – слой гранулированного материала (2-3 мм), 4 – датчик смещения, 5 – датчик силы CFT/5kN, 6 – пружинный элемент, 7 – датчики АЭ (20-80 кГц).

В качестве заполнителя модельного разлома использовался мелкодисперсный гранулированный материал с различным вещественным составом и гранулометрией. Именно характеристики заполнителя предопределяют параметры установившегося режима скольжения [2]. В ходе экспериментов был реализован широкий спектр режимов скольжения: прерывистое скольжение, которое характеризуется квазипериодичными актами быстрого проскальзывания, нерегулярный режим скольжения, при котором события быстрого и медленного скольжения происходят случайным образом, стабильное скольжение (непрерывный крип). На рис. 2. показаны характерные кривые нагружения, смещения и зарегистрированный сигнал АЭ для регулярного (а) и нерегулярного (б) режимов скольжения.

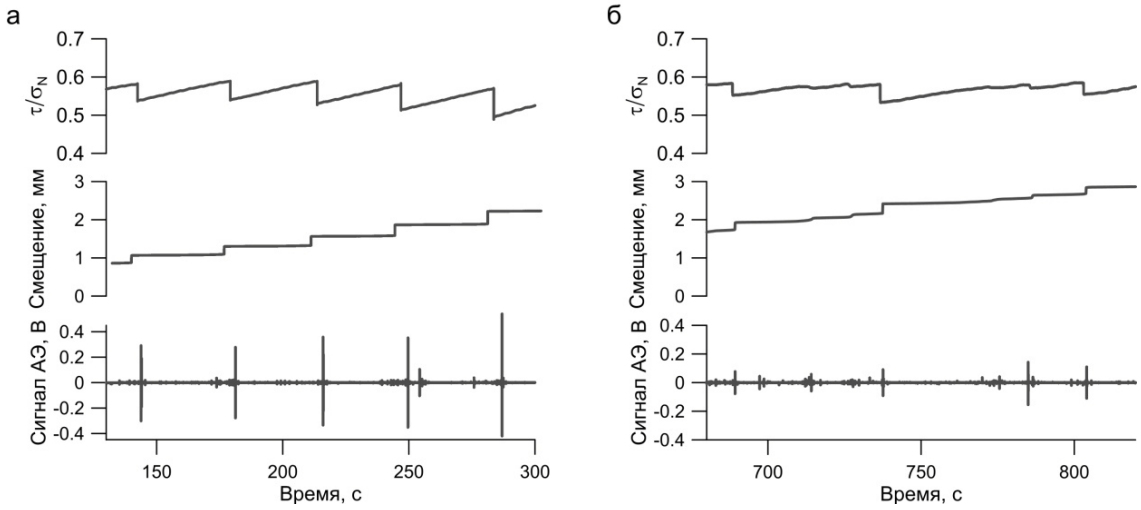


Рис. 2. Примеры зарегистрированных кривых нагружения, относительного смещения блоков и сигнала АЭ на запредельном участке кривой нагружения для регулярного (а) и нерегулярного (б) режимов скольжения.

Относительное смещение блоков сопровождается излучением большого числа импульсов АЭ. Для их выделения использовался энергетический критерий, по которому поток энергии должен превысить пороговый уровень:

$$\pi(t) = \frac{1}{\Delta t}\sum_{t}^{t+\Delta t}\frac{A(t_i)^2}{f_s} \geq 1.5A_{min}^2 \qquad (1)$$

где $A(t)$ – зарегистрированный сигнал АЭ в полосе 20-80кГц, Δt = 0.5 мс A_{min} – дисперсия сигнала акустической эмиссии, определенная в интервале 1 с перед началом сдвигового нагружения. Для каждого выделенного импульса АЭ была определена его длительность (dt), амплитуда (A_s) и параметр волновой формы (WI), который определяется как $WI = (t_{max} - t_s) / (t_e - t_{max})$, где t_{max} – момент достижения максимума амплитуды, t_s, t_e –время начала и окончания импульса АЭ.

Распределение параметра волновой формы (WI) имеет одинаковый вид для всех проведенных экспериментов (рис. 3) и описывается следующим соотношением:

$$N = \begin{cases} a_{WI}, WI \leq 0.1 \\ c_{WI} \cdot WI^{-w}, WI > 0.1 \end{cases} \qquad (2)$$

В распределении по параметру волновой формы WI выделяется два участка: “полка“ при $WI \leq 0.1$ и степенной спад при $WI > 0.1$. Наличие характерной величины в распределении импульсов АЭ по волновой форме (WI) позволяет провести количественную категоризацию каталога импульсов АЭ по этому параметру. Импульсы с $WI \leq 0.1$ составляют моду I. Это импульсы с относительно

резким нарастанием амплитуды. Мода II состоит из плавно нарастающих и трemороподобных импульсов с $WI > 0.1$.

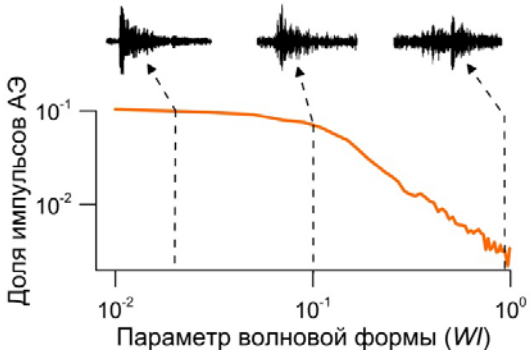


Рис. 3. Распределение импульсов АЭ по параметру волновой формы *WI*. Сверху показаны примеры импульсов АЭ с различными значениями волнового параметра.

С высокой степенью точности распределение импульсов АЭ по амплитуде (A_s) аппроксимируется степенной зависимостью аналогичной распределению Гутенберга-Рихтера:

$$\boldsymbol{lg(N) = a - b \cdot lg(A_s)} \qquad (3)$$

где a и b – положительные константы. Коэффициент b является скейлинговым параметром, указывающим на особенности развития динамического процесса [1].

На рис. 4 показаны закономерности изменения *b-value* двух мод АЭ, рассчитанные в скользящем окне, шириной 100 импульсов АЭ с перекрытием 1/2. Во время скольжения мода I с $WI \leq 0.1$ демонстрирует приблизительно постоянное значение *b-value*, и ее изменения случайны. Для импульсов с $WI > 0.1$ изменения значения *b-value* носят систематически повторяющийся характер. Быстрый рост значения *b-value* наблюдается после события динамического скольжения на начальном этапе сейсмического цикла. Затем, на этапе упругого нагружения, *b-value* остается приблизительно постоянным. На заключительной предсейсмической стадии сейсмического цикла наблюдается монотонное уменьшение *b-value*, т. е. доля высокоамплитудных импульсов растет. Следует отметить, что для моды I с $WI \leq 0.1$ максимальная амплитуда АЭ остается примерно одинаковой в течение сейсмического цикла, в то время как для популяции с $WI > 0.1$ максимальная амплитуда АЭ постепенно увеличивается по мере приближения системы к динамическому событию (рис. 4б). Выявленные закономерности характерны для всех проведенных экспериментов. Таким образом, для одной из мод наблюдается сохранение масштабной инвариантности, в то время как для другой изменение скейлинговых параметров коррелирует с изменением условий напряженного состояния.

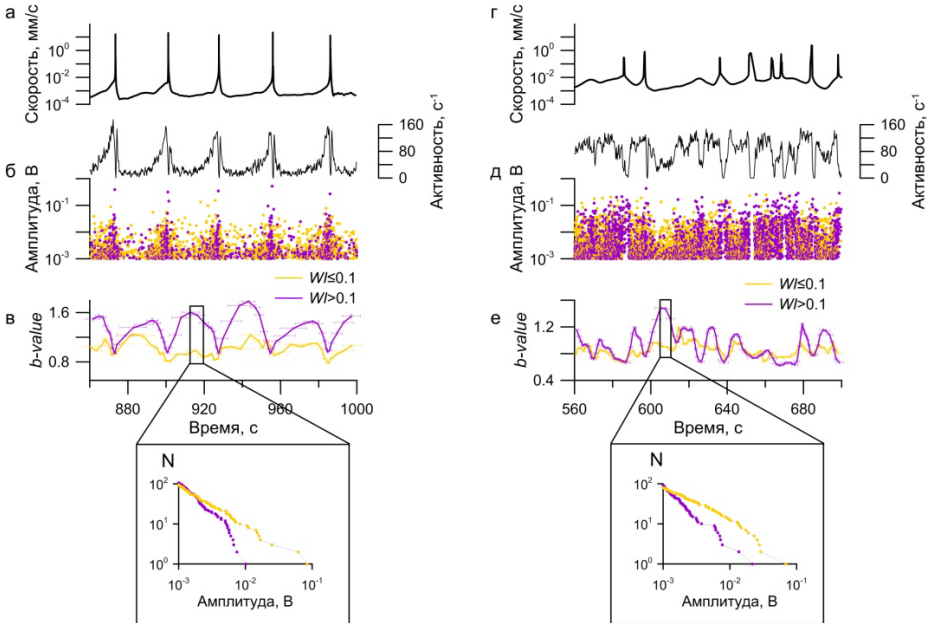


Рис.4. Эволюция состояния модельного разлома. Изменения скорости скольжения, амплитуды, активности АЭ и параметра *b-value* для моды I (желтый) и II (фиолетовый) при регулярном (а–в) и нерегулярном режиме скольжения (г-е). На врезках показан пример графика повторяемости импульсов АЭ.

Заключение

В ходе лабораторных экспериментов разработан метод количественной категоризации акустоэмиссионных данных. Волновая форма импульсов АЭ несет ценную информацию, которая позволяет оценивать напряженное состояние модельного разлома и проследить подготовку как быстрых, так и медленных динамических событий. Судя по результатам лабораторных экспериментов, выявление двухкомпонентной структуры потока сейсмических/акустических событий является критически важным для корректной оценки напряженного состояния модельного разлома.

Список литературы

1. *Макаров П.В*. Эволюционная природа деструкции твердых тел и сред // Физическая мезомеханика. 2007. Т.10 №3. С.23–38.

2. *Остапчук А.А., Кочарян Г.Г., Морозова К.Г., Павлов Д.В., Гридин Г.А.* Особенности формирования динамического сдвига в тонком слое гранулированного материала // Физика Земли. 2021. № 5. С. 91–103.

3. *Brace W.F., Byerlee J.D.* Stick-slip as a mechanism for earthquakes // Science. 1966. №153. P. 990–992.

4. *Cates M.E., Wittmer J.P., Bouchaud J.P., Claudin P.J*. Force Chains, and Fragile Matter // Phys. Rev. Lett. 1998. Vol.81, no. 9. P. 1841–1844.

5. *Gao K., Guyer R., Rougier E.*, *Ren C., Johnson P.A.* From Stress Chains to Acoustic Emission // Phys. Rev. Lett. 2019. 123(4) 048003.

6. *Jaeger H.M., Nagel S.R., Behringer R.P.* Granular solids, liquids, and gases // Rev. Mod. Phys. 1996. № 68. P. 1259–1273.

7. *Johnson P. A., Ferdowsi B., Kaproth B.M. [et al.]* Acoustic emission and microslip precursors to stick-slip failure in sheared granular material // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40. P. 1–5.

8. *Ikari M. J., Maron C., Saffer D.M., Kopf A.J.* Slip weakening as a mechanism for slow earthquakes // Nature Geosci. 2013. Vol. 6. P. 468–472.

9. *Ostapchuk A.A., Pavlov D.V., Markov V.K., Krasheninnikov A.V.* Study of acoustic emission signals during fracture shear deformation // Acoust. Phys. 2016. Vol. 62. P. 505–513.

10. *Ren J., Dijksman J.A., Behringer R.P.* Reynolds Pressure and Relaxation in a Sheared Granular System // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 110(018302).

11. *Scholz C.H.* Earthquakes and friction laws // Nature. 1998. №391.P. 37–42.

УДК 550.34

ПРОТОТИП СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ФАКТИЧЕСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ ПЕТРОПАВЛОВСКА-КАМЧАТСКОГО ПО ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Чебров Д.В., Дрознин Д.В., Матвеенко Д.В., Митюшкина С.В., Раевская А.А.

Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, Россия, danila@emsd.ru

Введение

Системы оперативного оповещения о сейсмических событиях функционируют во всех развитых странах мира и особенную важность они имеют для сейсмоактивных регионов. Информация о параметрах очага землетрясения оперативно используется при планировании работ по ликвидации ЧС. В случае сильного землетрясения особую важность приобретает информация об интенсивности колебаний грунта на территории, попавшей под удар стихии. Наличие таких данных позволяет сравнительно просто превратить систему оповещения в систему прогнозирования последствий землетрясений. Такая система, в свою очередь, позволяет спланировать спасательные работы при разрушительных землетрясениях. В этом случае максимально детальные данные экономят время, следовательно повышают шансы на спасение людей, оказавшихся под завалами. В случае умеренных землетрясений позволяют сэкономить трудовые и материальные затраты служб на обследование зданий и сооружений за счет детальной картины сейсмических воздействий. Классическая Служба срочных сейсмических донесений обеспечивает информацию лишь об основных параметрах землетрясения, которые требуют дополнительной интерпретации.

В целом, задача восстановления поля сотрясений по координатам и магнитуде землетрясения представляется тривиальной. Самое ее простое решение – это использование простейшего уравнения макросейсмического поля в представлении точечного источника [5]. Эта технология хорошо работает для умеренных и удаленных землетрясений. В случае сильного землетрясения такой подход не будет давать состоятельных оценок, особенно в ближней зоне. Дальнейшее усложнение модели сейсмического эффекта идет по пути учета геометрических размеров очага и введения более сложных моделей затухания сейсмических волн. Дополнительно в целях стабилизации решения в обработку вовлекаются инструментальные данные о движении грунта. Этот подход довольно хорошо работает в случае регулярной сети приборов [6, 7].

Тем не менее, поле сотрясений, восстановленное по основным параметрам землетрясения, даже в случае комбинированного решения может содержать существенные неточности. Возможные невязки модельного поля по сравнению с наблюдаемым будут нарастать с увеличением магнитуды землетрясения. Особенно ярко этот эффект будет проявляться в случае оперативной оценки в режиме, близком к реальному времени. Одна из очевидных причин этого – возможность нецентрального положения инструментального гипоцентра относительно очаговой зоны.

Ранее в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН был создан специальный автоматизированный сервис, позволяющий проводить оценку инструментальной сейсмической интенсивности по данным станций сильных движений в режиме близком к реальному времени и наглядно представлять полученные результаты [2]. За время использования технология показала свою высокую информативность и активно применяется в рамках Службы Срочных Донесений и Службы Предупреждения о Цунами в Камчатском и Сахалинском филиалах ФИЦ ЕГС РАН для оперативного оповещения заинтересованных ведомств об интенсивности сотрясений в районах пунктов наблюдений. Действующая в данный момент версия сервиса уже показала высокую информативность и практическую применимость для специальных подразделений МЧС. Кроме того, оперативное оповещение улучшило координацию действий подразделений КФ ФИЦ ЕГС РАН, а результаты работы данной системы используются в ряде фундаментальных исследований.

Предполагалось, что дальнейшее развитие сервиса связано с созданием более плотных сетей приборов сильных движений, и переводом процессов принятия решений и рассылки сообщений на автоматический режим. В данной работе сделаны некоторые дальнейшие шаги в направлении создания полноценной системы оперативного прогнозирования и оценки последствий землетрясений, учитывающей состояние зданий и грунтовых условий. Система доведена до стадии прототипа, в качестве тестового полигона были выбраны несколько микрорайонов в западной части

Петропавловска-Камчатского, застроенные в основном типовыми многоквартирными домами. Этот проект получил название «Эносихтон».

Методика восстановления поля сотрясений на высоком уровне детальности

При решении задачи оценки сейсмического эффекта в терминах конкретных потерь (человеческих жертв или материальных потерь) следует учитывать влияние грунтовых условий. Аналитическое моделирование поля сотрясений, по умолчанию, производится для среднего грунта, в то время как сейсмические станции и сооружения зачастую располагаются на грунтах всех категорий. Сложный рельеф Петропавловска-Камчатского, активная геодинамическая обстановка и мощные вулканические отложения обеспечивают крайне гетерогенную картину инженерно-геологических условий города, а следовательно, поправок к сейсмическому эффекту. Поэтому, если задача восстановления поля сотрясений решается эмпирическим и полуэмпирическим методом (с привлечением инструментальных данных о движениях грунта), то необходимо обеспечить однородность данных. Этим можно пренебречь в случае сверхплотной сети станций сильных движений. Например, если станция располагается в подвале здания, то оценку сейсмических воздействий на него можно получить непосредственно из записей этой станции. Если же апертура сети заведомо больше неоднородностей карты микрорайонирования, то однородности исходных данных следует уделить особое внимание.

Обычно данные всех станций приводятся к выбранным грунтовым условиям путем введения поправок. Данные поправки могут быть получены, например, согласно категории грунта. Более точные оценки – это эмпирические поправки, полученные в виде среднего приращения амплитуды относительно некоторой «эталонной» станции. Соответствующие приращения амплитуды переводятся в приращения балльности.

Заметим, что в зависимости от задачи, в качестве эталонной выбирается либо станция, установленная на скальном грунте (на коренных породах), либо станция, установленная в условиях, которые конвенциально признаны «средним» грунтом. Эталонной «скальной» станцией в районе Петропавловска-Камчатского считается станция «Петропавловск» (PET), а в качестве «станции среднего грунта» выступает станция «Дачная» (DCH). Мы будем следовать традиции, которая в задачах связанных с инженерными изысканиями и сейсмическим районированием опирается на средний грунт.

Благодаря тому, что сеть акселерометров на территории Петропавловска-Камчатского начала развиваться в 2006 г. и в основном приняла свой современный облик к 2014 г., в ходе многочисленных научно-исследовательских работ были получены инструментальные поправки практически для всех станций сильных движений Петропавловского куста. Эти данные оказались распределены в разнообразных научных отчетах КФ ФИЦ ЕГС РАН за 2007–2016 года, и в основном были получены сотрудниками КФ ФИЦ ЕГС РАН А. А. Гусевым и Ю. В. Шевченко по ограниченному набору данных. В случае если для станции отсутствовали рассчитанные поправки, использовалась поправка на категорию грунта по данным сейсмического микрорайнирования Петропавловска-Камчатского [3].

Далее инструментальные данные, приведенные к среднему грунту, интерполировались на более подробную сетку. Поскольку территория Петропавловска-Камчатского и его ближайшие окрестности приемлемо обеспечены станциями сильных движений, и апертура сети здесь составляет первые километры, вполне правомерно использовать чисто эмпирическую схему интерполяции макросейсмического поля (по инструментальным данным), исходя из физически обоснованного предположения гладкости функции площадного распределения интенсивности сотрясений. Имеющиеся условия обеспечивают сходный и правдоподобный результат практически для любой схемы интерполяции – по ближайшей станции, по ближайшем трем, метод ядерного сглаживания и т. д.

Чтобы для каждого узла детальной сетки получить реальные сейсмические воздействия, требовалось введение обратной поправки – то есть интенсивность сотрясений, приведенную к среднему грунту, следовало привести к реальному грунту. Данные для введения обратной поправки были использованы также из работы [3].

Подходы к оценке последствий землетрясения

Описанная выше схема интерполяции позволяет получить сколь угодно детальное поле сейсмических воздействий. В том числе, элементарно решается задача восстановления этого поля на нерегулярной сетке, соответствующей координатам зданий и сооружений. Казалось бы, этот продукт

должен быть окончательным для сейсмического агентства, и вопросы оценки потерь, вызванных рассчитанным сейсмическим эффектом должны решаться иными ведомствами. Тем не менее, было принято решение приблизить полученный продукт к прототипу системы оперативной оценки последствий землетрясения, которую можно было бы использовать в подсистеме поддержки принятия решений при ликвидации ЧС.

С этой целью была составлена база данных жилых домов нескольких компактно расположенных микрорайонов в западной части Петропавловска-Камчатского. База данных содержит следующие необходимые сведения о зданиях: адрес, координаты, серия, проектная сейсмостойкость, категория грунта и соответствующее приращение балльности и т.д. (рис. 1). Всего в базу данных вошли сведения о 221 строении.

Поскольку для каждого строения имеется оценка сейсмостойкости, можно достаточно просто оценить повреждение здания в случае землетрясения. Например, если реальные сотрясения превышают проектную сейсмостойкость, то на основе шкалы сейсмической интенсивности ШСИ-17 можно каждому зданию приписать степень повреждения и, соответственно оценить ущерб и количество жертв.

1	N	street			latitude	longitude	year_co	numb	number_entrances	number_buildings	number_living_qua	type_construction	basic_project	appointment	seismic_resista	seismic_resis	seismic_resis	zone_SMZ_min	zone_SMZ_max	zone_SMZ_increme
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3	1	Абеля	4		53.068921	158.600465	1969	5			90	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	10.0	10.0	1.0
4	2	Абеля	8	2	53.066237	158.596018												9.0	9.0	0.0
5	3	Абеля	10	1	53.065761	158.600824												9.0	9.0	0.0
6	4	Абеля	10		53.065301	158.600699	1979	5	4		60	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
7	5	Абеля	12		53.065176	158.600043	1984	5	2		25	панельный	1-138	многоквартирный дом	9	9	9.0	9.0	9.0	0.0
8	6	Абеля	14		53.064830	158.600303	1981	5	4		60	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
9	7	Абеля	8		53.065842	158.599639	1977	5	8		119	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
10	8	Абеля	7		53.067806	158.602576	1975	5	8		116	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
11	9	Абеля	17		53.066475	158.602253	1975	5	8		119	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
12	10	Абеля	13		53.067200	158.603268	1975	5	4		60	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
13	11	Абеля	19		53.066226	158.603043	1976	5	4		60	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
14	12	Абеля	21		53.065863	158.602989	1975	5	4		60	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
15	13	Абеля	25		53.065479	158.603070		5	4			панельный		многоквартирный дом				9.0	9.0	0.0
16	14	Абеля	27		53.065138	158.602917		5	4			панельный		многоквартирный дом				9.0	9.0	0.0
17	15	Абеля	31		53.064733	158.602944	1981	5	4		30	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
18	16	Абеля	39		53.063915	158.603546	1976	5	4		90	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	7	7.0	9.0	9.0	0.0
19	17	Абеля	41		53.063401	158.603627												9.0	9.0	0.0
20	18	Абеля	29		53.065036	158.602073	1981	5	2	2	30	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
21	19	Абеля	33		53.064592	158.602280	1977	5	2	2	30	панельный	434-АС	многоквартирный дом				9.0	9.0	0.0
22	20	Абеля	11		53.066919	158.604813			3			каркасно-панельный		школа-детский сад № 52				9.0	9.0	0.0
23	21	Абеля	8	1	53.066042	158.597626	1977	5	8		119	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
24	22	Абеля	15		53.066837	158.603160	1980	5	4		60	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
25	23	Абеля	35		53.064294	158.603268		5	4			панельный		многоквартирный дом				9.0	9.0	0.0
26	24	Абеля	37		53.064154	158.602567	1981	5	2	2	30	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом	7	8	7.5	9.0	9.0	0.0
27	25	Абеля	6		53.067687	158.598785								пищекомбинат				9.0	10.0	0.5
28	26	Арсеньева	21		53.066150	158.589236												9.0	9.0	0.0
29	27	Арсеньева	23		53.065918	158.588913												9.0	9.0	0.0
30	28	Арсеньева	45		53.062012	158.585625		5	2			крупноблочный		многоквартирный дом				9.0	10.0	0.5
31	29	Арсеньева	35		53.063580	158.586101	1986	5	6		79	панельный	1-138с	многоквартирный дом	9	9	9.0	10.0	10.0	1.0
32	30	Арсеньева	37		53.062703	158.586523	1987	5	6		79	панельный	1-138с	многоквартирный дом				10.0	10.0	1.0
33	31	Арсеньева	39		53.061913	158.586784	1995	5	2		40	крупноблочный	1-138с*	многоквартирный дом	9	9	9.0	9.0	10.0	0.5
34	32	бульвар Пийпа	1		53.068861	158.609134	1974	5	4		60	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом				9.0	9.0	0.0
35	33	бульвар Пийпа	3		53.068093	158.608954	1976	5	4		60	панельный	1-464-АС	многоквартирный дом				9.0	9.0	0.0
36	34	бульвар Пийпа	2		53.069050	158.607445		4	3			крупноблочный		многоквартирный дом				9.0	9.0	0.0
37	35	бульвар Пийпа	4		53.068775	158.606879	1973	4	4			крупноблочный		многоквартирный дом				9.0	9.0	0.0
38	36	бульвар Пийпа	6		53.068147	158.607238	1969	4	3			крупноблочный		многоквартирный дом				9.0	9.0	0.0
39	37	бульвар Пийпа	8		53.068298	158.606250	1987	5	4		51	панельный	1-138с	многоквартирный дом	9	9	9.0	9.0	9.0	0.0
40	38	бульвар Пийпа	10		53.067795	158.605514	1989	5	4		104	панельный	1-138с	многоквартирный дом	9	9	9.0	9.0	9.0	0.0

Рис. 1. Фрагмент выгрузки из базы данных, содержащей сведения о строениях

Обсуждение результатов

Тестирование системы проводилось как на отложенных данных (рис. 2), так и в реальном времени (рис. 3). На соответствующих рисунках видна неоднородность картины воздействий, которая определяется грунтовыми условиями. В общем, паттерны распределения схожи. Этот результат ожидаем, поскольку тестовый полигон имеет характерный размер около 2 км. На данном этапе пока не проведены сопоставления с макросейсмическими данными, полученными путем опроса. Но очевидно, что данный проект, даже если не будет востребован в РСЧС, выведет на новый уровень методику и практику проведения макросейсмических опросов и анализа их данных.

Поскольку система тестировалась пока только на умеренных сотрясениях в Петропавловске-Камчатском, мы не представили здесь карты степеней повреждения. Для проверки этого сегмента системы будут проведены синтетические тесты.

Нетрудно видеть, что представленные здесь наработки, могут использоваться в смежных задачах. В частности, при изучении последствий сценарных землетрясений [1].

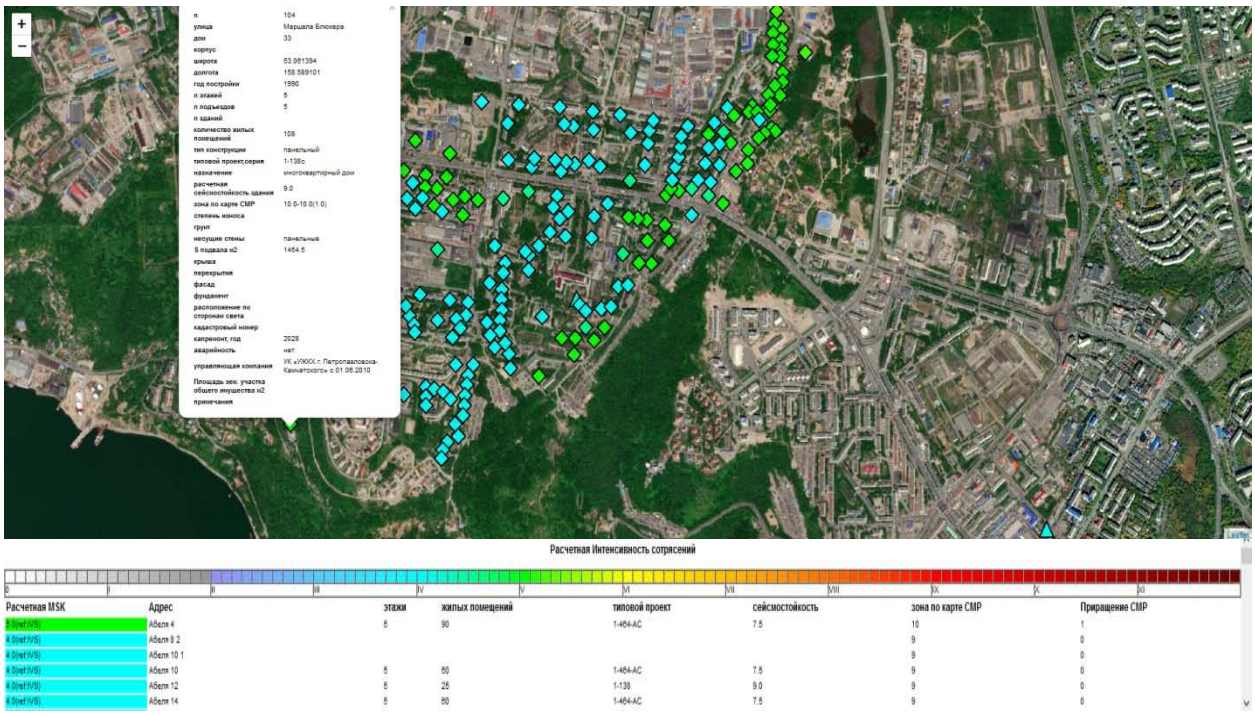


Рис. 2. Оценка реальных сейсмических воздействий на здания и сооружения Петропавловска-Камчатского во время Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. с магнитудой $M_W = 8.3$

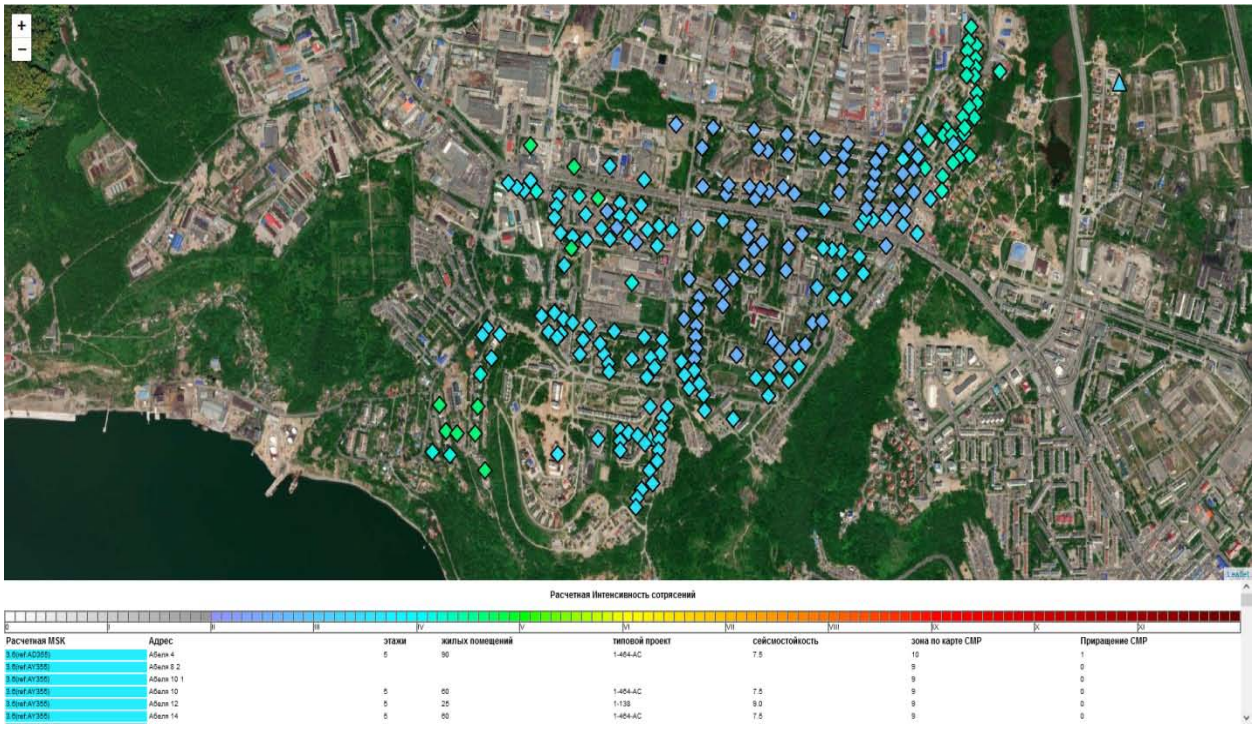


Рис. 3. Оценка реальных сейсмических воздействий на здания и сооружения Петропавловска-Камчатского во время землетрясения 26 июля 2021 г. с магнитудой ML = 5.3

Заключение

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН поддерживает работу более чем 20 пунктов наблюдений на территории и в ближайших окрестностях Петропавловска-Камчатского [4]. На основе получаемых данных ранее разработан автоматизированный сервис, позволяющий производить оценку инструментальной сейсмической интенсивности по данным станций сильных движений в режиме близком к реальному времени. В работе представлены результаты дальнейшего развития данной

системы, которая на настоящем этапе достигла стадии прототипа системы оперативной оценки последствий землетрясения.

Наиболее точные управленческие решения в случае ликвидации чрезвычайной ситуации вследствие землетрясения можно принять при наличии данных о степени разрушений, полученных каждым зданием в городе. Такую информацию невозможно получить простой интерполяцией данных сети станций сильных движений. Застройка города отличается довольно сильной неоднородностью в части проектной и фактической сейсмостойкости. Кроме того, картина усложняется за счет разнообразных грунтовых условий. Новая система мониторинга фактических сейсмических воздействий преодолевает эти недостатки.

На данном этапе реализована полная технологическая цепочка обработки данных, включая обращения к базе данных зданий и сооружений, учет грунтовых условий и расчет условной степени повреждения здания. Работоспособность системы проверена как в реальном времени, так и в виде эмуляции на архивных данных.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21 и целевой программы «Развитие») с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Гусев А.А., Шумилина Л.С., Акатова К.Н.* Об оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского на основе набора сценарных землетрясений // Электрон. науч.-информ. журнал "Вестник ОГГГГН РАН". М.: ОИФЗ РАН, 2005. №1 (23). URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2005/screp-2.pdf.

2. *Дрознин Д.В., Чебров Д.В., Дрознина С.Я., Ототюк Д.А.* Автоматизированная оценка интенсивности сейсмических сотрясений по инструментальным данным в режиме квазиреального времени и ее использование в рамках Службы срочных сейсмических донесений на Камчатке // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53. № 3. С. 5–19. DOI: 10.21455/si2017.3-1.

3. *Константинова Т.Г.* Поведение грунтов и зданий при сильных землетрясениях [Электронный ресурс]: Монография. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. 188 с., рис. 140, табл.12. Библиограф. С. 183–186.

4. *Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2013. №1. С. 18–40.

5. *Шебалин Н.В.* Об оценке сейсмической интенсивности / Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. Москва: Наука, 1975. С. 87–109.

6. *Wald D., Quitoriano V., Heaton T., Kanamori H., Scrivner C., Worden C.* TriNet “ShakeMaps”: Rapid generation of peak ground motion and intensity maps for earthquakes in Southern California // Earthquake Spectra. 1999. V. 15. N 3. P. 537–555.

7. *Worden C.B., Wald D.J., Allen T.I., Lin K., Garcia D., Cua G.* A Revised Ground-Motion and Intensity Interpolation Scheme for ShakeMap // Bull. Seism. Soc. Am. 2010. V. 100. N 6. P. 3083–3096.

Технические и программные средства геофизического мониторинга

УДК 550.34

НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА АКТИВНОГО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Ковалевский В.В.

Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, Новосибирск, ludmila@opg.sscc.ru

Введение

Активная сейсмология — направление в геофизике, в котором для изучения строения земной коры и исследования геодинамических процессов в зонах землетрясений и вулканов используются управляемые источники сейсмических волн — взрывные, гидромеханические и электромагнитные импульсные источники, мощные сейсмические вибраторы [1]. Возможность изучения глубинных исследований недр Земли с помощью мощных вибрационных источников была теоретически обоснована и практически реализована в 1970-х–80-х годах. Вибросейсмические методы исследований имеют важные преимущества по сравнению с методами пассивной сейсмологии: точно известное место и время действия источника, излучение сейсмического импульса заранее заданной формы, управление экспериментом на компьютерной основе, повсеместность применения и экологическая безопасность. Вибросейсмические исследования являются наукоемкой деятельностью, в которую входят:

- разработка аппаратных средств и программно-математического обеспечения управления техническими комплексами излучения и регистрации вибрационных сигналов;
- разработка теоретических основ метода, в том числе обратные задачи теории распространения упругих волн, прямые задачи моделирования волновых сейсмических процессов, разработка теории многодисциплинарного вибросейсмического мониторинга и др.;
- экспериментальные полевые исследования по регистрации волнового поля от мощных источников на значительных, несколько сотен километров, удалениях;
- разработка алгоритмов и программ для обработки экспериментальных данных;
- численное моделирование полных волновых полей в сложнопостроенной среде с применением суперкомпьютеров;
- разработка инженерно-сейсмологических технологий исследования зданий и крупных промышленных сооружений;

Академиками СО РАН Алексеевым А.С. [5], Гольдиным С В. [3] была предложена концепция подхода к решению проблем прогноза землетрясений и организации многодисциплинарного мониторинга сейсмоопасных регионов с применением вибросейсмических технологий. Данная концепция основывается на комплексировании различных видов информации, полученной в результате многолетних геофизических экспериментальных работ, охватывающих значительные площади либо длинные профили наблюдений. В концепции мониторинговых наблюдений упор делается на поиск комплексов многодисциплинарных предвестников, что подразумевает создание пунктов наблюдения с целью выявления и отслеживания ряда физических параметров литосферы и подземной гидросферы. Изменение вариаций характеристик сейсмического волнового поля предполагается отслеживать в результате просвечивания очаговых зон 100-тонным сейсмическим вибратором.

Уникальный по мощности вибрационный источник, позволяющий получать сейсмограммы высокого качества на удалениях до 400 км, смонтирован на берегу Байкала, вблизи поселка Бабушкин. Географическое положение вибратора и сети сейсмологических станций позволяет исследовать как минимум три очаговые зоны, представляющие опасность для таких городов, как Улан-Удэ, Иркутск, Ангарск. Вибратор обладает прецизионной точностью и стабильностью по частоте, фазе и амплитуде излучения от сеанса к сеансу. Большая мощность источника позволяет в качестве приемников колебаний использовать сеть цифровых сейсмологических станций, размещенных вокруг южной части озера Байкал. Корреляционной обработкой из цифровых записей на уровне шумов во время работы накапливаются сейсмограммы, аналогичные действию взрыва или землетрясения. Теоретически обосновано, что высокая стабильность систем излучения и регистрации

позволяет фиксировать изменения внутри выявленных очаговых зон: скорости пробега волн, изменения частот, фаз колебаний и т.д.

Кроме регистрации зондирующих сигналов 100-тонного сейсмического вибратора сетью сейсмостанций, проведены многочисленные эксперименты по вибросейсмическому мониторингу с использованием профильных и площадных систем наблюдения.

В сети Интернет представлен большой объем знаний и информационных ресурсов по различным видам геофизического мониторинга, в том числе и касающихся вибросейсмических методов. Однако доступ к этим ресурсам значительно ограничен из-за того, что они слабо структурированы, недостаточно систематизированы и к тому же рассредоточены по всевозможным интернет-сайтам, библиотекам и архивам. Авторы статьи считают, что организация эффективного доступа к экспериментальным данным, полученным в ходе вибросейсмического мониторинга, их вычислительному анализу, а также к результатам численного моделирования вибросейсмического волнового поля значительно повысит эффективность работы ученых, использующих результаты исследований активной сейсмологии для интерпретации данных, полученных в других областях геофизики. Не менее важным является систематизация и интеграция информационных ресурсов, отражающих методы и результаты всех методов геофизического мониторинга сейсмоактивных зон.

При множестве неоднородных источников данных встает задача организации инфраструктуры, позволяющей не просто накапливать информацию для ее повторного использования в различных исследованиях, но и способной систематизировать знания и данные предметной области, обеспечивать содержательный доступ и предварительный анализ данных. В данной работе предложен подход к организации научной инфраструктуры, для хранения, представления, формализации и систематизации информации, а также для обеспечения высокой скорости доступа и анализа числовых данных. Предлагаемая авторами инфраструктура построена путем комбинирования онтологии предметной области для интеграции разнородных информационных ресурсов без их физического слияния и реляционной базы данных, которая обеспечивают эффективное хранение и обработку структурированных данных.

Принципы интеграции знаний и данных

На сегодняшний день нет строгого определения данных, метаданных, информации и знаний. В представленной концепции научной информационной системы данными мы считаем записи сигналов, полученных в ходе полевых и вычислительных экспериментов и представленные файлами, составляющими дерево каталогов. Метаданные — описание экспериментов (тип сейсмического источника, параметры излучаемого им сигнала, параметры регистратора, географические координаты источника и регистратора и т.д.), представленное реляционными базами данных. При этом следует сказать, что описание данных сводится к некоторому ограниченному набору параметров. В нашем случае, это 18 параметров: Тип источника, Номер источника, Номер эксперимента и т.п. Реляционная система управления базой данных обеспечивает высокую производительность выполнения запроса на доступ и анализ экспериментальных данных [2].

К информационным объектам мы относим отдельные сайты, публикации, справочную информацию и т.д., размещенные в сети Интернет.

К знаниям о предметной области мы относим совокупность сведений об объектах этой предметной области, их существенных свойствах и связывающих их отношениях. В настоящее время стало распространенной практикой описывать предметные области с помощью онтологических моделей. Основная цель создания онтологий заключается в обеспечении поддержки деятельности по накоплению, совместному и повторному использованию знаний. Впервые термин «онтология» в инженерию знаний ввел Томас Грубер [6]. Согласно его определению, онтология является явной спецификацией концептуализации. Под концептуализацией здесь понимается упрощенное описание некоторой части реальности, построенное для какой-либо определенной цели. На формальном уровне, онтология представляет собой систему, состоящую из набора понятий и набора утверждений об этих понятиях, на основе которых можно понятия объединять в классы и строить между ними отношения.

Онтологии используются при разработке систем основанных на знаниях. Для интеграции знаний и данных по активному сейсмологическому мониторингу нами был построен Портал знаний в технологии, разработанной в лаборатории искусственного интеллекта ИСИ СО РАН [4].

В структуру технологии построения порталов знаний входят редакторы данных, онтологий и отношений. С помощью редактора онтологий создается формальная спецификация онтологии, включающая: иерархии понятий; множество заданных на понятиях отношений; множество

атрибутов, описывающих свойства понятий и отношений; множество ограничений и аксиом, описывающих свойства классов и отношений.

Вводя формальные описания понятий в виде классов объектов и отношений между ними, онтология портала задает структуры для представления реальных данных и связей между ними. Информационный объект Портала представляют собой формализованное описание некоторого объекта предметной области. Вся информация о конкретном объекте и его связях отображается на странице Портала.

Свойства объекта

Рифтовые зоны	
Название объекта	Байкальская рифтовая зона (БРЗ)
Описание объекта	Общее описание http://www.geologam.ru/geology/earth/chto-takoe-baykalskiy-rift

Связи объекта

включаетОбъект
ОбъектИсследования
Разломы

имеет Аспект
ПредметИсследования
Вариации параметров вибросейсмического поля
Вариации параметров поля эманации радона
Сейсмическая активность
Фиксирование разломов

Обратные связи объекта

описываетОбъект
Публикация
H. Thybo (Lower crustal intrusions beneath the southern Baikal Rift Zone: Evidence from full-waveform modelling of wide-angle seismic data)
Бобров (А.А.) (RADON EMANATION FIELD AND EARTHQUAKES IN BAIKAL REGION: FIRST EXPERIENCE IN INFORMATION ENTROPY APPLICAT
Соловьев (В.М.) (SPECIFIC VELOCITY STRUCTURE OF THE UPPER MANTLE IN THE TRANSBAIKALIA SEGMENT OF THE MONGOLIA-OKHOTSK OROG
Бобров (А.А.), Семинский (К.Ж.) (THE FIRST RESULTS OF STUDIES OF TEMPORARY VARIATIONS IN SOILRADON ACTIVITY OF FAULTS IN WEST
Караваев (Д.А.), Ковалевский (В.В.), Фатьянов (А.Г.) (ВЕРИФИКАЦИЯ СКОРОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА, П PASSCAL)
(Всего: 13)

применяетсяККлассуОбъектов
Методы и средства исследования
Геолого-геофизические методы

применяетсяКОбъекту
Методы и средства исследования
Вибропросвечивание
Мониторинг радоновой активности

является Результатом
НаучныйРезультат_Продукт
111 Эксперимент «Профиль Байкал-Улан-Батор»
111- данные эксперимента №111(визуализация, анализ)
Анализ результатов инструментальных наблюдений радоновой активности. Корреляция вариаций параметров поля эманации радона со сла
Волновое поле профиля Улан-Удэ-Улан-Батор
Корреляция землетрясений БРЗ с вариациями параметров эманации радона
(Всего: 7)

являетсяРесурсомОбъекта
ИнтернетРесурс
Активные разломы и сейсмичностьюга Восточной Сибири (содержит карты разломов)
Батиметрические карты озера Байкал
Информационно-аналитическая среда для поддержки научных исследований в геологии
Информационно-вычислительная система «Вибросейсмическое просвечивание Земли»
Сайт Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Каталог землетрясений

Рис.1. Страница Портала

На рис. 1 представлена с страница Портала, содержащая описание объекта «Байкальская рифтовая зона (БРЗ)», относящегося к подклассу «Рифты» класса «Объекты исследований». Все объекты, связанные с «БРЗ», представляются на его странице в виде гиперссылок, по которым можно перейти к их детальному описанию. По ссылке «Информационно-вычислительная система

«Вибрационное просвечивание Земли» пользователи получают доступ к экспериментальным данным по вибропросвечиванию и средствам их вычислительного анализа. На рис.2 приведен пример пользовательского запроса к и результат выполнения.

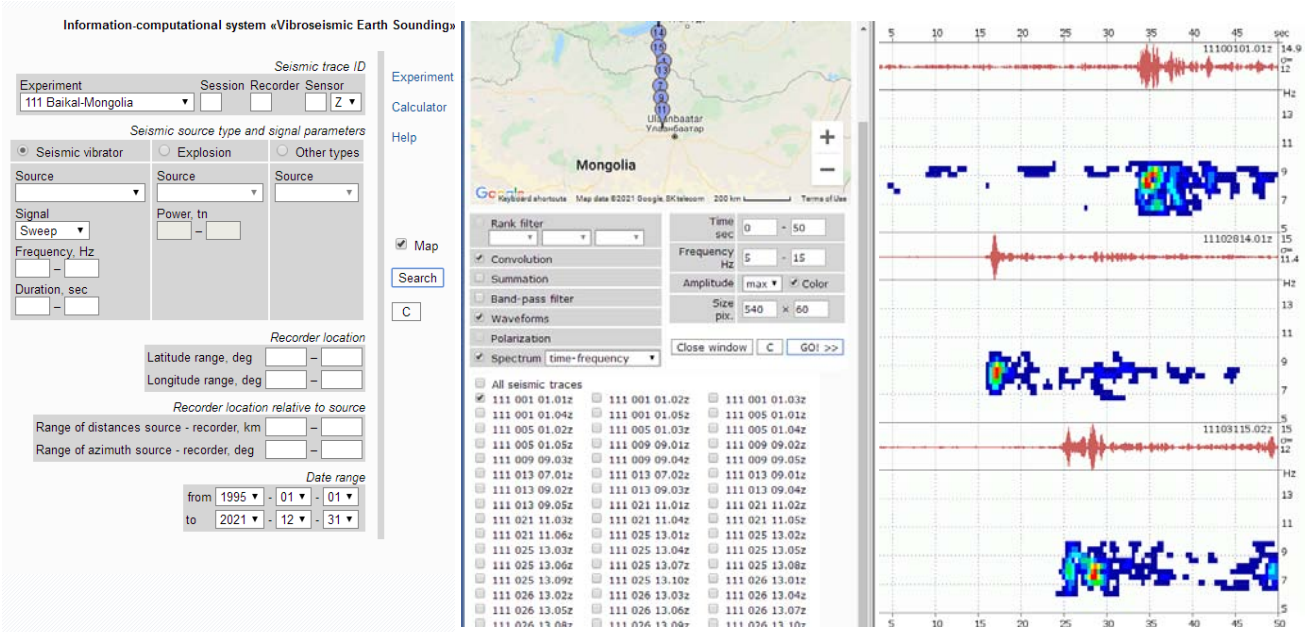


Рис.2. Страница пользовательского запроса к ИВС «Вибрационное просвечивание Земли» и результат выполнения.

Заключение

Разработанная научная система по активному сейсмологическому мониторингу обеспечивает интеграцию тематических информационных ресурсов и содержательный доступ к результатам полевых и вычислительных экспериментов по активному вибросейсмическому мониторингу, интерактивный анализ данных, автоматическое построение интерактивных карт районов полевых работ. Взаимосвязь между деятельностью исследователей, результатами этой деятельности, персонами и организациями, осуществляющими исследования в области активной сейсмологии, обеспечивает Портал знаний, ядром которого является онтология, построенная группой экспертов, работающих в различных направлениях активной сейсмологии. На основе онтологии организуется удобная навигация по научным знаниям, а также содержательный поиск данных и средств их анализа. Интернет-ресурс доступен по адресу http://opg.sscc.ru/.

Список литературы

1. *Алексеев А.С., Геза Н.И., Глинский Б.М. и др.* Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск: Филиал «Гео» Издательства СО РАН. 2004. 387 с.

2. *Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Ковалевский В.В.* Научная информационная система «Активная сейсмология» для комплексных геофизических исследований // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2015. № 1. Выпуск № 25. С. 94–98.

3. *Гольдин С.В.* Принципы мониторинга сейсмоактивных областей. // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли: материалы 2-го международного симпозиума 12-16 сент. 2005г. Академгородок, Новосибирск. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2005. С.9–11.

4. *Загорулько Ю.А., Боровикова О.И.* Информационная модель портала научных знаний // Информационные технологии. 2009. № 12. С.2–7.

5. *Alekseev, A.S., Chichinin, I.S., Korneev, V.A.,* 2005. Powerful low-frequency vibrators for active seismology. Bulletin of the Seismological Society of America 95. 1–17.

6. *Gruber T.* Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing // International Journal of Human–Computer Studies. November.1995. Vol. 43. Issues 5–6. P. 907–928.

УДК 550.34

КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР АЛГОРИТМОВ, МЕТОДОВ И СПОСОБОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ УПОРЯДОЧЕННОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ ТОЧЕЧНЫХ МНОЖЕСТВ ЛОКАЛЬНОЙ И РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

Делемень И.Ф.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, delemen@kscnet.ru

Введение

Изучение пространственной упорядоченности точечных множеств (т.е. множеств, элементами которых являются точки) на прямой, плоскости, или каком-либо пространстве, играет важную роль в выявлении локальной и региональной сейсмичности. Интерес исследователей к этой проблеме возрос во втором десятилетии нового столетия. Публикуются все новые и новые результаты исследований такой проблематики. Об этом можно судить по резко возросшему количеству научных статей и монографий. Разрабатываются новые способы, методы и технологии; ищутся иные пути прикладного использования теоретических разработок, основанных на прикладной (в том числе компьютерной) реализации авторских гипотез, концепций и теорий. Стала очевидной необходимость использования пространственной, временной или пространственно-временной упорядоченности точечных множеств в различных отраслях наук о Земле, особенно при решении различных задач сейсмологии и вулканологии. Следует отметить, что длительное время занимаясь исследованиями в области изучения и развития методологии решения некоторых задач сейсмогеологии и вулканологии, автор столкнулся с тем, что практически полностью отсутствуют исследования методологии работ по выявлению степени пространственно-временной упорядоченности точечных множеств локальной и региональной сейсмичности. Мало работ по анализу интерпретаций сейсмологической, геологической и вулканологической интерпретации точечных множеств. В нашем докладе представлена попытка восполнить этот пробел на основе анализа некоторых наиболее востребованных технологий выявления их и последующей их интерпретации на примере пространственного анализа некоторых из таких множеств.

Использованные автором методологические подходы к исследованию

Как известно, методология, занимающаяся изучением способов и стратегий научного исследования, имеет три направления. Философское направление, ориентированное на гносеологию, учение о путях получения научного знании, в рамках данного доклада нас не интересует. Состояние изученности рассматриваемой проблемы анализируется на основе историко-методологической концепции «потока идей в науке». Для создания и анализа личных баз знаний и данных по изучаемой тематике использовались методы сравнения, аналогии, концептуального анализа и другие подходы исторического источниковедения. В целом же методической базой подготовки данного доклада являются положения и принципы прикладной методологии, в данном случае – методологии наук о Земле.

В частности, описывая роль наблюдений в науках о Земле, И.В. Назаров не случайно еще в начале 80-х годов прошлого века отмечал, что в сейсмологии с возрастанием роли инструментальных наблюдений, будет возрастать роль наблюдений геологических [14]. Нередко пренебрежение этим методологическим требованием приводит к ошибкам и необоснованным выводам при интерпретациях результатов инструментальных сейсмологических исследований. По этим причинам в докладе основное внимание автора обращено именно эти аспекты выявления и интерпретации упорядоченности точечных множеств локальной и региональной сейсмичности.

Формат сообщения не позволяет привести полный перечень исследований по теме доклада. Ссылки на публикации, перечисленные в списке литературы, даны в тексте в квадратных скобках, все остальные литературные ссылки на авторов и год публикации, даются ниже в круглых скобках.

Краткий обзор состояния изученности проблемы

Решение многих задач в науках о Земле в том числе в сейсмологии и вулканологии, во многом обусловлено учетом упорядоченности объектов. При этом в науках геолого-геофизического цикла на проявления порядка – беспорядка в структурообразовании, мало обращается внимания, хотя в природе именно с этими категориями связывается переход от хаоса к организованным

структурам [16]. Чаще эта проблема заменяется рассмотрением более частных особенностей пространственной организации систем и их элементов – доменной структуре, кластеризации или группированию элементов. Такой подход нашёл отражение даже в наименованиях программ. Важным фактором упорядоченности среды является ее иерархичность. Следует иметь в виду, что определиться с выбором иерархического уровня изучаемой системы исследователю проще при постановке прямой задачи, тогда как при решении обратных задач, даже при анализе точечных множеств, возникает много проблем и методологического порядка, и даже в поиске и отборе априорной информации.

Возможно, поэтому вопросы индикации, т.е. выявления линий (в двумерной постановке, или планальных элементов в трехмерной) на множестве точек, не вызывает особых проблем. Сложнее обстоит дело с идентификацией выявленных элементов, т.е. соотнесением их с тем или иным типом геологических дизъюнктивов, магматических тел или иных геологических структур и объектов.

В частности, заметно, что программное обеспечение, использующее анализ точек максимальной кривизны границ раздела в нефтяной сейсморазведке, как правило ориентировано на диагностику конкретного геологического типа выявленных линейных и планальных групп точек, а то и их идентификацию, - определение их генетической принадлежности. Это, в отличие от существующего программного обеспечения выявления разломов, магматических даек и прочих объектов на основании анализа пространственной упорядоченности эпицентров или гипоцентров землетрясений, обусловлено коммерческой направленность таких работ. Ошибка в диагностике или идентификации типа выявленного разлома, может обойтись слишком дорого, вплоть до банкротства фирмы. В сейсмологии же и вулканологии ошибочное выявление или пропуск цели (невыявление) разлома не имеет для исследователя таких последствий, разве что кроме некоторой потери научной репутации. Впрочем, большинство таких программ ориентированы на индикацию линейных или планальных структур, уделяя вовлечению априорной информации для их диагностики и идентификации мало внимания.

Прямые задачи выявления пространственно-временной упорядоченности трехмерных точечных множеств локальной и региональной сейсмичности хорошо изучены как в сейсмологии и сейсморазведке как в методологическом отношении [13], так и в части рассмотрения вычислительных алгоритмов [1]. Были опубликованы также работы, в которых рассматривается структуроконтролирущая роль тектонических и вулкано-тектонических линеаментов, а также разломов в пространственном размещении центров вулканизма, рассматриваемых как точечные объекты (например, [3]).

Различные аспекты решения прямых и обратных задач группирования и упорядоченности точечных множеств (в том числе соотношения их с линейными, плоскостными и криволинейными элементами строения геологической среды) является объектом пристального изучения в геометрии, топологии, стереологии, теории геометрических вероятностей, фракталов и т.д., а результаты опубликованы, что освобождает нас от необходимости рассмотрения данных вопросов.

Отметим только, что принципиальное значение для дальнейшего поиска и развития алгоритмов индикации могут играть алгоритмы решения классической в интегральной геометрии задачи об игле Бюффона (как в варианте случайного бросания на плоскость прямолинейной линейной иглы [5], так и для более сложных случаев – бросания конечной кривой на плоскость (задача о макаронине), или задачи о случайном размещении конечных плоскостей и поверхностей в трехмерном пространстве.

Следует отметить, что в России и за рубежом накоплен значительный опыт выполнения исследований по анализу упорядоченности точечных множеств при изучении разломной тектоники земной коры. Перечислим наиболее значимые из них во временной последовательности публикации работ с описанием алгоритмов, или с момента регистрации программ, на примере тех разработок, целью которых в той или иной мере ставится задача разломов, магматических даек и иных структур Курило-Камчатского региона, а также развитие методов индикации, диагностики и идентификации линейных и планальных структур по точечным множествам. Последовательность публикаций приводится по годам в хронологическом порядке.

2007 – А.П. Кудряшов, развивая сформировавшиеся ранее в иконике (науке о количественной обработке изображений для извлечения скрытой в них информации), опубликовал статью, в которой обосновал и разработал алгоритм извлечения и сопоставления точечных особенностей изображений [11]. В дальнейшем предложенные им технологии позволили на основании выявления и трассирования таких точечных особенностей, получать более четкие изображения земных недр в

сейсмостратиграфии, в том числе двумерные и трехмерные данные о пространственном положении, форме и координатах сейсмических границ и секущих их разломов.

2010 – А.Н. Кролевец и А.М. Макеев (КамГУ им Витуса Беринга) впервые обнародовали на 2-й региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» результаты своих исследований по созданию алгоритма и компьютерной «Программы поиска плоскостей группирования гипоцентров землетрясений) [8]. В следующем году программа с уточненным названием («пространственного группирования»), была зарегистрирована в Объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» (рег. № 16745). Они также публикуют описание алгоритма и реализующей его компьютерной программы, позволяющей осуществлять поиск таких плоскостей, с использованием каталогов землетрясений [9]. Кроме того был сделан вывод, что выявление плоскостей группирования позволяет уточнять детали строения геофизической среды сейсмоактивных зон и обеспечивает выбор их адекватных моделей [10].

2014 – Д. С. Крупянский, А. Д. Фофанов, основываясь на длительной истории разработки программного обеспечения для анализа атомной структуры модельных кластеров кристаллов, опубликовали описание алгоритма поиска точечных подмножеств и его применение для анализа атомной структуры таких кластеров [12]. Хотя работа была нацелена на решение кристаллографических задач с использованием методов топологии и теории графов, однако разработанные ими подходы с использованием в будущем могут быть использованы для распознавания одно- и многосвязных магматических тел и других объемных геологичсских объектов. Основание этому дает то, что с формальной точки зрения структура магматических питающих систем вулканов, с формальной точки зрения может интерпретироваться как граф, вершины которого соответствуют магматическим резервуарам, а ребра – соединяющим их каналам. Соответствующие аналогии между вершинами графа и ребрами можно провести и со строением активных дизъюнктивных систем в зонах современной сейсмичности.

2016 – А.А. Гусев и А.А. Палуева опубликовали первые результаты своих исследований статистик направлений для упорядоченных пар эпицентров землетрясений-соседей на Камчатке, на основе допущения, что пространственно-временное группирование их может быть описано как отклонение (увеличение) вероятности коротких расстояний и интервалов времени между событиями по сравнении с опорным «чисто случайным», пуассоновским, процессом [4]. Итогом расчетов является оценка распределения азимутов векторов, соединяющих членов пары (роза-диаграммы направлений).

В том же году П.А. Кирюхин и А.В. Кирюхин зарегистрировали в Государственном реестре программ для ЭВМ ФИПС, написанную на языке Java 8 программу FRAC-Digger (рег. № 20116616880), предназначенную для реализации в среде Windows на PC IBM на базе процессора Pentium 11 и выше [6]. Программа позволяет производить на множестве точечных гипоцентров землетрясений, поиск плоско-ориентированных кластеров [17]. После считывания координат дискретного множества точек в 3D пространственно-временной области, осуществляется выборка подмножеств плоско-ориентированных кластеров с заданным минимальным числом членов по критериям близости по времени и удаления от плоскости и выполняет расчет геометрических параметров соответствующих плоскостей. Исходные координаты точек могут определяться со случайными отклонениями. Результаты расчета представляются в виде электронных таблиц с геологическими характеристиками по каждому из выделенных плоско-ориентированных кластеров (число точек, угол и азимут падения соответствующих плоскостей, площади, включающие проекции точек кластера, и др. параметры). Заявленное при регистрации применение программы - выявление дискретных систем трещин по сейсмическим или геологическим данным.

2017 – П.А. Кирюхин модифицировал программу FraqDigger, включив в новую программу (FraqDigger2) возможность выборки подмножеств плоскоориентированных кластеров с заданным минимальным числом членов на основании использования метода Монте-Карло [7].

2019 – П.А. Кирюхин в программе Frac-Digger-2 для выборки подмножеств плоскоориентированных кластеров с заданным минимальным числом членов использовал метод Монте Карло [7].

Краткий критический анализ алгоритмов индикации линейных и планальных структурных элементов земной коры по точечным множествам гипоцентров

Несмотря на многообразие различных путей получения информации о пространственном положении, размерах, форме, вещественном составе и других параметрах изучаемых геологических

объектов, в методологическом отношении исследователь всегда выполняет определенную последовательность действий по сбору, отбраковке, систематизации данных, их анализу и последующей интерпретации полученных результатов. Пропуск одного из шагов без указания причин, и тем более, недостаточно полное описание последовательности действий в описании методической части публикации снижают интерес к ней специалистов.

Одним из важнейших методологических требований в науках о Земле является критерий полноты исходных данных. Так, в мемуарной геологической литературе описаны случаи, когда при отборе на вулканах проб, специалистами выбрасывались «неправильные» образцы пород, не соответствующие их воззрениям. Известны также случаи, когда ошибки в организации опробования и интерпретации результатов опробования керна скважин и точечного опробования рудных тел на поверхности, приводили к ошибочному многократному завышению запасов месторождений. При решении задач такие ошибки маловероятны, чае встречаются случаи, когда при подготовке публикации отбраковывается те или иные исходные данные. Так, при прочтении нескольких публикаций о локальной сейсмичности вулканов Камчатки, создается впечатление, что авторы намеренно убрали из анализа те гипоцентры локальных землетрясений, высотное положение которых превышает высоту поверхности вулканической постройки. На этом фоне пропуск одного из событий в таблице координат и параметров сейсмических событий, как, например в работе [3], воспринимается как простой недосмотр оператора, набиравшего таблицу с данными. В цитируемая нами статье методика исследования прописана профессионально, поэтому если бы были иные причины убрать из рассмотрения оно событие, то они были бы описаны. В данной работе отбраковка одной точки более-менее понятна. Однако обращает внимание тот факт, что при анализе локальной сейсмичности вулканов в некоторых случаях (вероятно, из-за недостаточной детальности годографов), отдельные гипоцентры имеют высоту, превышающую высоту поверхности вулканической постройки в точке с теми же координатами. Ни в одной публикаций о поиске разломов или планальных поверхностей, не удалось обнаружить описаний того, как учитываются эти выбросы высот. Примечательно, что ни в одной публикации о выявлении плоскопараллельных групп гипоцентров в сейсмофокальной зоне Камчатки не учитывается случайность распределения гипоцентров в полосе глубин - 40 км.

Помимо учета высотного положения гипоцентров, подлежит уточнению и еще один вопрос. В используемых алгоритмах вопрос трассирования плоскопараллельных зон подменяется при индикации точек другой проблемой – определения количества точек на единицу объема тестового параллелепипеда (для 3-D картирования искомых плоских разломных зон), либо тестового прямоугольника для 2-D картирования. Рассмотрим эту ситуацию для двумерного случая. Тестовый прямоугольник имеет длину L_1 и ширину L_2. В соответствии с алгоритмами перечисленных выше программ, выявление планальных структур происходит в пределах пояса, в пределах которого точки сейсмического облака гипоцентров могут находиться на расстоянии от плоскости, не превышающему полуширины L_2, а по длине $\leq L_1$

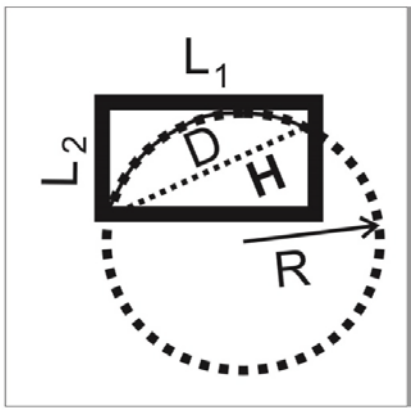


Рис. 1. Тестовый прямоугольник

Следует отметить, что методология изучения различных аспектов прямых задач анализа точечных источников сейсмичности нами не рассматривается, т.к. достаточно разработана в научной и учебной литературе например, [15]. Действительно, пространственное расположение гипоцентров нередко определяется дизъюнктивной тектоникой, в том числе решеткой прямолинейных разрывных нарушений. В этом смысле группировка точек вдоль прямой линии H не противоречит такому допущению и повышенная плотность точечных событий вокруг осевой линии, протягивающееся вдоль оси прямоугольника. Однако если поверхность не прямолинейная, имеет в общем случае кривизну окружности с радиусом R, то цепочка точек вдоль линии D будет трассировать отрезок дуги большой окружности. На примере рисунка 1 видно, что ситуация попадания в тестовый прямоугольник точек, относящихся к несопряженным трещинам вполне возможна. Следовательно, при дальнейшем развитии алгоритмов, целесообразно учитывать вероятность ошибок первого и второго рода, когда при индикации возникает такая ситуация.

Вероятность ошибок резко возрастает на этапах диагностики и идентификации при использовании всех трех перечисленных выше алгоритмов, относящихся к выявлению структур в облаках (множествах) точек сейсмичности (гипоцентров землетрясений. Так, не учитываются тектодинамические особенности реальных условий, а в идентификацию структур закладываются упрощенные геомеханические модели. Так, например? известно, что пространственное положение начальной точки гидроразрыва при повышении проницаемости коллекторов нефти и газа методом гидравлического трещинообразования (fracturing) определяется пространственным распределением напряжений сжатия. Кроме того, не все структуры могут быть связаны только с процессами естественного гидроразрыва в недрах сейсмически активных областей и вулканических систем.

Выводы

– Основное преимущество рассмотренных алгоритмов перед традиционными алгоритмами поиска линейных структур на точечных множествах (методы визуализации, сечений, а также прямого сопоставления известных разломов с картами и разрезами сейсмичности), состоит в возможности выявлять трехмерную структуру локальной и региональной сейсмичности.

– Основным недостатком их является выявление исключительно прямолинейных и планальных элементов структуры, что не позволяет обнаруживать нелинейные структуры (ошибки первого рода), а некоторые из выявленных структур не являются линейными (ошибка второго рода).

– При устранении перечисленных недостатков, отмеченные выше алгоритмов, возможно улучшение их эффективности для решения задач сейсмологии и вулканологии.

Список литературы

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. Том 1. М.: Мир, 1983. 360 с.

2. Гирина О.А. Особенности тектоники Северной группы вулканов Камчатки // Материалы XVIII региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 30 марта - 1 апреля 2015 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 26–31.

3. Гордеев Е.И., С. Л. Сенюков Сейсмическая активизация вулкана Корякский в 1994 г .: гибридные сейсмические события и их применение для оценки вулканической опасности // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4-5. С. 112–126.

4. Гусев А.А. Палуева А.А. Первые результаты исследования статистик направлений для пар эпицентров землетрясений-соседей на Камчатке // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 4. С. 529–543.

5. Дунин-Барковский И.В., Смирнов Н.В. Теория вероятностей и математическая статитика в технике (общая часть). М.: Гостехизат, 1955. 364 с.

6. Свидетельство о регистрации программы Fraq-Digger. Авторы П.А. Кирюхин и А.В. Кирюхин. Дата регистрации в Государственном реестре программ для ЭВМ ФИПС 21.06.2016. Электронный ресурс: http://patinfo.ru/files/fips/pevm2016/_TXT/2016616880.txt.

7. Кирюхин П.А. Выявление сейсмогенных продуктивных разломов с использованием программ Frac-Digger и Frac-Digger–2 // Материалы всероссийской научной конференции с международным участием "геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа" (geothermal volcanology workshop 2019). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 176–181.

8. Кролевец А.Н., Макеев А.М. Компьютерная программа поиска плоскостей группирования гипоцентров землетрясений // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции // Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 358–362.

9. Кролевец А.Н., Макеев А.М. Программа поиска плоскостей пространственного группирования гипоцентров землетрясений // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. №1. С.121–124.

10. Кролевец А.Н., Макеев А.М. Компьютерная программа поиска плоскостей пространственного группирования гипоцентров камчатских землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2011. № 2 (3). С. 69–79.

11. Кудряшов А.П. Извлечение и сопоставление точечных особенностей // Исследовано в России. 2007. Том 10. № 4. Электронный научный журнал, URL: http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/104.pdf.

12. Крупянский Д.С., Фофанов А.Д. Алгоритм поиска точечных подмножеств и его применение для анализа атомной структуры модельных кластеров // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2014. Том 7. № 2. С. 16–54.

13. Митрофанов Г.М. Обратные задачи геофизики. Н.: РИЦ НГУ, 2015. 101 с.

14. Назаров И.В. Методология геологического исследования. Н.: Наука, 1982. 180 с.

15. Пузырев Н.Н. Методы сейсмических исследований. Н.: Наука, 1992. 236 с.

16. Эткинс П. Порядок и беспорядок в природе. Мир., 1987. 224 с.

17. Kiryukhin A.V., Fedotov S.A., Kiryukhin P.A. A Geomechanical Interpretation of the Local Seismicity Related to Eruptions and Renewed Activity on Tolbachik, Koryakskii, and Avacha Volcanoes, Kamchatka, in 2008–2012. Journal of Volcanology and Seismology. 2016. № 5. P. 275–29.

УДК 004.4+550.8.05

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАБОТЫ С ДАННЫМИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СТАНЦИЙ ДРАГИРОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫХ В РЕЙСАХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СУДНА «ВУЛКАНОЛОГ» В ПРЕДЕЛАХ КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

Долгая А.А., Рашидов В.А.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
adolgaya@kscnet.ru*

Введение

Изучение мирового океана является в настоящее время одним из актуальных направлений научных исследований. В рамках этого направления Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН проводит исследование подводных вулканов Курильской островной дуги (КОД), обрабатывая материалы, собранные в 1977-1991 гг. камчатскими вулканологами с борта научно-исследовательского судна (НИС) «Вулканолог» во время комплексных геолого-геофизических экспедиций. Данные, полученные в этих экспедициях, и сейчас, спустя 30 лет после окончания последнего рейса, актуальны и представляют большую научную ценность [1, 3, 4 и др.]. Поэтому нами на протяжении ряда лет [5-7] проводится разработка автоматизированной информационно-поисковой системы «Galses», предназначенной для работы с данными геофизических исследований и станций драгирования, выполненных в рейсах НИС «Вулканолог».

В 2020-2021 гг. функционал автоматизированной системы был расширен двумя модулями для работы с данными химических анализов пород, драгированных со склонов и вершин подводных вулканов КОД. Также был обновлен интерфейс программного продукта. Далее рассмотрим указанные нововведения более подробно.

Развитие информационно-поисковой системы «Galses»

Первая версия автоматизированной системы была создана в 2016 г. и позволяла работать с данными о маршруте (галсах) судна – просматривать, осуществлять сортировку и простой поиск по координатам, добавлять и редактировать данные и экспортировать их в файлы Excel (рис. 1). Для того чтобы учесть разницу в формате представления географических координат в старых журналах рейсов (градусы, минуты и доли минут) и на современных картах (градусы и доли градусов), в системе была реализована возможность выбирать необходимый формат отображения широты и долготы.

Затем функционал системы постепенно расширялся: был расширен список допустимых форматов для добавления данных в базу, реализован поиск точек хода судна в произвольно заданном многоугольнике, добавлена возможность выводить результат поиска на карту-схему. В 2019 г. в систему был добавлен картографический модуль [7], который позволил выводить результаты поиска на карту с нанесенными на нее данными батиметрии.

С момента создания системы непрерывно проводилась работа по наполнению базы данных информацией о местоположении судна, заполнению пропусков и исправлению ошибок. Возможность визуализировать данные на карте значительно облегчила поиск неточностей и опечаток в координатах. В настоящее время в системе хранятся данные о 7207 точках местоположения судна в рамках 11 рейсов в районе КОД.

Помимо расширения функционала по обработке данных о галсах хода судна в состав информационно-поисковой системы были последовательно добавлены модули для работы с данными о станциях драгирования, выполненных в рейсах НИС «Вулканолог», о подводных вулканах Курильской островной дуги и химических анализов драгированных горных пород.

Для работы с данными о станциях драгирования в информационно-поисковой системе доступны те же функции, что и для данных о местоположении: пользователь может добавлять и редактировать данные, осуществлять поиск по координатам и временным интервалам, выводить данные на карту и экспортировать данные в Excel.

Таблица с данными о станциях драгирования в настоящее время содержит 208 записей, 19 из которых описывают станции драгирования, выполненные в пределах КОД в рейсах других научно-исследовательских судов («Пегас» и «Витязь-2»).

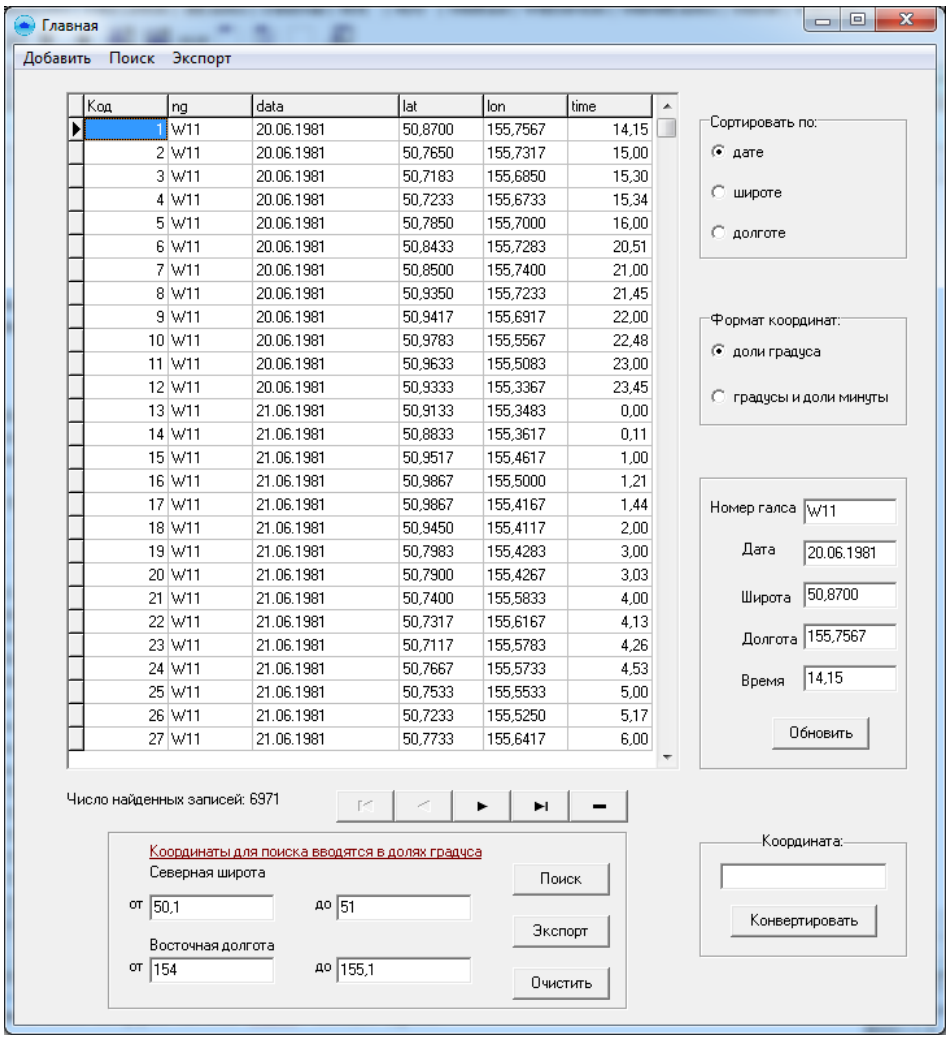


Рис. 1. Интерфейс первой версии системы «Galses».

Все описанные нововведения добавлялись в систему постепенно, а структура главного окна оставалась практически неизменной. К седьмому по счету этапу обновления программного продукта стало очевидно, что интерфейс главной формы уже не соответствует функциональному наполнению и структуре программного продукта, поэтому было принято решение модернизировать главное окно, сохранив при этом максимальное сходство с предыдущими версиями для удобства адаптации пользователей.

Обновленная версия главной формы информационно-поисковой системы представлена на рис. 2. Как видно, блок редактирования данных о местоположении судна был убран с главного окна и перемещен на отдельную форму, доступную через кнопку меню «Редактировать». Блок конвертации координат был также убран на самостоятельную форму, доступную в меню «Сервис». Теперь все операции по «ручному» добавлению данных и их редактированию сгруппированы в соответствующие пункты меню, имеющие одинаковую структуру: пользователь может внести или изменить данные о местоположении судна в ходе рейса (меню «Галсы»), станции драгирования (меню «Драги») и вулкане (меню «Вулканы»).

На освободившееся место справа от таблиц просмотра данных был перенесен блок поиска и кнопки для быстрого вывода данных на карту, карту-схему или в файл Excel. Поле с описанием станции драгирования, ранее находившееся ниже блока редактирования точек галсов, было перенесено на вкладку «Драги». Был также изменен шрифт текста на всех формах информационно-поисковой системы.

Новая главная форма информационно-поисковой системы стала короче, при этом табличная часть с данными стала немного шире. Новое расположение управляющих элементов на главной форме более соответствует расширившемуся функционалу программного продукта.

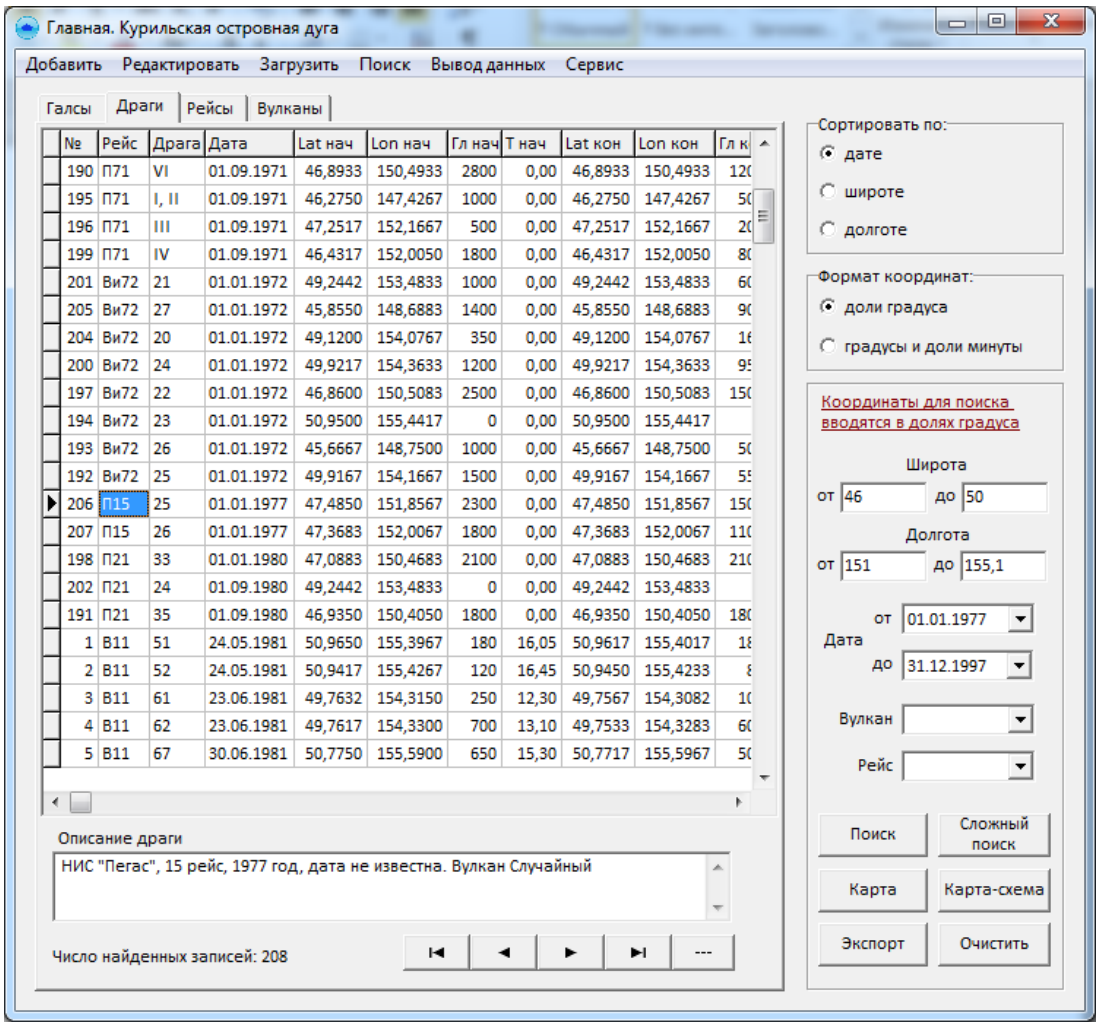


Рис. 2. Обновленный интерфейс главного окна системы «Galses». Вкладка «Драги».

Модуль «Химические анализы драгированных пород»

В 2020 г. в информационно-поисковую систему «Galses» был добавлен модуль для работы с данными химических анализов пород, драгированных в рамках рейсов НИС «Вулканолог» при изучении подводных вулканов КОД [5]. Для этого в базу данных были добавлены таблицы volcano (для хранения списка вулканов), chemVal для хранения данных валового химического анализа, chemR и chemRE для хранения данных анализа редких и редкоземельных элементов соответственно. Каждая строка в таблицах анализов содержит номер образца, номер вулкана, на котором этот образец был отобран, литературный источник, в котором опубликованы данные анализов, метод проведения исследования. Данные силикатного (валового) состава пород представлены в массовых %, а редкоэлементный и редкоземельный составы пород – в ppm. В таблицах приведены исчерпывающие перечни возможных элементов и их соединений, так как в различных лабораториях при исследованиях могут определяться различные наборы элементов. При отсутствии какого-либо пункта в анализе соответствующее поле остается пустым с возможностью дальнейшего добавления информации при необходимости. В таблицах chemR и chemRE химические элементы упорядочены согласно периодической таблице химических элементов Д.И. Менделеева.

В настоящее время в базе данных содержится 1110 записей результатов анализа валового состава, 992 записи результатов анализа редкоэлементного и 292 записи результатов анализа редкоземельного состава драгированных пород.

В системе реализована возможность добавления и редактирования данных, фильтрация результатов анализов, относящихся к разным вулканам или группам вулканов, а также экспорт данных в Excel. Для каждой таблицы можно вычислить минимальное, максимальное и среднее содержание каждого химического элемента или соединения. Эти данные также добавляются в экспортируемый файл.

В 2021 г. блок для работы с данными химических анализов был дополнен базой данных химических анализов железомарганцевых образований (ЖМО), обнаруженных на породах,

драгированных на вулканах Курильской островной дуги. ЖМО представляют собой самостоятельный предмет исследований, они встречаются во всех океанах и их изучению посвящено достаточно большое количество работ как отечественных, так и зарубежных ученых [2, 8 и др.].

Перечень анализируемых элементов и их соединений при исследовании ЖМО часто отличается от того, что анализируется при изучении основной породы, поэтому в базу данных программного продукта «Galses» были добавлены три самостоятельных таблицы FeMnVal, FeMnR и FeMnRE. Их структура схожа с соответствующими таблицами для хранения результатов анализа состава основных пород, отличается только набор химических элементов.

В настоящее время в базе данных хранится 78, 85 и 53 записи результатов анализа валового, редкоэлементного и редкоземельного состава ЖМО соответственно. Источниками данных служат сведения, опубликованные в научной литературе (в этом случае в базе указывается библиографическая ссылка), а также неопубликованные данные, которыми располагают авторы (в этом случае указывается место выполнения анализа).

Для работы с данными химических анализов ЖМО была создана отдельная форма (рис. 3), идентичная по своей структуре форме для работы с данными химических анализов основных пород и отличающаяся от нее цветом фона, что должно помочь пользователю не запутаться в таблицах.

Доступ к формам для работы с базами данных химических анализов драгированных пород и ЖМО осуществляется через кнопки, находящиеся на вкладке «Вулканы» главной формы приложения.

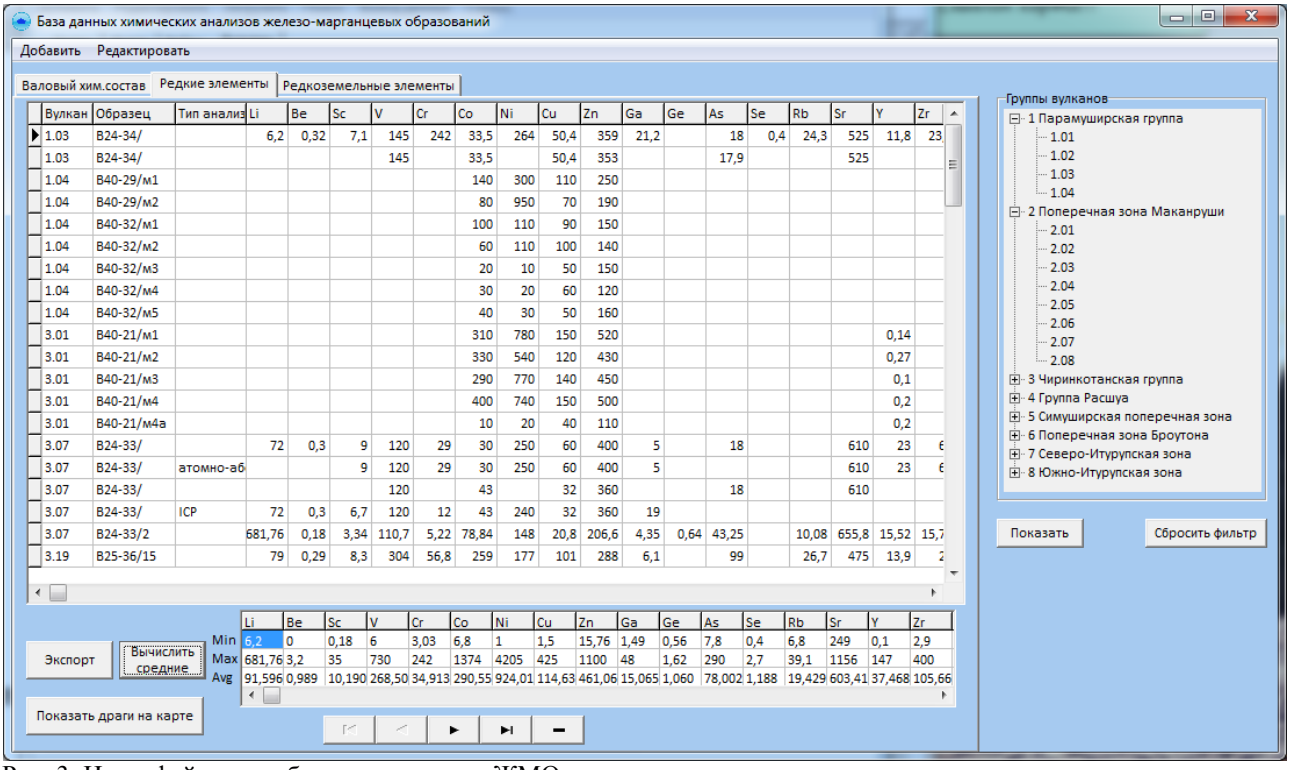


Рис. 3. Интерфейс для работы с анализами ЖМО

Помимо добавления нового блока данных в модуле «Химические анализы драгированных пород» была реализована возможность сортировать таблицы с результатами анализов по содержанию химических элементов и их соединений путем клика по заголовку соответствующего столбца.

Еще одной функцией, добавленной в рассматриваемый модуль, стало отображение на карте станций драгирования, для которых пользователь просматривает результаты химических анализов (рис. 4). Для работы данной функции необходимо, чтобы станции драгирования были привязаны к определенному вулкану, а номера образцов в базе химических анализов включали в себя номер станции драгирования. Построенную карту можно сохранить в файл bmp или jpg.

В картографический модуль в 2021 г. была добавлена возможность отображать шкалу глубин.

Заключение

За последние два года информационно-поисковая система «Galses» претерпела ряд значимых изменений: были добавлены модули для работы с данными химических анализов драгированных

пород и ЖМО, был модернизирован интерфейс главного окна приложения и других форм, в базу данных были внесены новые данные и исправлены ошибки в уже имевшихся записях. Система активно развивается, что говорит о ее востребованности. Вероятно, скоро наступит момент, когда формат настольного приложения станет тесен для всего объема накопленных данных, поэтому в настоящее время рассматриваются варианты перевода системы в формат web-приложения.

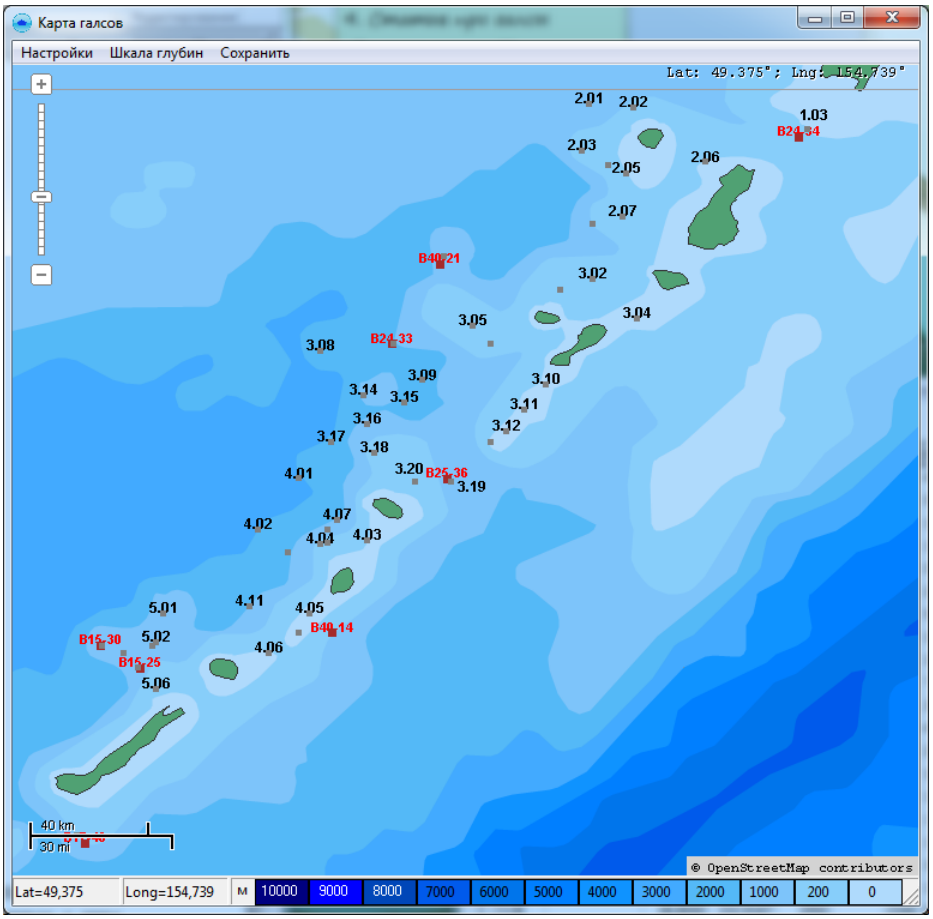


Рис. 4. Подводные вулканы и станции драгирования.

Список литературы

1. *Аникин Л.П., Блох Ю.И., Бондаренко В.И. и др.* Комплексные геолого-геофизические исследования подводных и наземных вулканов Курильской островной дуги в 2020 г.// Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, 29-30 марта 2021 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С. 68–71.

2. *Батурин Г.Н., Дубинчук В.Т., Овсянников А.А. и др.* Железомарганцевые конкреции Восточно-Сибирского моря близ острова Беннетта // Океанология, 2017. Т. 5. № 5. С. 782–790.

3. *Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др.* Комплексные геолого-геофизические исследования подводного вулканического массива Ратманова (Курильская островная дуга) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 2. Вып. № 46. С. 55–71.

4. *Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др.* Вулканический массив Райкоке (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 4. С. 61–80.

5. *Долгая А.А.* Разработка программного модуля «Химические анализы драгированных пород подводных вулканов Курильской островной дуги» // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. Материалы XXXI молодёжной научной школы-конференции, посвящённой памяти К.О. Кратца (Санкт-Петербург, 5-9 октября 2020 г). Санкт-Петербург: Своё издательство, 2020. С. 79–82.

6. *Долгая А.А., Палуева А.А., Рашидов В.А.* Реляционная база данных профильных геофизических исследований и станций драгирования, выполненных в рейсах НИС «Вулканолог» в 1977-1991 гг. // Сборник материалов IV Школы-конференции «Гординские чтения», 20-22 ноября 2017 г. М.: ИФЗ РАН, 2017. С. 59–62.

7. *Долгая А.А., Рашидов В.А.* Информационно-поисковая автоматизированная система для работы с данными геофизических исследований и станций драгирования, выполненных в рейсах НИС «Вулканолог» в 1977-1991 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 426–429.

8. *Glasby G.P., Chercashov G.A., Gavrilenko G.M. et al.* Submarine hydrothermal activity and mineralization on the Kurile and western Aleutian island arcs, N.W. Pacific // Marine Geology. 2006. Vol. 231. P. 163–180.

УДК 550.34+004.42

ПРОГРАММНОЕ РЕШЕНИЕ «DRUMCORR» НА ОСНОВЕ КРОСС-КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С БЛИЗКИМИ ВОЛНОВЫМИ ФОРМАМИ

Заводевкин И.А., Шакирова А.А., Фирстов П.П.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, zed@emsd.ru

Введение

В сконцентрированных последовательностях землетрясений часто выделяются мультиплеты – семейства землетрясений с близкими волновыми формами. Это сходство возникает тогда, когда землетрясения имеют подобные механизмы очагов и находятся в пространственной близости [4, 11]. Одним из методов оценки сходства сигналов является кросс-корреляция волновой формы. Данный метод весьма распространен при выделении мультиплетов как тектонических [6, 14], так и вулканических землетрясений [5, 9, 10, 12].

Для отслеживания изменений в волновых формах многочисленных землетрясений на длительных интервалах наблюдений и разделения их на отдельные мультиплеты в Камчатском Филиале ФИЦ ЕГС РАН было разработано программное решение «DrumCorr» [1], в основу которого заложен кросс-корреляционный детектор волновых форм.

Кросс-корреляцию двух сигналов x_p и y_p можно представить в следующем виде. Сходство между событиями $x_p(t)$ и $y_p(t)$ количественно оценивается с помощью функции кросс-корреляции $r_{xy}(\tau)$:

$$r_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_p(t) y_p\,(t+\tau) d\tau \qquad (1)$$

Где τ – задержка между двумя сигналами.

Изменение τ меняет относительное положение сигнала x относительно сигнала y. Следует отметить, что корреляционная функция r_{xy} измеряет только подобие волновой формы сигнала, а не амплитуду событий. Таким образом, амплитуды могут изменяться для событий с аналогичными формами волн, что означает, что волны двигались по почти идентичной траектории, но не обязательно создавались источником с постоянной силой.

Коэффициент корреляции r является количественным параметром корреляции. Значение r находится в диапазоне чисел от -1 до 1. Чем ближе r к 1, тем сильнее прямая связь между переменными, чем ближе r к -1 – обратная. При r=0 значимая связь между двумя переменными отсутствует.

Программное решение «DrumCorr» реализовано на языке программирования Python версии 3. Реализация кросс-корреляционной функции взята из ObsPy – библиотеки для работы с сейсмоакустическими данными [https://docs.obspy.org/]. Разработанное программное решение позволяет работать с временными рядами формата MiniSEED и ASCII. Возможна поддержка других форматов, указанных в библиотеке ObsPy [15], содержащих в себе временные ряды.

Исходный код программы доступен на Github: https://github.com/ZiCode0/DrumCorr.

Описание программы

Запуск программы начинается с чтения конфигурационного файла (рис. 1), который содержит следующие параметры: фильтр временного ряда, порог детектирования корреляции, минимальное количество коррелированных землетрясений в заданном суточном файле. Также в качестве дополнительных параметров указывается формат наименований входящих файлов для определения файла с шаблоном сигнала и входных временных рядов.

Программой предусмотрено использование различных фильтров, поддерживаемых библиотекой ObsPy [16].

Кросс-корреляция осуществляется с помощью скользящего окна, равного длине файла шаблона. Результат кросс-корреляционного детектора записывается в переменные окружения программы. Итогом расчетов детектора служит список найденных событий со значением корреляционной функции и временем сработавшего детектора (рис. 2).

config_example.json

```
{
  "config": {
    "filter": {
      "filter_name": "bandpass",
      "filter_params": {
        "freqmin": 0.2,
        "freqmax": 10.0
      }
    },
    "xcorr_detection_value": 0.6,
    "xcorr_minimum_count": 0.0,
    "template_filename_format": "+{file_name}",
    "exclude_filename_formats": ["-{file_name}", ".{file_name}"],
    "report_format": "{file_name}-report.txt",
    "notify": ["gmail"],
    "experimental": 1
  }
}
```

Рис. 1. Пример конфигурационного файла.

Для нахождения значения максимальной амплитуды каждого сигнала применяется метод STA/LTA (short-time average/long-time average) (рис. 3) [2, 3]. Он основан на соотношении средних абсолютных амплитуд в коротком (STA) и длинном (LTA) временном окне, которое используется для оценки отношения сигнал/шум. Метод STA/LTA применяется для автоматического обнаружения землетрясений [7, 8].

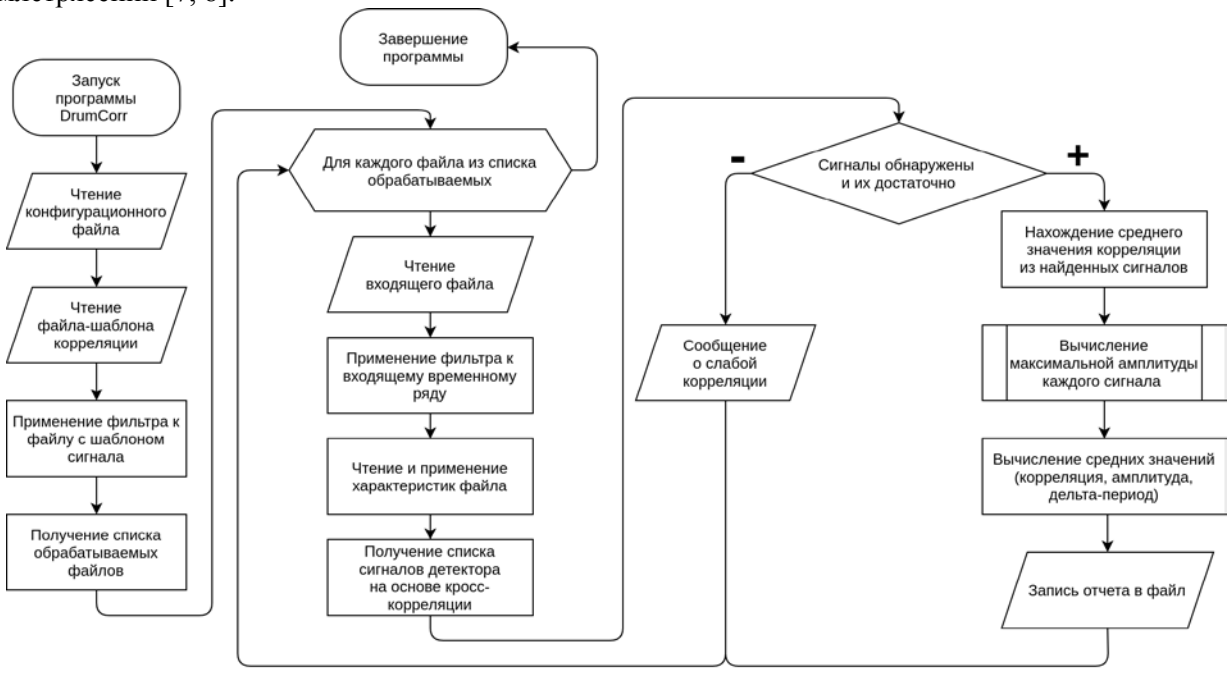


Рис. 2. Блок-схема работы программы DrumCorr.

В библиотеке ObsPy имеется несколько реализаций для работы с методом STA/LTA. Наиболее подходящим для выделения и нахождения максимальной амплитуды сигнала оказался метод Delayed STA/LTA [13], особенность которого заключается в накопительном эффекте итоговой функции, что позволило наиболее явно выделить максимум сигнала, в отличие от классической реализации метода. При выделении максимума сигнала методом STA/LTA могут возникать трудности в виде техногенного шума на сейсмических записях. Его наличие приводит к появлению нескольких локальных максимумов на графике и сложностям автоматизации выделения максимального значения амплитуды события. Для решения данной проблемы высчитывается усредненная функция Delayed STA/LTA, основанная на выборке из первых 20 найденных сигналов. Если во входном временном ряду их было найдено менее 20, то используется максимально возможное количество для вычисления усредненной функции. Полученная нормализованная функция используется для нахождения максимальных значений амплитуд всех событий временного ряда.

Для обработки временного ряда данным методом необходимо установить соотношение короткого и длинного окон. Длительность STA, как правило, соответствует длительности P-фазы землетрясения, длительность LTA – много больше длительности STA [13]. Это соотношение устанавливается пользователем самостоятельно исходя из параметров сейсмической записи. К примеру, параметрами, адаптированными под сейсмостанцию KZV КФ ФИЦ ЕГС РАН, расположенной в 2.6 км от вулкана Кизимен (Камчатка, Россия), были выбраны STA=1 с, LTA=4 с (рис. 4).

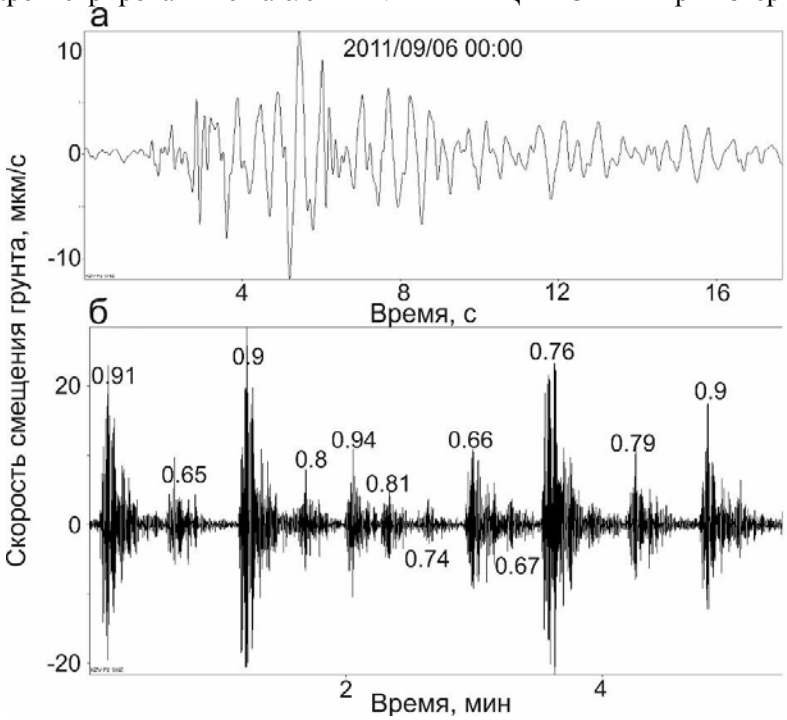
Рис. 3. Блок-схема нахождения максимальной амплитуды каждого события.

Для каждого события, найденного кросс-корреляционным детектором, выделяется временной фрагмент длинной в 50 с (25 с до и 25 с после срабатывания детектора). Из-за накопительной особенности полученной функции STA/LTA, где 1/3 – это нулевые значения, данная часть исключается из нахождения максимума. Итоговой длиной временного ряда является 30 с фрагмент, где находится значение максимальной амплитуды исходя из максимума функции STA/LTA.

Результатом вычисления кросс-корреляционного детектора для каждого файла является файл-отчет (рис. 4в), где выводится итоговое количество выделенных сигналов (N), заданный коэффициент корреляции (r_s), среднее и максимальное значение коэффициентов корреляции ($\bar{r}$, r_{max}), а также список сигналов с временными метками и соответствующими r_i.

Практическое применение программы

Для примера рассмотрим фрагмент сейсмической записи с соответствующими рассчитанными коэффициентами корреляции (рис. 4а, б) и шаблонное землетрясение, зарегистрированные на с/ст KZV КФ ФИЦ ЕНС РАН при извержении в. Кизимен в 2011 г.



в

DrumCorr Fil	<20110909-00-00-00.asc> result:		
Beats count:			3573
Detection value:		0,55	
Average corre	0,79189254		
Average amplitude:		13,2253	
Average amp delta:		0:00:24	
Max corr:			
Value:		0,94946	
Amplitude	10,5975		
Amp time:	09.09.2011	0:57:02	
08.09.2011	23:59:32	0,895	10,3134
08.09.2011	23:59:48	0,856	6,6483
09.09.2011	0:00:06	0,67	5,2561
09.09.2011	0:00:25	0,912	22,7009
09.09.2011	0:00:56	0,653	9,9156
09.09.2011	0:01:30	0,902	27,8718
09.09.2011	0:01:58	0,801	7,9268
09.09.2011	0:02:20	0,943	10,8248
09.09.2011	0:02:37	0,81	5,1141
09.09.2011	0:02:55	0,736	4,2049
09.09.2011	0:03:16	0,656	11,1373
09.09.2011	0:03:34	0,672	4,0629
09.09.2011	0:03:52	0,763	23,6384
09.09.2011	0:04:32	0,796	11,5351
09.09.2011	0:05:06	0,902	17,4447

Рис. 4. Шаблонное землетрясение, зарегистрированное 2011/09/06 в 00:00 с/ст KZV, канал SHZ (а); пятиминутный фрагмент суточной сейсмической записи на с/ст KZV, канал SHZ 2011/09/09 с соответствующими коэффициентами корреляции относительно шаблонного землетрясения (б) и соответствующий фрагмент файл-отчета программы «DrumCorr» (в).

Как видно из фрагмента файл-отчета программы «DrumCorr» (рис. 4в) почти все землетрясения, зарегистрированные 2011/09/09, имеют высокий коэффициент корреляции с шаблонным землетрясением, выбранным 2011/06/06 в 00:00. За сутки 3573 землетрясений были

помещены в один мультиплет с $\bar{r}$=0.79, что говорит о достаточно сильной связи между ними, несмотря на то, что амплитуды сигналов варьировались от 4 до 27 мкм/с.

Заключение

Разработанное программное решение «DrumCorr» позволяет выделять мультиплеты землетрясений на основе кросс-корреляционного детектора. Программа является универсальной и может применяться к сейсмоакустическим данным форматов MiniSeed и ASCII. Также возможна поддержка других форматов, указанных в библиотеке ObsPy, содержащих в себе временные ряды. Исходный код программы доступен на Github: https://github.com/ZiCode0/DrumCorr.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/, http://www.gsras.ru/unu/).

Список литературы

1. *Заводевкин И.А., Шакирова А.А., Фирстов П.П.* Выделение землетрясений с близкими волновыми формами и магнитудой в потоке сейсмических событий (программа DRUMCORR) // Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография. Том XIX / Под ред. Е.М. Нестерова, В.А. Снытко. СПб.: Издво РГПУ им. А.И. Герцена, 2020. С. 68–72.

2. *Allen R.* Automatic earthquake recognition and timing from single traces // Bulletin of the Seismological Society of America. 1978. V. 68. P. 1521–1532.

3. *Allen R.* Earthquake prediction-1982 overview // Bulletin of the Seismological Society of America. 1982. V. 72. P. 331–335.

4. *Geller R.G., Mueller C.S.* Four similar earthquakes in central California // Geophysical Research Letters. 1980. V.7. Iss. 10. P. 821–824. https://doi.org/10.1029/GL007i010p00821

5. *Green D., Neuberg J.* Waveform classification of volcanic low-frequency earthquake swarms and its implication at Soufrière Hills Volcano, Montserrat // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2006. V. 153. P. 51–63. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.08.003

6. *Karen R. F., Rachel E. A., Goran E. A.* Common Origin for Aftershocks, Foreshocks, and Multiplets // Bulletin of the Seismological Society of America. 2004. Vol. 94, No. 1. P. 88–98.

7. *Ketner D., Power J.* Characterization of seismic events during the 2009 e ruption of Redoubt Volcano, Alaska // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 259. P. 45–62. https://doi.org/ 10.1016/j.jvolgeores.2012.10.007

8. *Matoza R. S., Garces M. A., Chouet B. A., D'Auria L., Hedlin M., Groot-Hedlin C., Waite G.* The source of infrasound associated with long-period events at Mount St. Helens // Journal of Geophysical Research. 2009. V. 114. P. 1–38. https://doi:10.1029/2008JB006128

9. *Matoza R.S., Chouet B.A.* Subevents of long-period seismicity: Implications for hydrothermal dynamics during the 2004–2008 eruption of Mount St. Helens, Journal of geophysical research. 2010. V. 115. P. 1–26. https://doi:10.1029/2010JB007839

10. *Petersen T.* Swarms of repeating long-period earthquakes at Shishaldin Volcano, Alaska, 2001–2004 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2007. V. 166. P. 177–192. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores. 2007.07.014

11. *Poupinet G., Ellsworth W.L., Frechet J.* Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the Calaveras Fault, California // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. 1984. V. 89. P. 5719–5731. https://doi.org/10.1029/JB089iB07p05719

12. *Stephens, C. D., Chouet B. A.* Evolution of the December 14, 1989 precursory long-period event swarm at Redoubt Volcano, Alaska // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2001. V. 109. P. 133–148.

13. *Trnkoczy, A.* Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm // IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum, 2002. P. 1–20. https://doi.org/0.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_8.1

14. *Waldhauser F., Ellsworth W. L., Schaff D. P., Cole A.* Streaks, multiplets, and holes: High-resolution spatio-temporal behavior of Parkfield seismicity // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. Iss. 18. P. 1–4. https://doi:10.1029/2004GL020649

15. Документация ObsPy. Сейсмические фильтры: https://docs.obspy.org/packages/autogen/obspy.signal.filter.html?highlight=filter#module-obspy.signal.filter (дата обращения: 28.08.2021).

16. Документация ObsPy. Список поддерживаемых сейсмических форматов данных: https://docs.obspy.org/packages/autogen/obspy.core.stream.read.html?highlight=read#supported-formats (дата обращения: 28.08.2021).

УДК 556.3+550.34

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ СКВАЖИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ КФ ФИЦ ЕГС РАН В 2017–2020 гг.

Кобзев В.А., Болдина С.В., Коркина Г.М., Долгих В.П.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, kobzev@emsd.ru

Введение

На территории Петропавловск-Камчатского полигона Лабораторией геофизических исследований КФ ФИЦ ЕГС РАН проводятся прецизионные автоматизированные наблюдения за давлением подземных вод, а также температурой и электропроводностью воды в четырех скважинах – ЮЗ-5, Е-1, М-1 и 1303, вскрывающих скальные водовмещающие породы на глубинах 310 – 717 м. В [2, 3, 4] представлены данные о строении скважин, свойствах водовмещающих пород, закономерностях гидрогеодинамического режима и зарегистрированных гидрогеодинамических предвестниках, косейсмических эффектах и гидрогеосейсмических вариациях (ГГСВ) в изменениях уровня/давления воды при местных и телесейсмических землетрясениях.

Целью таких наблюдений является изучение закономерностей проявления откликов физико-химических параметров подземных вод при воздействии землетрясений, в т.ч. на стадиях их подготовки, образования разрывов и вибрационных эффектов при распространении сейсмических волн, а также разработка методов прогноза сильных землетрясений на основе гидрогеологических предвестников.

С 1996 г. для регистрации параметров подземной воды используется цифровое оборудование [3]. В последние три года проводится экспериментальное применение различных комплектов оборудования: высокочувствительных швейцарских датчиков совместно с регистраторами фирм Keller и Cambell с накоплением данных на твердотельную память и передачу по каналам сотовой связи, а также экономичного варианта регистрации параметров подземных вод, накопления и передачи данных с помощью миникомпьютера [1].

В работе рассматривается различные комплекты оборудования, установленные на скважинах Петропавловск-Камчатского полигона, их характеристики и полученные с их помощью высокочастотные записи гидрогеосейсмических вариаций давления подземной воды при землетрясениях.

Модернизация системы наблюдений

В состав оборудования, установленного в 2017–2021 гг. на скважинах ЮЗ-5, Е-1, М-1 и 1303, были включены однотипные погружные высокочувствительные датчики PAA36 XiW CTD Si (давление, температура и электропроводность воды) и PAA36 XW (давление и температура воды) фирмы Keller, Швейцария (рис. 1).

На скв. ЮЗ-5 (рис. 1А) в качестве регистраторов использовались в различное время CR6, CR1000 (фирма Campbell, США) и GSM-2 (фирма Keller, Швейцария). На этой скважине отрабатывался вариант технического и программного совмещения швейцарских датчиков с американскими регистраторами. В сентябре 2017 – мае 2019 гг. проводилась регистрация давления воды на глубине 5.6 м с частотой 10 и 40 Гц. В 2018 г. работал комплект аппаратуры производства фирмы Keller. Датчик PAA36XiW был установлен на глубине 8 м ниже уровня воды. С 2020 г. в скважине проводится регистрация давления воды на глубине 8 м с частотой 0.01, 1 и 20 Гц с использованием датчика PAA 36XiW и регистратора CR1000.

На скв. Е-1 (рис. 1Б) в июле 2020 г., дополнительно к отечественному оборудованию для измерений уровня воды Кедр ДМ, было установлено оборудование фирмы Keller (датчик PAA36XiW CTD Si и регистратор GSM-2) для измерения давления на глубине 6 м ниже уровня воды.

В самоизливающейся скв. М-1 (рис. 1В) также дополнительно к оборудованию Кедр ДМ в июле 2020 г. установлен комплект аппаратуры в составе датчика PAA 36XiW CTD Si и миникомпьютера (Lenovo IdeaCentre Stick 300, Windows 8) в качестве регистратора. На миникомпьютере было установлено программное обеспечение к датчику PAA 36XiW CTD Si для измерения давления, температуры и электропроводимости воды на глубине 5 м с периодичностью 1 Гц.

В пьезометрической скв. 1303 (рис. 1Г) с мая 2021 г. проводятся измерения давления и температуры воды (датчик PAA 36XiW) на глубине 5 м с частотой 1 Гц. В качестве регистратора используется миникомпьютер Ultra-Slim Computer STCK1A8LFC, Windows 8, с установленным программным обеспечением к датчику.

Энергообеспечение комплектов оборудования осуществляется от смонтированных систем электропитания на основе солнечных батарей.

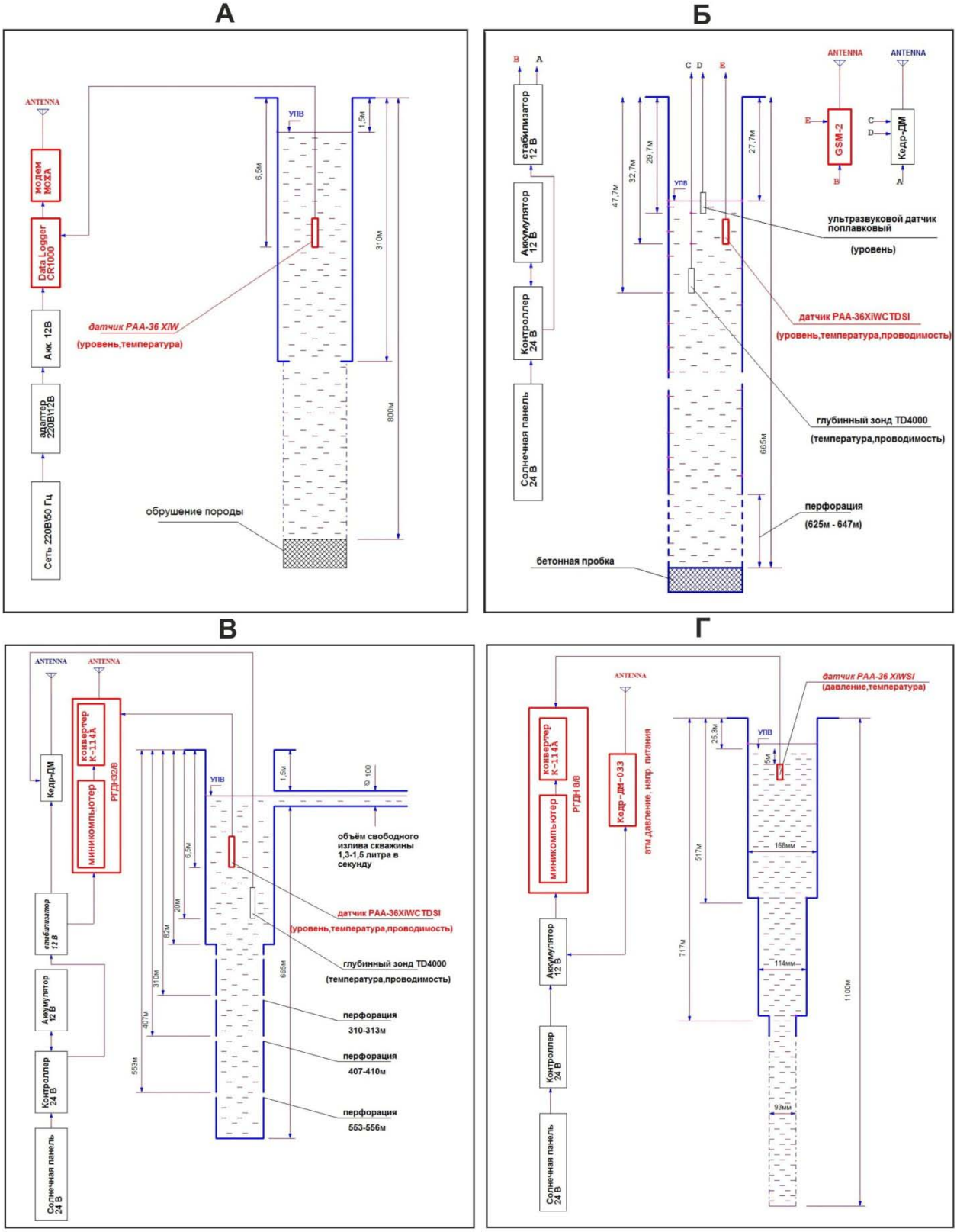


Рис. 1. Блок-схема оборудования скважин: А – ЮЗ-5; Б – Е-1; В – М-1; Г – 1303. Красным цветом показаны элементы, установленные в 2017 – 2020 гг. и обеспечивающие регистрацию давления, температуры и электропроводности подземной воды с частотой 0.01 – 20 Гц и передачу данных по каналам сотовой связи.

Характеристики комплектов оборудования

Во всех скважинах используются датчики производства Keller (Швейцария) (рис. 1): PAA-36 XiW CTD Si (датчик давления, температуры и электропроводимости воды) и PAA-36 XiW (датчик давления и температуры воды).

Рис. 2. Датчик давления, температуры и электропроводимости воды PAA36 XiW CTD Si производства фирмы Keller (Швейцария)

Характеристики датчиков:
– разрешающая способность датчика давления воды – 0.002 гПа при погрешности измерения 0.05%,
– разрешающая способность датчика температуры – 0.001 град. С при погрешности измерения 0.1%,
– разрешающая способность датчика электропроводности – 0.002 мСм/см при погрешности измерения 1%.

Рис. 3. Регистратор данных CR1000 производства Campbell Scientific Inc, США.

На скв. ЮЗ-5 установлен регистратор данных CR1000 (рис. 3). Регистрация производится с частотой 0.01–20 Гц. Данные записываются на CompactFlash карту и передаются в реальном времени на сервер КФ ФИЦ ЕГС РАН по сети сотовой связи. Настройка параметров регистрации, хранения и передачи данных осуществляется путем программирования в среде CRBasic. CR1000 имеет цифровой вход RS232, поэтому для подключения к нему датчиков фирмы Keller серии PAA36 требуется конвертер Keller K-114, преобразующий цифровой вход RS232 в RS485, в отличие от регистратора CR6 (работал раньше на этой скважине), у которого цифровой вход RS485 и использование конвертора не требуются. Стоимость комплекта оборудования составляет ~570 000 рублей.

Рис. 4. Автономный регистратор данных Keller GSM-2, Швейцария.

На скв. Е-1 установлен автономный регистратор данных Keller GSM-2 (рис. 4). Регистрация данных производится с периодичностью 2 мин. Данные записываются во внутреннюю память регистратора и сохраняются до двух недель, а также передаются на сервер посредством сетей сотовой связи. Регистратор GSM-2 имеет собственные элементы питания, замена которых осуществляется с частотой от 1 года до 10 лет в зависимости от настраиваемых параметров. При настройке регистрации данных с частотой 2 мин. и передачи данных каждые 20 мин., батарею питания необходимо менять 1 раз в 18 месяцев. Внешний блок питания приобретается отдельно. Стоимость комплекта оборудования составляет ~220 000 рублей.

На скважинах М-1 и 1303 в качестве регистраторов используются миникомпьютеры (рис. 5), на скв. М-1 – Lenovo 32GB of on-board storage (Windows 8), а на скв. 1303 – INTEL STCK1A8LFC 8GB of on-board storage (Windows 8). К миникомпьютерам подключены датчики (рис. 2): PAA-36 XiW CTD Si в скв. М-1 и PAA-36 XiW в скв. 1303.

Рис. 5 Миникомпьютер INTEL STCK1A8LFC 8GB of on-board storage.

Для обеспечения работы оборудования на скважинах, Кобзевым В.А. был создан комплекс, названный Регистратор Гидрогеодинамических Данных Наблюдений (РГДН) (рис. 6А), состоящий из пылевлагозащитного бокса, в котором размещены:

– миникомпьютер со встроенными модулями WiFi, Bluetooth и HDMI, позволяющими подключать внешние устройства, такие как монитор (рис. 6Б), планшет или ноутбук;

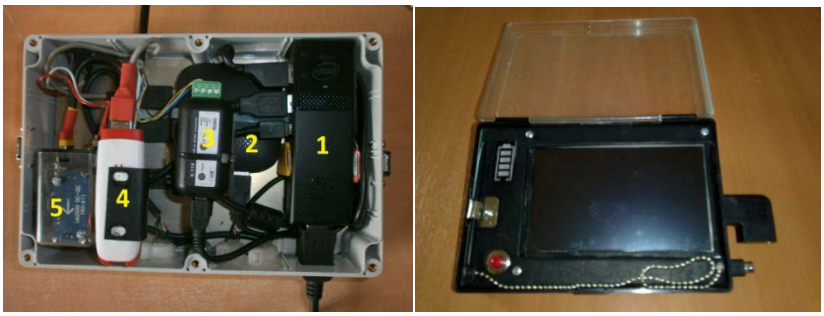
– конвертер Keller K-114, позволяющий подключать датчик (рис. 1) к миникомпьютеру, посредством преобразования цифрового выхода RS485 датчика к цифровому входу USB миникомпьютера;

– карта памяти Micro SD объемом 2 Гб и более для записи и накопления данных;

– 2-4G USB LTE модем для передачи данных по каналам сотовой связи и дистанционного управления миникомпьютером;

– USB Splitter hub 4 port для подключения к миникомпьютеру периферийного оборудования;

– стабилизатор LM 2596 HW-411 для обеспечения электропитания миникомпьютера и периферийного оборудования.



А **Б**

Рис. 6. **А** – Бокс РГДН: **1** – компьютер BOXSTK1A32SC 32GB of on-board storage с оперативной системой Windows 8; **2** – USB Splitter hub 4 port; **3** – конвертер Keller K-114; **4** – 2-4G USB LTE модем; **5** – стабилизатор LM 2596 HW-411. **Б** – Автономный мобильный монитор на основе емкостной сенсорной панели 5inch HDMI LCD.

Для обеспечения регистрации данных используется лицензионное программное обеспечение ControlCenterSeries30 (CCS30), поставляемое с датчиками Keller. Оно позволяет просматривать текущие данные на экране монитора в виде табличного и графического представления данных, накапливать и записывать их на твердотельную память, а также экспортировать в формат текстовых файлов и Windows Excel. Для автоматизации передачи данных по сети мобильной связи в Лабораторию геофизических исследований и запись их в базу данных на сервере КФ ФИЦ ЕГС РАН Коркиной Г.М. написано дополнительное программное обеспечение. Доступ к данным осуществляется посредством информационной системы POLYGON [2]. Регистрация данных может производится с частотой до 10 Гц. Стоимость комплекта оборудования составляет ~40 000 рублей.

На рис. 7 представлены изменения давления воды в скв. Е-1 по данным регистрации комплексом Кедр ДМ и с использованием датчика Keller PAA36 XiW CTD Si и регистратора GSM-2. Результаты синхронных измерений показывают одинаковые амплитуды роста давления воды в скважине за длительный период. Изменения суточной скорости вариаций давления также достаточно хорошо согласованы.

В течение модернизации скважинного оборудования в 2017 – 2021 гг. были получены записи вариаций давления при телесейсмических событиях с $M_w = 7.1 – 8.2$ в районах Аляски и Японии; при сильных местных событиях 25.03.2020 г., $M_w = 7.5$ и 16.03.2021 г., $M_w = 6.6$, а также при камчатских землетрясениях с $M_w \leq 5.2$. На рис. 8 представлены записи вариаций давления воды в трех скважинах в связи с землетрясением 29.07.2021 г. $M_w = 8.2$, $d_e = 2870$ км, Аляска, в сопоставлении с сейсмической записью на канале BHZ на с/ст. PET. В записях давления воды на всех скважинах хорошо выделяются вступления волн P, S и L, соответствующие их вступлениям на с/ст. PET.

Заключение

1. Выполненная в КФ ФИЦ ЕГС РАН модернизация системы наблюдений на четырех скважинах с использованием оборудования от ведущих зарубежных производителей, выводит этот метод геофизического мониторинга флюидонасыщенной геосреды на передовые позиции в Мире.
2. Особенностью проводимого эксперимента является использование различных комплектов оборудования, в т. ч. экономичного варианта регистрации параметров подземных вод, накопления и передачи данных с помощью миникомпьютера в качестве регистратора.
3. Получены высокочастотные данные по гидрогеосейсмическим вариациям давления подземной воды при землетрясениях в широком диапазоне магнитуд и эпицентральных расстояний.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21 и целевой программы «Развитие») с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

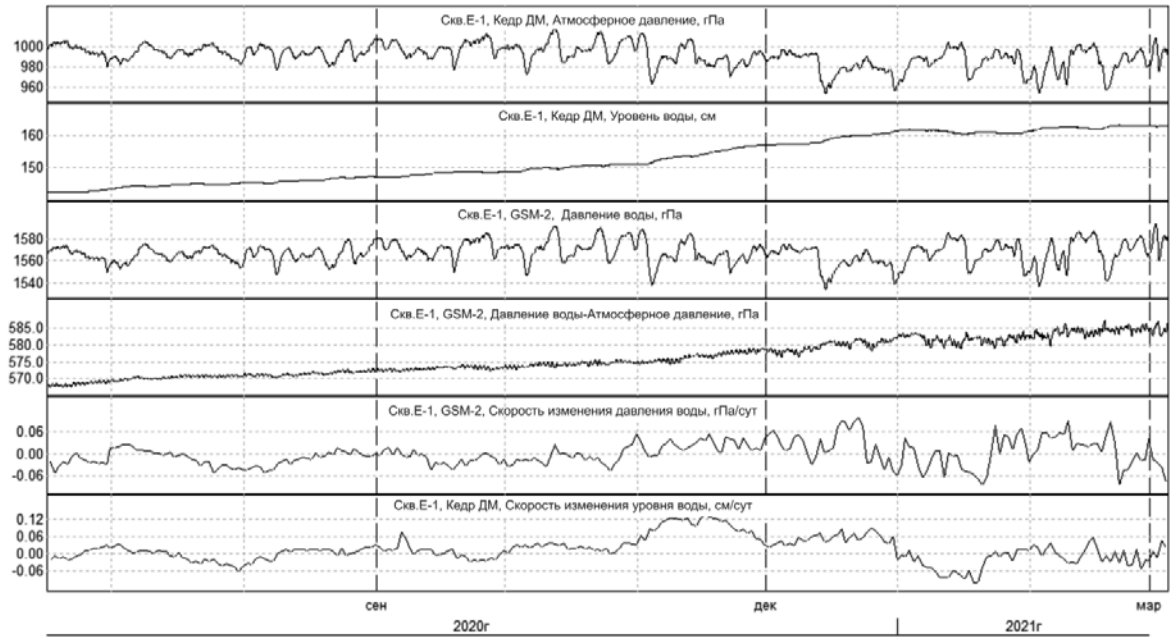


Рис. 7. Изменения уровня/давления воды и суточных скоростей их изменения в скв. Е-1 по данным цифрового комплекса Кедр ДМ и с использованием датчика Keller PAA36 XiW CTD Si и регистратора GSM-2.

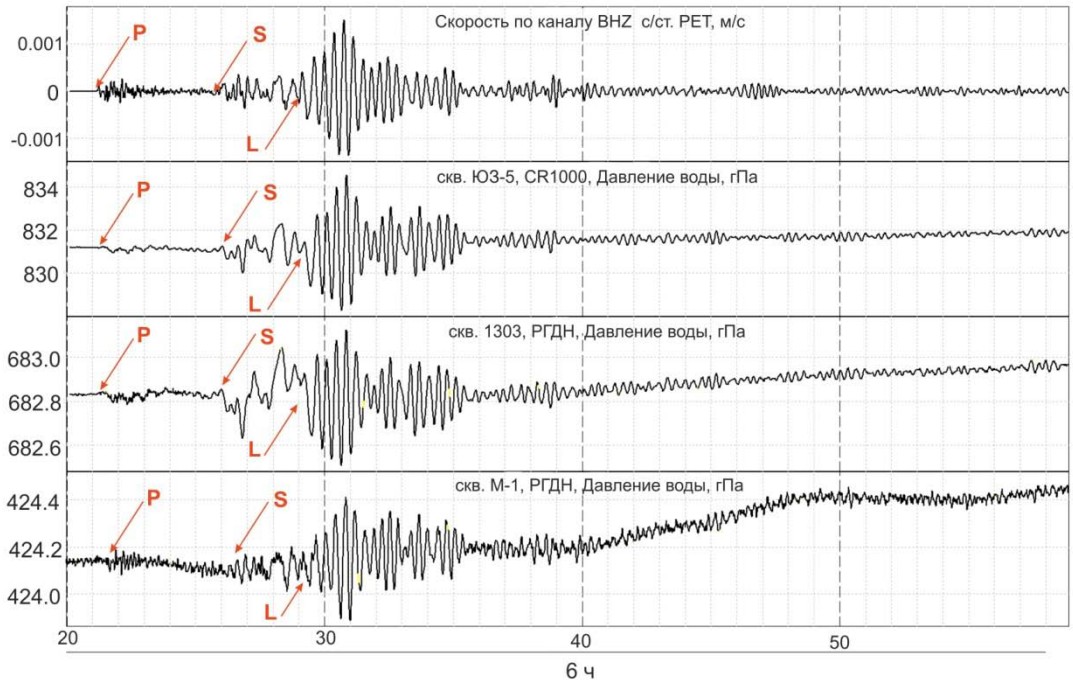


Рис. 8. Изменения давления воды в скважинах ЮЗ-5, 1303 и М-1 при землетрясении 29.07.2021 г. M_w = 8.2, d_e = 2870 км, Аляска, в сопоставлении с сейсмической записью на канале BHZ на с/ст. PET (датчик STS-1, 20 Гц). Вступление сейсмических волн P, S и L показано красными стрелками.

Список литературы

1. *Болдина С.В., Копылова Г.Н., Чубарова Е.Г.* Гидрогеодинамические эффекты сильных землетрясений 2017–2018 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Седьмой научно-техн. конф. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября–7 октября 2019 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 27–31.

2. *Копылова Г.*Н., *Болдина С.В*. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977 – 2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20. https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-20.

3. *Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смирнов А.А., Чубарова Е.Г.* Опыт регистрации вариаций уровня и физико-химических параметров подземных вод в пьезометрических скважинах, вызванных сильными землетрясениями (на примере Камчатки) // Сейсмические приборы. 2016. № 4. Т. 52. С. 43–56. https://doi.org/10.21455/si2016.4-4.

4. *Kopylova G. and Boldina S.* Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study From the Kamchatka Peninsula. Front. Earth Sci. 2020. 8:576017. https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017.

УДК 556.3+550.34

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНИКОМПЬЮТЕРА ТИПА STK-1 ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНАХ

Кобзев В.А., Коркина Г.М.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Петропавловск-Камчатский, kobzev@emsd.ru

Введение

На четырех скважинах ЮЗ-5, Е-1, М-1 и 1303 Петропавловск-Камчатского полигона Лабораторией геофизических исследований КФ ФИЦ ЕГС РАН производятся автоматизированные наблюдения за вариациями давления (уровня), температуры и электропроводимости подземной воды с целью изучения гидрогеологических предвестников, влияния землетрясений на подземные воды, а также разработки методов прогнозирования землетрясений [1-3]. Для этого используются комплекты оборудования, включающие в себя погружные высокочувствительные датчики PAA36 XiW CTD Si (давление, температура и электропроводность воды) и PAA36 XiW (давление и температура воды) фирмы Keller, Швейцария, и регистраторы данных типа CR1000 производства Campbell Scientific Inc, США (стоимость 573 тыс. руб.) и Keller GSM-2, Швейцария (стоимость 220 тыс. руб).

На самоизливающейся скважине М-1 в июле 2020 г. был установлен комплект аппаратуры в составе датчика PAA 36XiW CTD Si на глубине 5 м и миникомпьютера Lenovo 32GB of on-board storage, Windows 8 в качестве регистратора, обеспечивающего измерения с периодичностью 1 Гц. С мая 2021 г. в пьезометрической скважине 1303 проводятся измерения давления и температуры воды (датчик PAA 36XiW) на глубине 5 м с частотой 1 Гц с использованием миникомпьютера INTEL STCK1A8LFC 8GB of on-board storage, Windows 8 (рис. 1). В докладе приводится описание комплектов скважинного оборудования, в состав которых включены миникомпьютеры в качестве регистраторов.

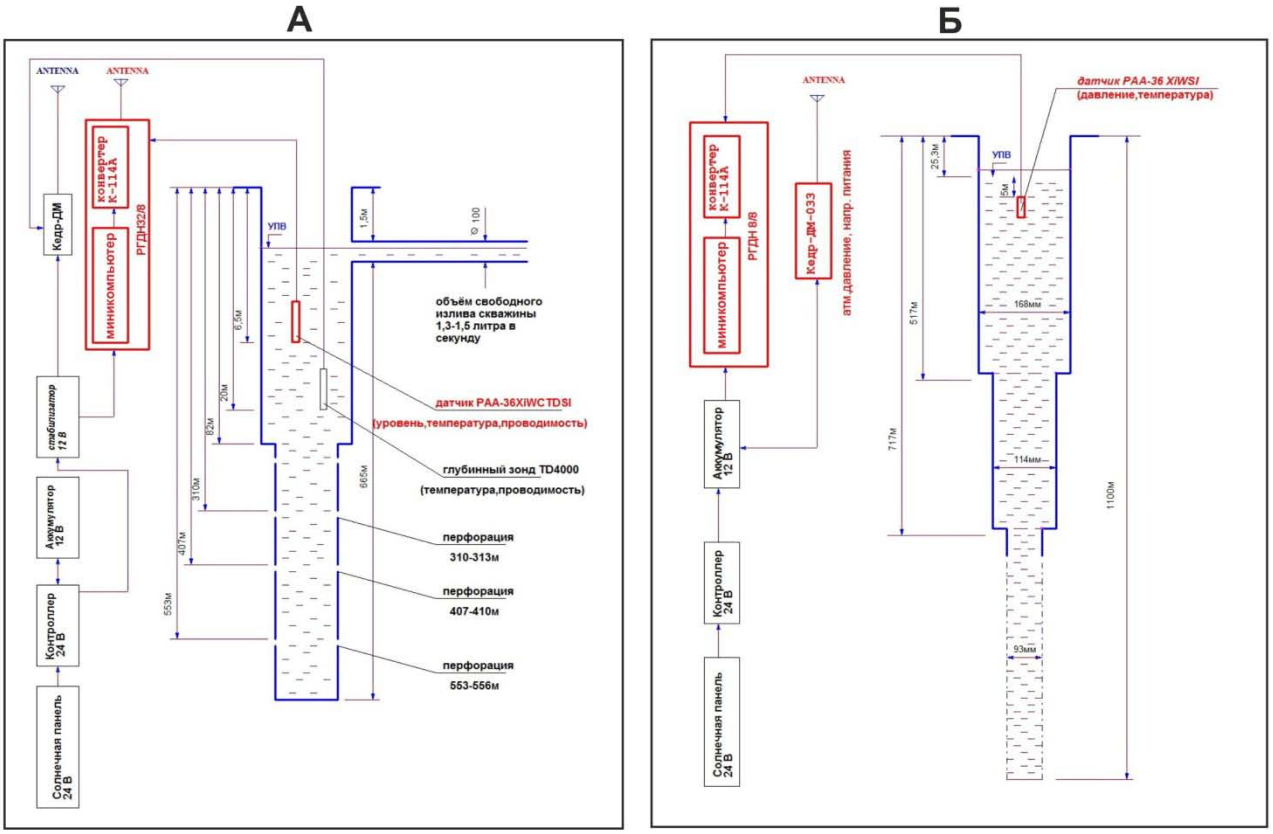


Рис. 1. Блок-схема оборудования скважин: А – М-1; Б – 1303. Красным цветом показаны элементы, установленные в 2020 – 2021 гг., в т. ч. РГДН (Регистратор Гидрогеодинамических Данных Наблюдений), обеспечивающие регистрацию параметров подземных вод с частотой 1 Гц и передачу данных по каналам сотовой связи.

Использование миникомпьютеров типа STK-1 в качестве регистратора

Технические особенности миникомпьютеров типа STK-1, которые позволяют их использование в условиях Петропавловск-Камчатского полигона (рис. 2):

– малые габариты;

– отсутствие вращающихся узлов и деталей, жесткий диск SSD;

– подключение периферийных устройств через USB порт;

– стандартное лицензионное программное обеспечение – ОС Windows, позволяющее использовать специализированное ПО для датчиков PAA-36 XiW CTD Si;

– расширенные коммуникативные возможности WiFi, Bluetooth, HDMI;

– возможность установки дополнительного ПО (стандартного и авторского);

– возможность накопления данных на твердотельную память и их передачу посредством телекоммуникационных сетей;

– малое энергопотребление;

– сравнительно небольшая стоимость.

Рис. 2. Миникомпьютер BOXSTK1A32SC 32GB of on-board storage.

Отсутствие в конструкции миникомпьютера вращающихся узлов и деталей, позволяет использовать его круглогодично в полевых условиях внутри защитных сооружений скважин.

Сконфигурированные В.А. Кобзевым комплексы оборудования в составе миникомпьютера и периферийного оборудования размещены в пылевлагозащитном боксе и получили наименование Регистратор Гидрогеодинамических Данных Наблюдений (далее РГДН), в который входят (рис. 3):

– миникомпьютер со встроенными специализированными модулями WiFi, Bluetooth и HDMI, обеспечивающими подключение внешних устройств, таких как монитор, планшет или ноутбук;

– конвертер Keller K-114, позволяющий подключать датчики PAA36 XiW CTD Si и PAA36 XW к миникомпьютеру, посредством преобразования цифрового выхода RS485 датчика к цифровому входу USB миникомпьютера;

– карта памяти Micro SD объемом от 2 Гб для записи и накопления регистрируемых данных;

– 2-4 G USB LTE модем, использующийся для передачи данных по каналам сотовой связи и дистанционного управления миникомпьютером;

– USB Splitter hub 4 port для подключения к миникомпьютеру периферийного оборудования;

– стабилизатор LM 2596 HW-411 для обеспечения электропитания миникомпьютера и периферийного оборудования.

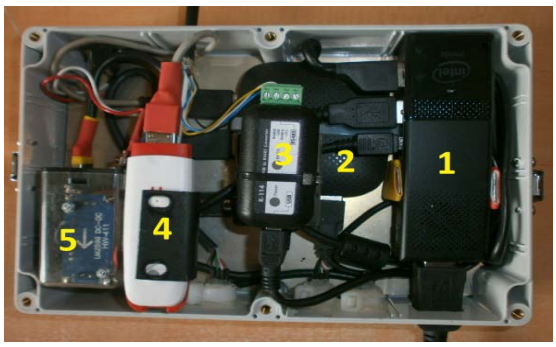


Рис. 3. Бокс РГДН: 1 – компьютер BOXSTK1A32SC 32GB of on-board storage с оперативной системой Windows 8; 2 – USB Splitter hub 4 port; 3 – конвертер Keller K-114; 4 – 2-4 G USB LTE модем; 5 – стабилизатор LM 2596 HW-411.

Всего было изготовлено три комплекса, отличающихся друг от друга объемом внутренней памяти миникомпьютера и ОС Windows:

– РГДН-32/10 на основе миникомпьютера BOXSTK1A32SC 32GB of on-board storage, Windows 10;

– РГДН-32/8 на основе миникомпьютера Lenovo 32GB of on-board storage, Windows 8;

– РГДН-8/8 на основе миникомпьютера INTEL STCK1A8LFC 8GB of on-board storage, Windows 8.

Для обеспечения регистрации данных используется лицензионное программное обеспечение ControlCenterSeries30 (CCS30), поставляемое фирмой Keller совместно с датчиками. ПО CCS30 устанавливает связь с датчиком, который подключен к миникомпьютеру через конвертер К-114 (рис. 3), позволяет просматривать на экране монитора в табличном и графическом представлении параметры подземных вод, регистрируемые датчиком в реальном времени, накапливать и записывать

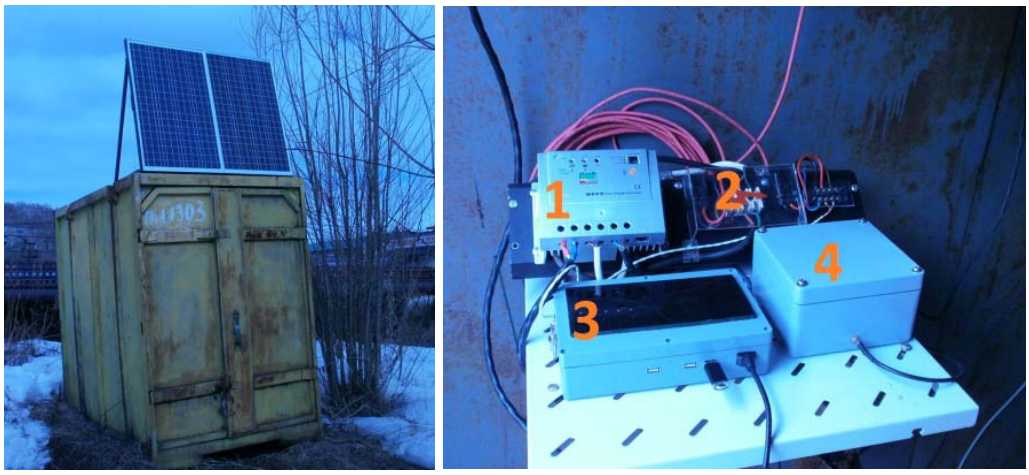
их на твердотельную память, а также экспортировать в форматы текстовых файлов и Windows Excel. Регистрация данных производится с частотой 1 Гц.

Для автоматизации передачи данных по сети мобильной связи в Лабораторию геофизических исследований и запись их в базу данных на сервер КФ ФИЦ ЕГС РАН Коркиной Г.М. написано дополнительное программное обеспечение для согласования работы ПО CCS30 с периферийными устройствами миникомпьютера, таких как карта памяти и USB модем. Передача данных на сервер осуществляется один раз в сутки. Доступ к данным осуществляется посредством информационной системы POLYGON [2].

Встроенные модули WiFi, Bluetooth, HDMI миникомпьютера позволяют подключать внешние устройства, такие как монитор, планшет или ноутбук. Кобзевым В.А. был создан более экономичный автономный мобильный монитор на основе емкостной сенсорной панели 5inch HDMI LCD (рис. 4). Сенсорная панель размещена в защитном корпусе совместно с аккумулятором питания, который обеспечивает автономную работу монитора в течение трех часов.

Рис. 4. Автономный мобильный монитор на основе емкостной сенсорной панели 5inch HDMI LCD.

РГДН совместно с подключенными периферийными устройствами потребляет электрический ток не более 2 А. Для энергообеспечения комплекса, на объектах наблюдений установлены системы электропитания на основе солнечных батарей (рис. 5А).



А **Б**

Рис. 5. Энергообеспечение скважины 1303: **А** – солнечные панели, установленные на крыше защитного сооружения; Б: 1 – контроллер солнечных панелей; 2 – блок предохранителей и распределительных клемных колодок; 3 – РГДН 8/8; 4 – регистратор Кедр ДМ.

Примеры регистрации данных

Для оценки качества данных регистрации давления подземной воды с использованием РГДН-8/8 и РГДН-32/8 на рис. 6 приводится запись землетрясения 29.07.2021 г., $M_w = 8.2$, $d_e = 2870$ км, Аляска, в сопоставлении с сейсмической записью на канале BHZ на с/ст. PET и записью вариаций давления с использованием регистратора CR1000, установленного на скважине ЮЗ-5.

В записях давления воды на всех трех скважинах хорошо выделяются сейсмические волны P, S и L, которые соответствуют временам вступления этих волн на сейсмостанции. Следует отметить идентичность формы записи гидрогеосейсмических вариаций давления в скважинах 1303 и М-1 с использованием РГДН и давления воды в скважине ЮЗ-5 с использованием CR-1000.

Заключение

Эксперимент по совмещению высокоточных датчиков фирмы Keller, Швейцария с миникомпьютерами в качестве регистраторов для проведения круглогодичных наблюдений за

давлением подземных вод в скважинах можно считать успешным. В результате выполненных работ и анализа полученных данных, очевидно, что комплексы оборудования РГДН, установленные на скважинах М-1 и 1303, обеспечивают качество данных наблюдений за вариациями давления, не уступающих образцам ведущих мировых производителей при существенном уменьшении стоимости регистраторов (не более 40 тыс. руб.). РГДН способен обеспечить гидрогеодинамические наблюдения на скважинах с частотой 1 Гц и, при необходимости, в более высокочастотном диапазоне.

Опыт эксплуатации РГДН в течение 14 месяцев, показал его высокую отказоустойчивость, а также простоту в установке и эксплуатации. Кроме этого, использование стандартного лицензионного ПО не требует от операторов дополнительных квалификационных навыков.

Комплекты оборудования для геофизических наблюдений на основе миникомпьютеров с соответствующей конфигурацией цифровых датчиков, можно использовать и при проведении других видов геофизических наблюдений, в частности, электротеллурических, газодинамических и пр.

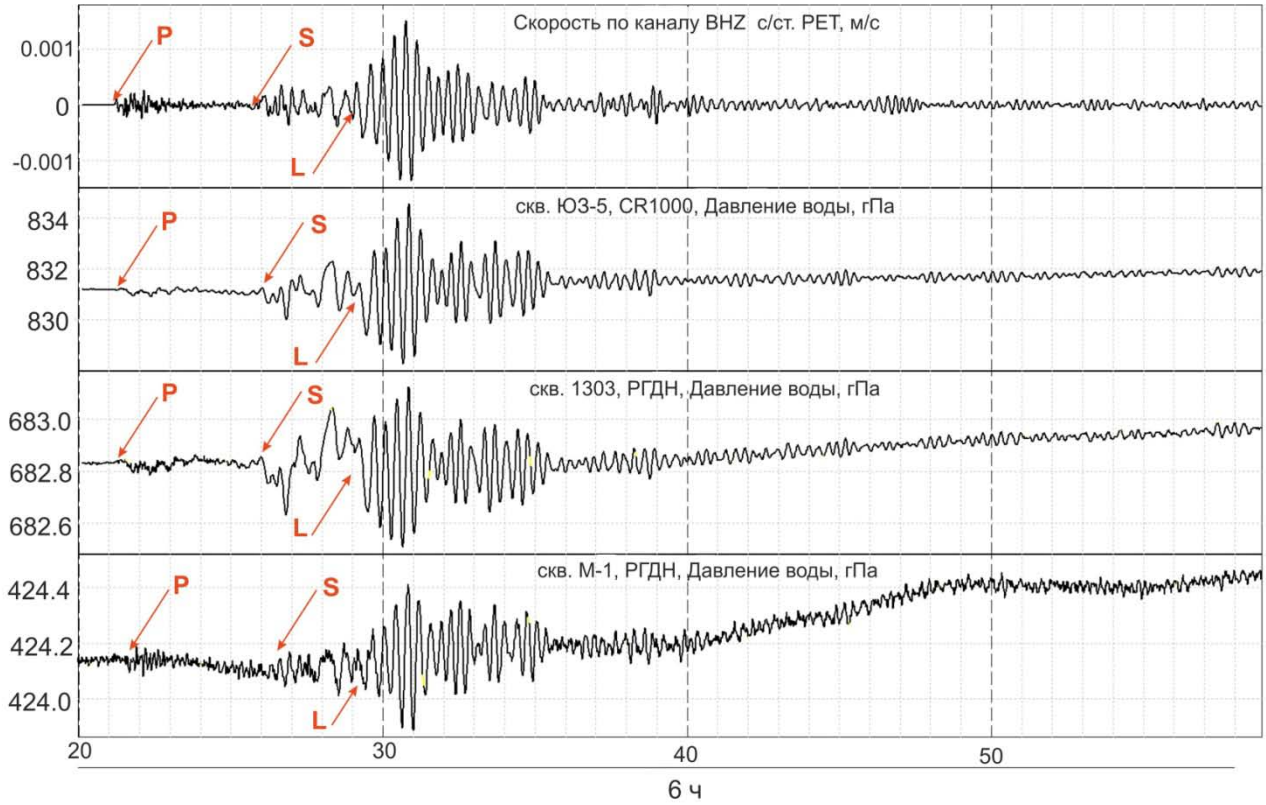


Рис. 6. Изменения давления воды в скважинах 1303 и М-1 при землетрясении 29.07.2021 г. M_w = 8.2, d_e = 2870 км, Аляска, зарегистрированные РГДН, в сопоставлении с вариациями давления в скважине ЮЗ-5 (CR-1000) и сейсмической записью на канале BHZ на с/ст. PET (датчик STS-1, 20 Гц). Вступление сейсмических волн P, S и L показано красными стрелками.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21 и целевой программы «Развитие») с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977 – 2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20. https://doi.org/10.31857/S0205-9614201923-20.

2. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Эффекты сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине: экспериментальные данные и модели // Физика Земли. 2020. № 4. С. 102–122.

3. *Kopylova G. and Boldina S.* Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study From the Kamchatka Peninsula. Front. Earth Sci. 2020. 8:576017. https://doi.org/10.3389/feart.2020.576017.

УДК 550.34

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РАДИОВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА В КФ ФИЦ ЕГС РАН

Копылова Г.Н.[1], Будилова Е.А. [1], Соловьева М.С. [2], Коркина Г.М. [1]

[1] Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, budilova@emsd.ru
[2] Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Введение

Мониторинг амплитудно-фазовых характеристик очень низкочастотных (ОНЧ) и низкочастотных (НЧ) радиосигналов по трассам, пересекающим сейсмоактивные области, рассматривается в качестве одного из перспективных методов краткосрочного прогноза сильных землетрясений [2]. Данные мониторинга амплитудно-фазовых характеристик ОНЧ/НЧ сигналов используются в задачах прогноза землетрясений, исследования влияния на ионосферу и атмосферу цунами и метеоцунами, солнечных затмений и событий космической погоды [3-7].

Мировая система таких наблюдений перекрывает все сейсмоактивные области Северного полушария, включая Тихоокеанский и Альпийско-Гималайский сейсмические пояса [1]. Для локализации литосферных источников возмущения используются сети ОНЧ/НЧ-излучателей и приемников с взаимно пересекающимися трассами для приема радиосигналов от одних и тех же передатчиков на всех входящих в сеть приемниках.

На полуострове Камчатка мониторинг амплитудно-фазовых характеристик ОНЧ/НЧ сигналов ведется с помощью системы OmniPAL непрерывно с 2000 г. Регистрация данных осуществляется на приемном пункте РТК (г. Петропавловск-Камчатский) на базе Камчатского филиала Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН" (КФ ФИЦ ЕГС РАН). В 2017 г. создан пополняемый цифровой архив и база данных наблюдений ОНЧ/НЧ радиосигналов системы OmniPAL, регистрируемых на приемном пункте РТК за все время наблюдений (http://www.gsras.ru/new/infres/).

В 2019 г. была осуществлена модернизация программно-аппаратного комплекса приемного центра РТК и запуск в эксплуатацию системы радиоволнового мониторинга UltraMSK. Система UltraMSK позволила увеличить число контролируемых радиотрасс в северо-западной части Тихоокеанского сейсмического пояса с четырех до десяти.

В данной работе представлено описание системы ОНЧ/НЧ радиоволнового мониторинга в приемном пункте РТК и приведены результаты оценки идентичности амплитудных характеристик радиосигналов, полученных с помощью систем OmniPAL и UltraMSK за апрель 2021 г.

Описание системы ОНЧ/НЧ радиоволнового мониторинга в приемном пункте РТК

В апреле 2000 г. в г. Петропавловске-Камчатском совместно сотрудниками КФ ФИЦ ЕГС РАН и ИФЗ РАН был установлен приемник ОНЧ/НЧ-сигналов системы OmniPAL (далее приемный пункт РТК, 53.066ºс.ш., 158.605ºв.д.). Целью работ было изучение локальных возмущений в атмосфере и ионосфере, связанных с землетрясениями, извержениями вулканов и цунами на фоне процессов атмосферной циркуляции и влияния солнечной активности [1].

Система приема данных OmniPAL включает персональный компьютер с DSP-платой; антенно-фидерное устройство, связанное со входом предварительного усилителя длинноволнового радиоприемника DSP; приемник точного времени GPS с антенно-фидерным устройством; вторичный источник питания ±0...25 В, предназначенный для питания предусилителя; трансформатор 220 В/100 В, предназначенный для питания дисплея компьютера и GPS-приемника; источник бесперебойного питания; осциллограф. С использованием этого оборудования осуществляется непрерывный мониторинг ОНЧ/НЧ-сигналов по четырем трассам от передатчиков JJY (40 кГц) и JJI (22.2 кГц) в Японии, NWC (19.8 кГц) в Австралии и NPM (21.4 кГц) на Гавайских островах, пересекающим Курило-Камчатский регион и район Японских островов (рис. 1).

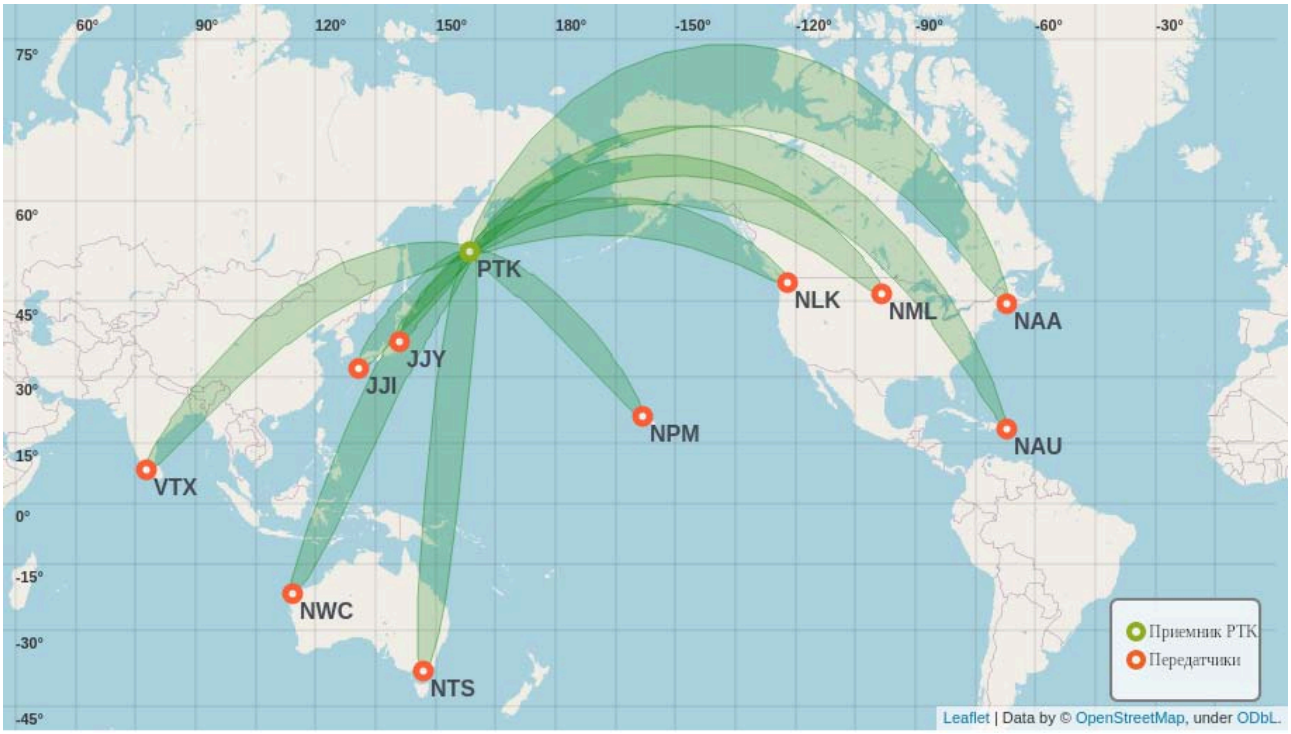


Рис. 1. Расположение приемного пункта PTK и передатчиков

Пополняемый цифровой архив данных, регистрируемых системой OmniPAL, за весь период работы приемного пункта PTK был создан в 2017 г. и включен в состав информационных ресурсов ФИЦ ЕГС РАН (http://www.gsras.ru/new/infres/).

Система радиоволнового мониторинга UltraMSK была установлена на пункте PTK в 2019 г. при участии к.ф.-м.н. А.А. Рожного, ИФЗ РАН. Для этого был модернизирован программно-аппаратный комплекс приемного пункта для использования возможностей мировой системы радиоволнового мониторинга UltraMSK, которая применяется в научных исследованиях по дистанционному зондированию ионосферы и магнитосферы.

С использованием UltraMSK измеряются фаза и амплитуда узкополосных ОНЧ-радиосигналов с модуляцией MSK (Minimum Shift Keying) с выводом данных в формате ascii. UltraMSK реализована программно и работает на стандартном аудиооборудовании современных персональных компьютеров (http://ultramsk.com/). На пункте PTK система регистрации функционирует на ПК под управлением ОС Linux с использованием имеющейся инфраструктуры установленных ранее ОНЧ-антенны и GPS приемника.

Использование UltraMSK позволило обеспечить регистрацию сигналов еще с 6-ти передатчиков: VTX (17 кГц) в Индии, NTS (18.6 кГц) в Австралии, NAA (24 кГц), NLK (24.8 кГц) и NML (25.2 кГц) в США и NAU (40.8 кГц) в Пуэрто-Рико (всего 10 радиотрасс) (рис. 1).

Пополняемый цифровой архив данных, регистрируемых системой UltraMSK с 2020 г. также включен в состав информационных ресурсов ФИЦ ЕГС РАН (http://www.gsras.ru/new/infres/).

Схема получения и обработки данных на приемном пункте PTK показана на рис. 2.

Для обработки и анализа данных радиоволнового мониторинга используется комплекс программ, созданных А.А. Рожным и М.С. Соловьевой (ИФЗ РАН) и переданных в 2019 г. в КФ ФИЦ ЕГС. С использованием полученных программных средств и дополнительных программ, созданных сотрудниками КФ ФИЦ ЕГС РАН, производится оперативная обработка данных, поступающих с систем OmniPAL и UltraMSK, пополнение архивов и базы данных.

Методика исследования и результаты

Для оценки идентичности амплитудных характеристик радиосигналов, полученных с помощью систем OmniPAL и UltraMSK был выбран произвольный период длительностью один месяц - апрель 2021 г. Анализировались данные радиотрасс JJI-PTK, JJY-PTK, NPM-PTK, NWC-PTK, поскольку система OmniPal регистрирует данные только этих четырех трасс (рис. 3-6а-б).

Рис. 2. Схема получения и обработки данных на приемном пункте РТК

Для каждой трассы было построено корреляционное поле (рис. 3-6в) для оценки взаимосвязи данных, полученных с помощью систем UltraMSK и OmniPAL. Для трасс JJI-PTK, JJY-PTK, NPM-PTK присутствует положительная корреляция амплитудных характеристик радиосигналов (рис.3-5в). Коэффициент корреляции составил 0.93 для трассы JJI-PTK, 0.95 – для трассы JJY-PTK, 0.77 – для трассы NPM-PTK. Для трассы NWC-PTK корреляционное поле значительно отличается от остальных трасс (рис. 6в) и коэффициент корреляции составил 0.47.

Таким образом, анализ данных регистрации амплитудных характеристик, полученных с помощью двух систем наблюдений за апрель 2021 г. показал высокую степень их идентичности для радиотрасс JJI-PTK и JJY-PTK, проходящих в высокосейсмичном районе Японских островов и Курило-Камчатской зоны. За анализируемый период времени на трассах NPM-PTK (рис. 5) и NWC-PTK (рис. 6) наблюдается невысокое качество радиосигналов, зарегистрированных системой OmniPAL.

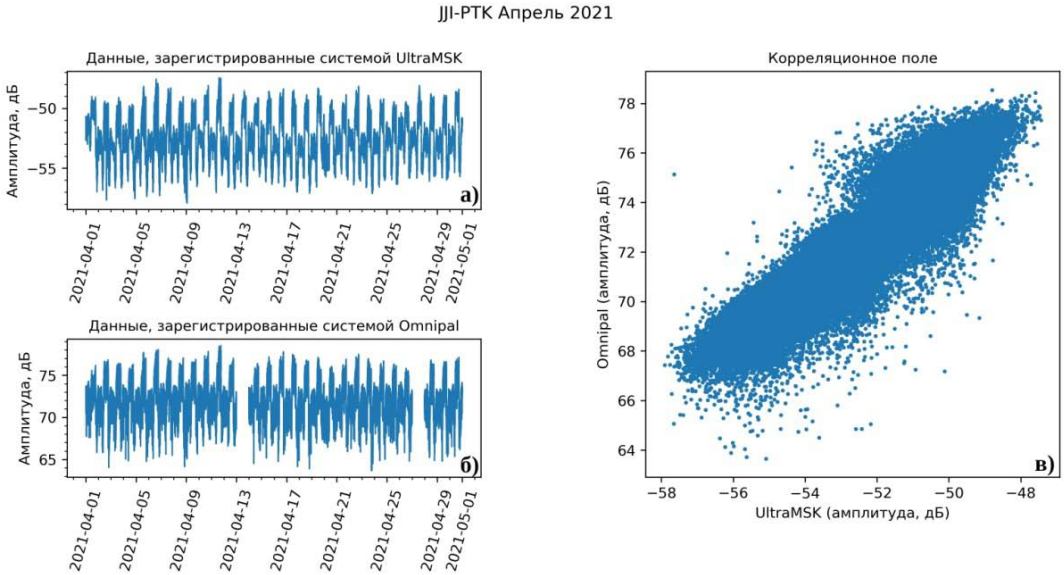


Рис. 3. Амплитуда сигнала (трасса JJI - PTK), зарегистрированного с помощью системы UltraMSK (а) и OmniPal (б) и корреляционное поле (в) за апрель 2021 г. Коэффициент линейной корреляции между данными двух систем составляет 0.93.

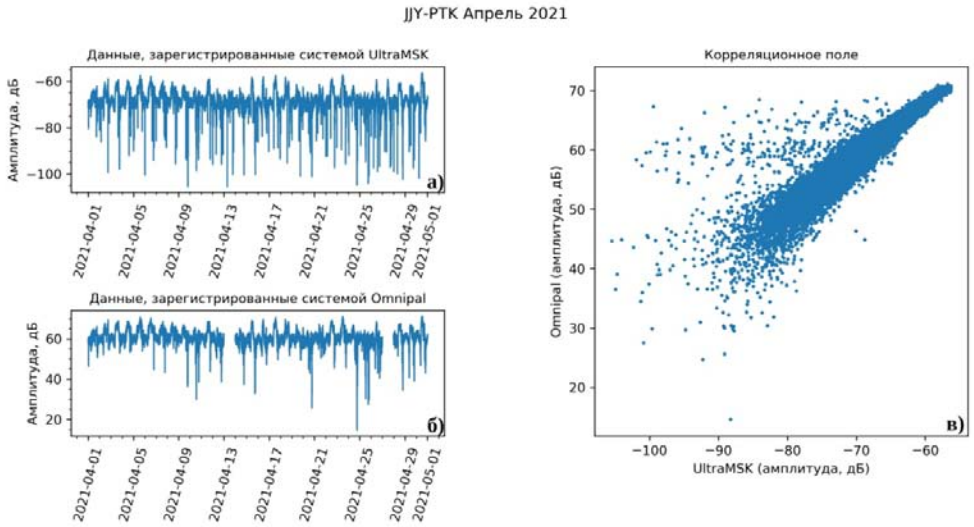


Рис. 4. Амплитуда сигнала (трасса JJY - PTK), зарегистрированного с помощью системы UltraMSK (а) и OmniPal (б) и корреляционное поле (в) за апрель 2021 г. Коэффициент линейной корреляции между данными двух систем составляет 0.95.

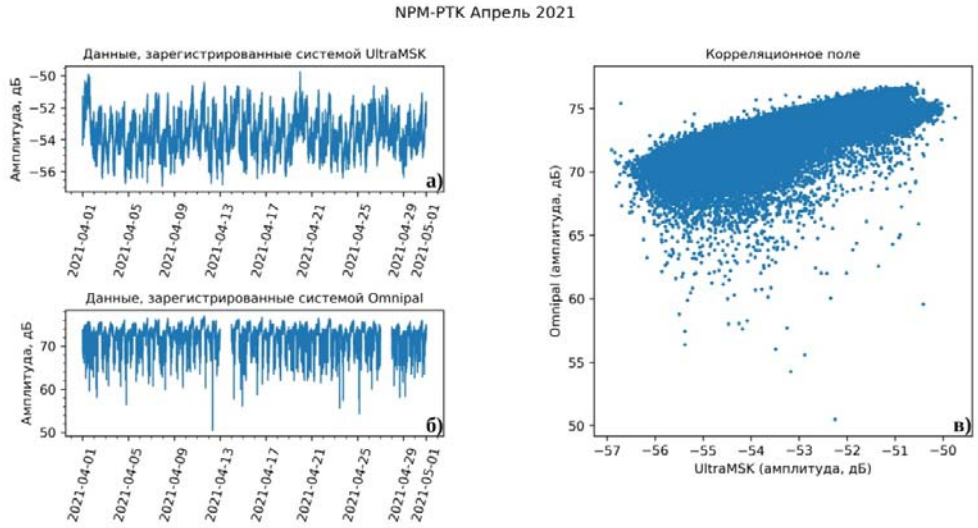


Рис. 5. Амплитуда сигнала (трасса NPM - PTK), зарегистрированного с помощью системы UltraMSK (а) и OmniPal (б) и корреляционное поле (в) за апрель 2021 г. Коэффициент линейной корреляции между данными двух систем составляет 0.77.

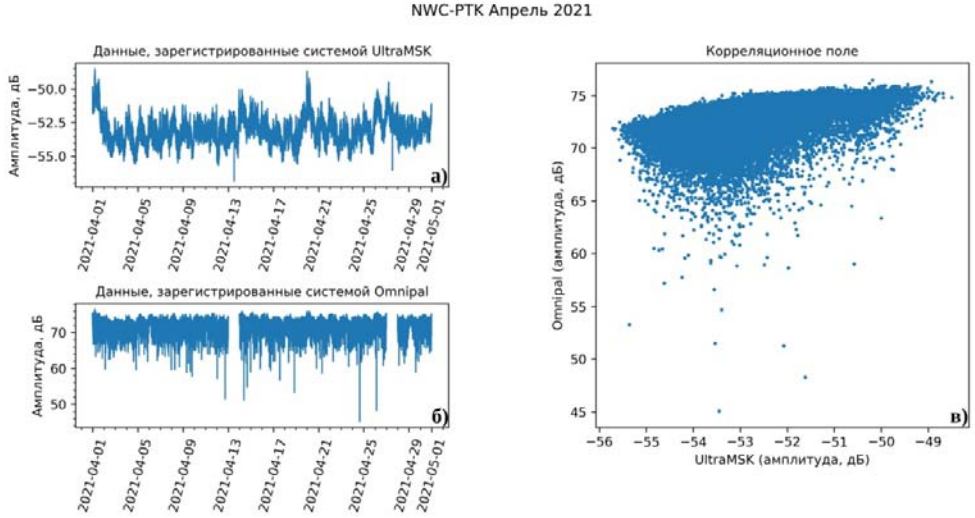


Рис. 6. Амплитуда сигнала (трасса NWC - PTK), зарегистрированного с помощью системы UltraMSK (а) и OmniPal (б) и корреляционное поле (в) за апрель 2021 г. Коэффициент линейной корреляции между данными двух систем составляет 0.47.

Заключение

В настоящее время система мониторинга амплитудно-фазовых характеристик ОНЧ/НЧ сигналов UltraMSK, используемая на приемном пункте РТК, обеспечивает регистрацию сигналов от 10-ти передатчиков, что позволяет проводить совместный анализ данных нескольких радиотрасс и выделять эффекты, проявившиеся одновременно на нескольких трассах.

Важной исследовательской задачей является ретроспективная обработка многолетнего архива наблюдений по четырем радиотрассам, полученного с помощью системы OmniPal. Выполненный анализ данных регистрации амплитудных характеристик двух систем наблюдений для апреля 2021 г. показал высокую степень их идентичности для двух радиотрасс, проходящих в высокосейсмичном районе Японских островов и Курило-Камчатской зоны. Работы по анализу идентичности данных регистрации ОНЧ/НЧ радиосигналов двумя системами наблюдений будут продолжены.

В задачи дальнейших исследований, направленных на создание метода оперативной диагностики аномалий ионосферы, вызванных сильными землетрясениями и их подготовкой, также входит изучение влияния метеоусловий, космической погоды, сильных землетрясений и извержений вулканов на поведение временных рядов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам КФ ФИЦ ЕГС РАН, обеспечивающим техническое обслуживание пункта РТК.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21).

Список литературы

1. *Рожной А.А., Соловьева М.С., Чебров Д.В. и др.* Сейсмо-ионосферные возмущения в распространении ОНЧ-сигнала в связи с двумя индонезийскими землетрясениями в августе и сентябре 2018 года // Вестник ДВО РАН. 2019. № 2. С. 56–61.

2. *Contadakis M., Arabelos D., Vergos G. et al.* Ionospheric turbulence from TEC variations and VLF/LF transmitter signal observations before and during the destructive seismic activity of August and October 2016 in Central Italy // Annals of Geophysics. 2020. V. 63. № 5. PA546.

3. *Rozhnoi A., Hayakawa M., Solovieva M. et al.* Ionospheric effects of the Mt. Kirishima volcanic eruption as seen from subionospheric VLF observations // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2014. V. 107. P. 54–59.

4. *Rozhnoi A., Shalimov S., Solovieva M. et al.* Tsunami-induced phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A09313.

5. *Rozhnoi A., Solovieva M., Fedun V. et al.* Correlation of very low and low frequency signal variations at mid-latitudes with magnetic activity and outer-zone particles // Ann. Geophys. 2014. V. 32. P. 1455–1462.

6. *Rozhnoi A., Solovieva M., Fedun V. et al.* Strong influence of solar X-ray flares on low-frequency electromagnetic signals in middle latitudes // Annales Geophysicae. 2019. V. 37. P. 843–850.

7. *Rozhnoi A., Solovieva M., Shalimov S. et al.* The effect of the 21 August 2017 total solar eclipse on the phase of VLF/LF signals // Earth and Space Science. 2020. V. 7. e2019EA000839.

УДК 550

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ УДАЛЁННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Наумов С.Б., Титов Е.М.

Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН» (ФИЦ ЕГС РАН),
г. Владивосток, revtrud@yandex.ru

Введение

При эксплуатации удалённых и труднодоступных сейсмических станций существуют особенности и проблемы по эксплуатации таких станций, их можно отнести к постоянным, системным проблемам.

Особенности эксплуатации удалённых сейсмических станций:

- проявление вандализма;
- не регулярное проведение регламентов по техническому обслуживанию;
- невозможность оперативного управления станциями;
- нет возможности подготовить станцию к прогнозируемым неблагоприятным погодным явлениям. В процессе эксплуатации удалённых сейсмических станций, ряд этих проблем удалось решить, иногда простыми способами, а порой разработкой сложных технических устройств.

Решение проблем вандализма

Избавиться от вандализма, на наш взгляд, можно путём рационального размещения сейсмических станций. Как правило, установить сейсмическую станцию в нужном месте не всегда возможно по ряду причин, это отсутствие стабильного электропитания и устойчивой связи в нужном месте. Но на первом месте вандализм, если он будет проявляться, то проблемы с электропитанием и со связью решать уже не придётся.

Первый способ уйти от вандализма, это размещать сейсмические станции на объектах обитаемых людьми, чтобы станция была под присмотром или ещё лучше под охраной. И такие объекты нашлись, в нашем случае это объекты ДВО РАН, метеостанции Приморского УГМС, объекты муниципальной собственности, начиная от детских садов и заканчивая зданиями самих администраций и объекты крупного состоявшегося бизнеса. Как правило, в большинстве случаев эти объекты имеют промышленное электропитание и с ними, возможно, организовать надёжную связь. Руководители этих предприятий идут на встречу, при разъяснении им рациональности размещения сейсмической станции на их объектах. Из десяти обращений был получен один отказ. От сюда вытекает статистика, что десять процентов случаев решить проблему вандализма таким путём будут неудачными.

На Рис.1 показана сейсмическая станция «Посьет». Размещённая на территории метеорологической станции Приморского УГМС, в посёлке Посьет. Один из удачных случаев решения проблем удалённых станций. Там есть всё и охрана, и связь, и электропитание.

Рис. 1. Сейсмическая станция «Посьет»

Второй способ не подвергать сейсмическую станцию вандализму мы выбрали тщательную маскировку. Нужно сделать так, что бы вандалы, находясь рядом со станцией, не видел её. Единственное, что можно сделать в этом случае, это закопать станцию. Такой метод неудобный, затратный и возникает риск потерять станцию.

Первое, что необходимо это обеспечить надёжную гидроизоляцию всего оборудования. Второе, необходимы мощные, большой ёмкости аккумуляторы, которые периодически необходимо менять. Замена аккумуляторов влечёт за собой восстановление гидроизоляции. Третье, это обустройство GPS антенны таким образом, что бы она видела спутники, на это влияет и выбор места, где закапывать станцию. Но при необходимости приходится использовать и такой метод.

Из достоинств этого метода эксплуатации сейсмической станции, это полная независимость от третьих лиц и второе возможность установить станцию максимально приблизив её к координатам, оптимально удовлетворяющим процесс мониторинга местности. На Рис. 2. и Рис. 3., показан пример установки сейсмической станции в тайге, в Хабаровском крае.

Рис. 2. Сейсмический датчик помещён в герметичный контейнер

Рис. 3. Место расположения станции тщательно маскируется

Техническое обслуживание.

Это вторая проблема удалённых сейсмических станций, решать которую приходиться следующим образом. Самое главное это выбор оборудования. Имея опыт эксплуатации оборудования различных производителей, для устройства именно удалённых и труднодоступных сейсмических станций мы отдаём предпочтение компании Guralp. В частности на наших наблюдательных пунктах в труднодоступных районах стоят велосиметры, широкополосные трёхкомпонентные со встроенным регистратором CMG-6TDE, предназначены для измерения скорости низкочастотных сейсмических колебаний. Велосиметр состоит из трёх однокомпонентных датчиков, встроенного цифрового преобразователя и калибратора, расположенных в общем герметичном корпусе.

А также, акселерометр CMG-5TDE, состоит из датчика, имеющего три ортогонально расположенные оси чувствительности, что позволяет получать данные сразу по трем направлениям: север-юг, восток-запад и в вертикальном направлении. Датчик установлен внутри герметичного корпуса.

Эти приборы надёжные в эксплуатации, хорошо переносят транспортировку на любом виде транспорта и, в общем-то, кроме чистки от пыли и грязи другого обслуживания не требуют. Но, тем не менее, данное оборудование очень дорогое и условия эксплуатации должны быть созданы оптимально комфортные, согласно технической документации, особое внимание необходимо обращать на источники питания, они должны быть стабильные, исключающие скачки напряжения. Тогда и техобслуживание будет минимальным и срок эксплуатации увеличится.

Как пример можно привести обустройство удалённой сейсмической станции «Полтавка» в Октябрьском районе, Приморского края. На этой станции используется сейсмометр CMG-40T и цифровой регистратор QUANTERRA Q330HRS, производитель компания Kinemetrics, США. Дополнительное оборудование, смонтированное на станции, Рис. 4.[1], позволяет контролировать и управлять станцией по интернет каналу и каналу сотовой связи. Источник бесперебойного питания с аккумулятором большой ёмкости сглаживает переходные процессы в системе электропитания. Контроллер «МИРАЖ-GSM-A8-03» с блоком реле и датчиками позволяет дистанционно контролировать работоспособность и управлять сейсмометром и регистратором, контролировать исправность ИБП и состояние промышленной сети. При открытии и закрытии двери блока-бокса, формируется сигнал тревоги и передаётся по сотовой связи ответственному лицу. Дистанционно контролируется температура в нутрии блока-бокса и температура регистратора [2]. Также дистанционно можно включить приборы отопления или кондиционер.

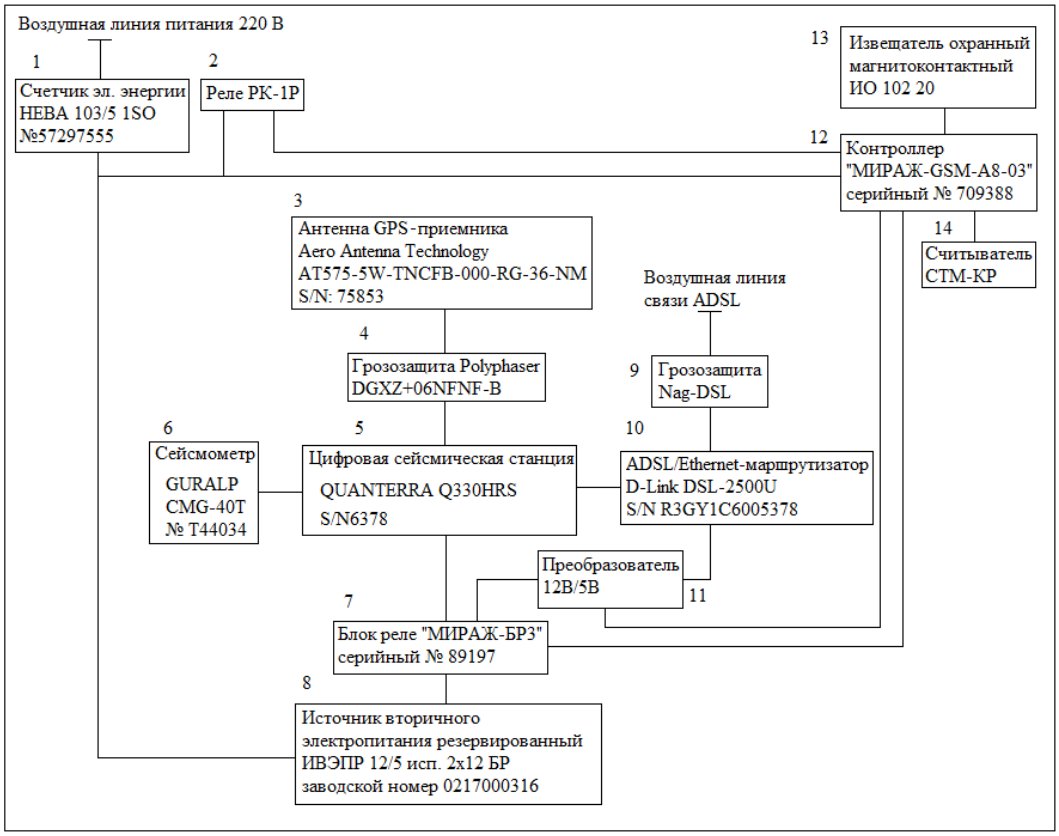


Рис. 4. Функциональная схема сейсмической станции «Полтавка»

Проблема погодных явлений

Это третье с чем приходится сталкиваться при эксплуатации удалённых сейсмических станций. Про ливневые дожди и ураганный ветер много говорить не приходится, тут всё понятно, надежная крыша, хороший водоотвод и укрепление самого сооружения от ветровых нагрузок.

Мы столкнулись с такой проблемой как конденсат, выпадающий внутри блока-бокса. Сам блок-бокс сделан из сэндвич панелей с утеплителем толщиной 10 см. и в целом этого хватает, чтобы не происходило резкое изменение температуры в нутрии блока-бокса. Но металлические детали имеющие мостик холода с внешней средой покрываются конденсатом. Решение нашлось случайно, всё оборудование и регистратор, смонтированы на одном монтажном щите, чтобы меньше пылилось оборудование, накрыли щит лёгким, проникающим куском материи. И оказалось, что тепла от оборудования, скапливающегося под материей вполне достаточно, что бы конденсат ни выпадал на оборудование. Разница в температуре над материей и под материей буквально в $1C^0$.

Ещё с одним неприятным природным явлением столкнулись, это грозы. Спасли нас от выхода из строя коммутационного оборудования приборы грозозащиты. Конечно, их пришлось заменить, но свою функцию они выполнили. Был случай, когда роль прибора грозозащиты выполнил сплиттер в ADSL линии, контакты слабые, тонкие расплавились при разряде молнии. После этого мы грозозащитой не пренебрегаем.

Заключение

1. Даже удалённые и труднодоступные станции должны быть под наблюдением и хорошо технически оборудованы.

2. Не допускать длительной эксплуатации станции без полной охраны, большой риск потерять оборудование.

Список литературы

1. *Титов Е.М., Наумов С.Б.* Коммутационное устройство удалённого доступа к сейсмической станции //«Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска». Южно-Сахалинск: Дальнаука, 2015г. С. 455–458.

2. Отчётная документация РИОЦ «Владивосток» // Акт о размещении и использовании технических средств по наблюдению за землетрясениями. № 254 от 29 февраля 2017г.

УДК 550.34+004.42

СЕРВИС ДЛЯ СОЗДАНИЯ, СБОРА И ХРАНЕНИЯ ОПРОСОВ НА ПРИМЕРЕ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ОПРОСНИКА

Фараонов А.А., Матвеенко Е.А., Митюшкина С.В., Ромашева Е.И., Чемарев А.С.

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
dervined95@gmail.com*

Введение

Сервис для создания, сбора и хранения опросов предназначен для получения информации о макросейсмических проявлениях землетрясений, а также позволяет создавать анкеты по произвольной тематике. Он является следующим шагом в развитии макросейсмического интернет-опросника, разработанного в лаборатории сводной обработки КФ ФИЦ ЕГС РАН в 2011 году [2].

Макросейсмический опросник представляет собой инструмент для сбора данных о результатах воздействия землетрясения на поверхность земли (рельеф, грунт) и находящиеся на ней различные объекты (людей, предметы быта, здания, инженерные сооружения и т.п.). Такого вида данные называются макросейсмическими и используются при оценках сейсмических воздействий, сейсмической опасности и в антисейсмическом проектировании, а также в исследовании исторических землетрясений [2].

Структура вопросов, существующая в интернет-опроснике 2011 года, основана на шкале сейсмической интенсивности (ШСИ) «MSK-64» [1]. Стоит отметить, что ШСИ «MSK-64» была опубликована в 1964 году и до 2017 года являлась единственной официально действующей шкалой на территории Российской Федерации.

С 1 сентября 2017 года начал действовать национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р57546-2017 «Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности» (ШСИ-17). Главным отличием нового стандарта от ШСИ «MSK-64» является закрепленная методика оценки интенсивности, которая может использоваться для автоматической обработки.

Начало действия новых стандартов является одной из главных причин для создания нового макросейсмического интернет-опросника.

Другими причинами являются, то, что в процессе работы действующего интернет-опросника были выявлены недостатки, требующие изменения его логической структуры и приведение в соответствие современным техническим требованиям к веб-приложениям, а также приведение в соответствие с последними трендами в веб-дизайне.

Анализ аналогичных проектов

Перед началом разработки проекта были просмотрены сервисы для сбора макросейсмической информации следующих организации: Британская геологическая служба (BGS) [1], Геологическая служба Соединенных Штатов (USGS) [2], Европейско-средиземноморская сейсмологический центр (EMSC / CSEM)[3], Геологическая служба Новой Зеландии (EQC)[4], Кольский филиал ФИЦ ЕГС РАН[5], Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН[6], Северо-Осетинский филиал ФИЦ ЕГС РАН[7], Дагестанский филиал ФИЦ ЕГС РАН[8].

Анализ макросейсмических опросников упомянутых выше организаций, а также интернет-опросника КФ ФИЦ ЕГС РАН 2011 г. позволил создать обобщенный список их плюсов и минусов.

Минусы:

1. Отсутствие корректного отображения сервиса на мобильном устройстве.
2. Некорректная структура отступов, что затрудняет или не позволяет визуально определить принадлежность элемента к определенной группе.

[1] Британская геологическая служба – earthquake.bgs.ac.uk
[2] Геологическая служба Соединенных Штатов – earthquake.usgs.gov
[3] Европейско-средиземноморская сейсмологический центр – emsc.eu
[4] Геологическая служба Новой Зеландии – felt.geonet.org.nz
[5] Кольский филиал ФИЦ ЕГС РАН – www.krsc.ru/?q=ru/questionnaire
[6] Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН – seis-bykl.ru/modules.php?name=Anketa
[7] Северо-Осетинский филиал ФИЦ ЕГС РАН – sofgsras.ru/dlya-naseleniya/soobshchit-o-zemletryasenii
[8] Дагестанский филиал ФИЦ ЕГС РАН – dbgsras.ru/site/answers

3. Отображение всех вопросов анкеты на одной странице, что перегружает внимание пользователя и снижает мотивацию заполнения им анкеты.

4. Возможность выбора ответа, противоречивающего предыдущим.

5. Несоответствие современному ГОСТу по обработке и интерпретации макросейсмических данных.

6. Сохранение результатов анкеты в виде коэффициентов соответствующих классов категории-сенсоры согласно шкале MMSK-92. Как следствие, чтобы получить данные в читабельном виде, необходимо конвертировать коэффициенты согласно используемой шкале.

Плюсы:

1. Отображение шкалы заполнения анкеты пользователем.

2. Возможность вернуть все пользовательские ответы в первоначальное состояние.

3. Многоязычность анкеты. Необходимо для расширения аудитории респондентов.

4. Выбор местоположения с помощью карты, а также возможность автоматически определять местоположение пользователя.

5. Упрощенный ввод даты и времени с помощью виджета.

6. Возможность отвечать на вопрос выбором изображения.

7. Передача последствий землетрясений в виде фотографии или видеозаписи. Такой вид данных является важной макросейсмической информацией.

Требования к проекту

Цель – Создать единый сервис, который удовлетворил бы потребности всех организаций, далее – агентств, в сборе и хранении макросейсмических данных, позволял создавать на базе данного сервиса свои анкеты, предоставлял возможность модернизировать их, и имел удобный способ получения макросейсмических данных с заполненных анкет

В соответствии с выделенными выше плюсами и минусами выведены следующие основные требования к проекту:

1. Предоставить возможность агентствам создавать анкеты, а также изменять структуру существующих анкет, не взаимодействуя с исходным кодом сервиса.

2. Предоставить агентствам доступ к заполненным анкетам с помощью личного кабинета, а также с помощью API (описание способов (набор классов, процедур, функций, структур или констант), которыми одно ПО может взаимодействовать с другим).

3. Разработать систему подписок на оповещения, которые агентства рассылают респондентам, о необходимости заполнить анкету. Это необходимо для возможности автоматизации рассылки оповещений при землетрясениях и прочих возможных сценариях.

4. Использовать отзывчиво-адаптивную верстку, что позволит сервису корректно отображаться независимо от разрешения устройства с помощью которого был произведен вход на страницу сервиса.

5. Установить возможность разделения вопросов на группы, чтобы снизить визуальную нагрузку на респондента.

6. Разработать механизм отображения скрытых / невидимых вопросов при выполнении указанных условий.

7. Добавить поддержку английского языка.

8. Сохранять результаты заполненной анкеты в исходном (читаемом) виде.

9. Добавить возможность вернуть все пользовательские ответы в первоначальное состояние.

10. Разработать различные типы ответа на вопрос, такие как: «виджет-календарь», «виджет-время», «виджет-карта» (с возможностью автоматического определения местоположения пользователя), «ответ в виде изображения», «ввод телефона», «ввод email», «выбор нескольких ответов» и «ползунок».

11. Разработать дизайн сервиса в соответствии с современными трендами.

Демонстрация разработанной версии

Главная страница сервиса предоставляет пользователю список доступных для прохождения анкет, а также ссылки на сопутствующие сервисы и сайты.

На сервисе разработана и внедрена, необязательная, авторизация пользователя. Каждый авторизированный пользователь имеет роль, она необходима для того, чтобы разграничить доступ пользователя к различным возможностям сервиса. Всего существует 4 роли: «Администратор», «Модератор», «Агентство», «Респондент». Первые три роли возможно получить только по

обращению к администратору, на данный момент только с помощью электронной почты, которая указана в «подвале» сервиса. Роль – «Респондент», присваивается пользователю автоматически при регистрации, предоставляет пользователю дополнительные вспомогательные возможности упрощающие взаимодействие респондента с анкетами, такие как: подписка пользователя на анкеты (в случае, когда агентство предоставляет возможность оповещения о необходимости пройти анкету); в случае, если пользователь заполнил в личном кабинете свой профиль (Ф.И.О., телефон, e-mail и пр.), то при прохождении анкет в которых есть возможность оставить контактную информацию, данная информация будет заполнятся автоматически. Также в будущем планируется добавить в личном кабинете страницу со статистикой деятельности пользователя на сервисе в виде «dashboard».

Функционал, относящийся к взаимодействию респондента к сервису представлен на рисунках 1-3.

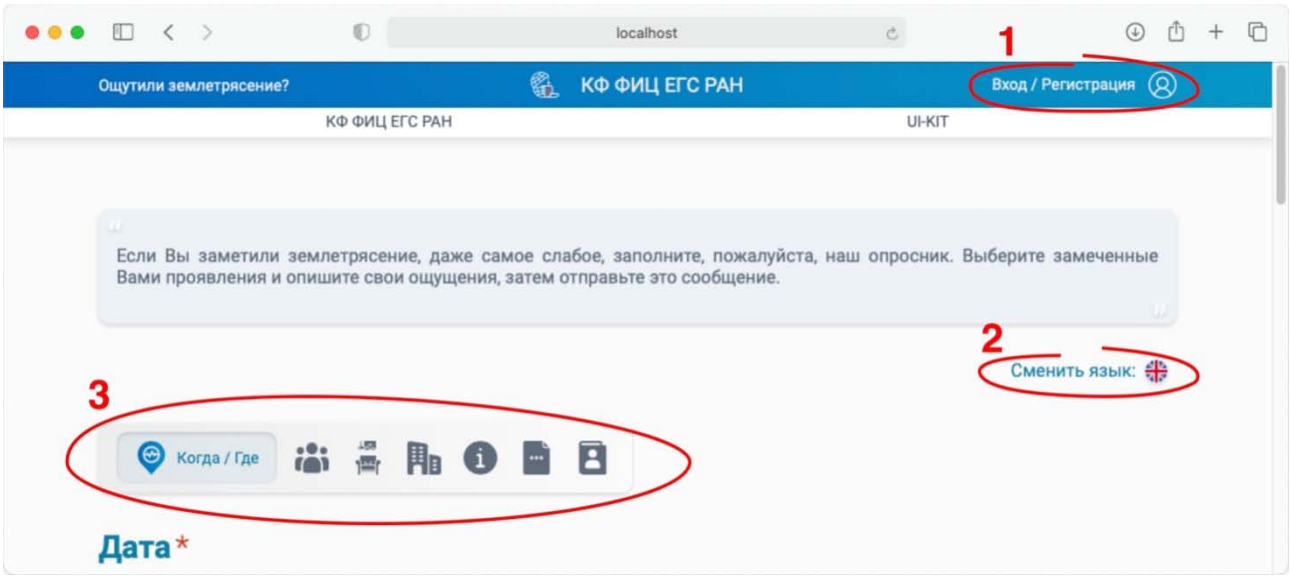


Рис. 1. Макросейсмический опросник: 1 – Ссылка на страницу авторизации пользователя, 2 – Список доступных языков, 3 – Панель вкладок (отображает общее количество вкладок, а также текущую вкладку).

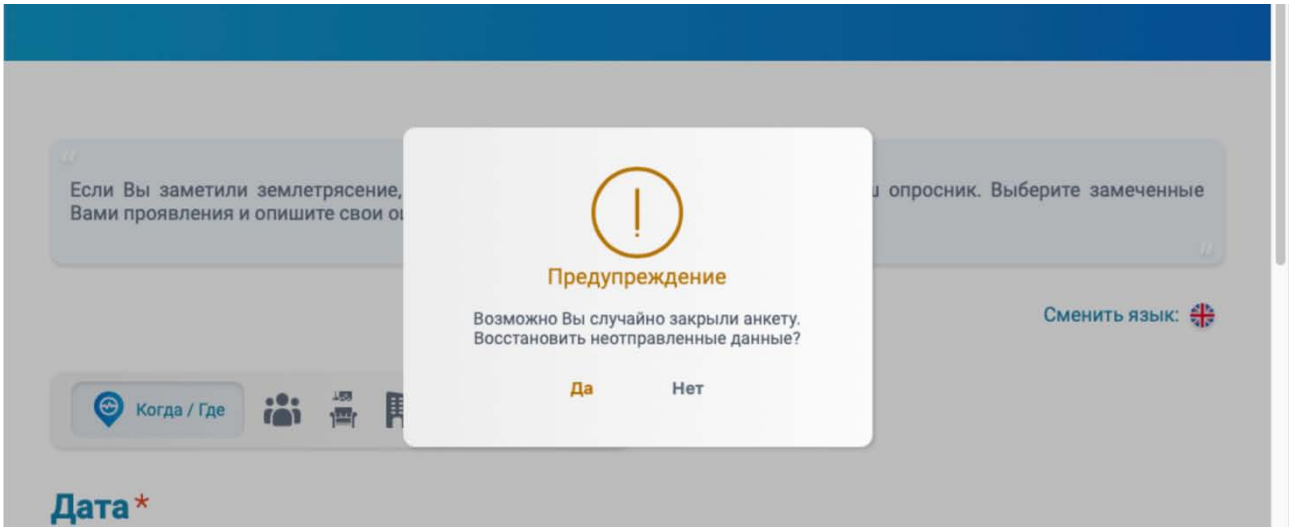


Рис. 2. Всплывающее окно с возможность восстановить недавно заполненные и неотправленные ответы.

В личном кабинете агентства реализована возможность создавать и редактировать анкеты. Каждое агентство может иметь множество анкет, но просматривать и взаимодействовать с анкетами и элементами анкет (вкладки, вопросы, варианты ответов, и т.п.) которые были созданы лично.

Доступ к ответам респондентов осуществляется с помощью API, а также интерфейса в личном кабинете, во вкладке «Заполненные опросники». В личном кабинете имеется возможность просматривать ответы пользователей онлайн, а также ответы можно скачать, поддерживаются форматы: «JSON», «CSV», «XLSX». На странице реализована фильтрация ответов по имени опросника и дате отправки пользовательских ответов на сервер.

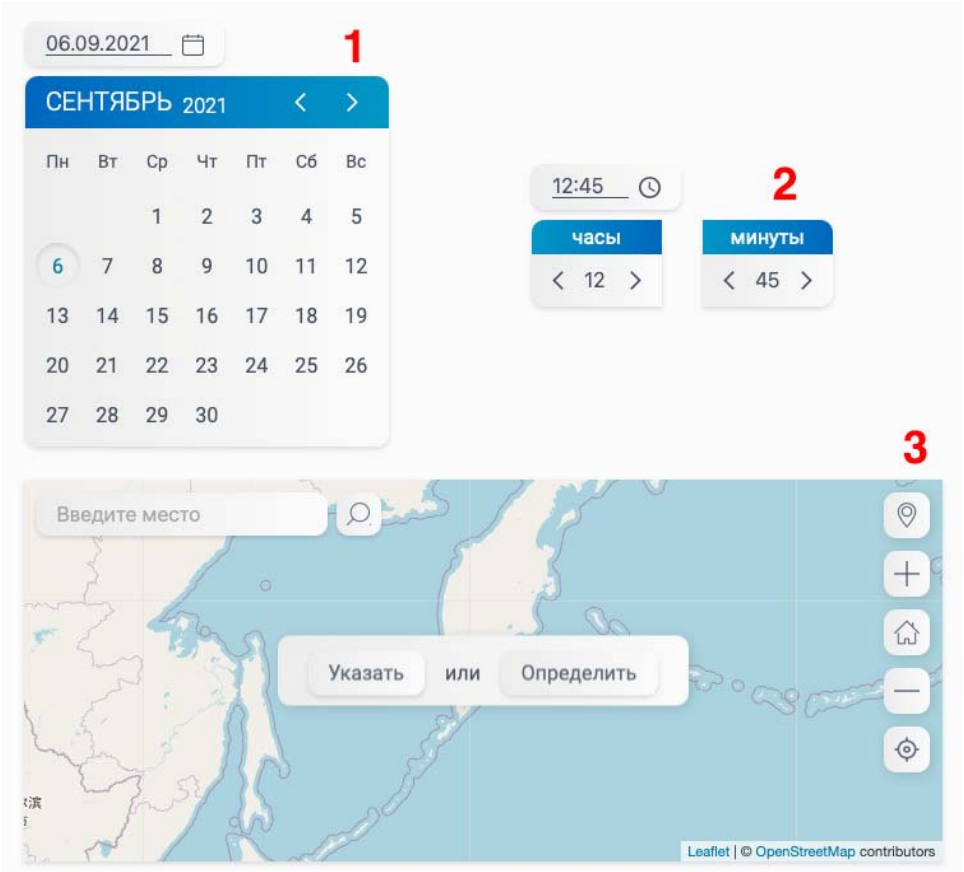


Рис. 3. Макросейсмический опросник: 1 – виджет-календарь, 2 – виджет-часы, 3 – виджет-карта.

Разработана два способа для рассылки оповещений подписчикам анкет: с помощью личного кабинета, в разделе – «отправить оповещение»; с помощью API-доступа, который поможет автоматизировать отправку сообщений при определенных событиях.

Поддержка английского языка добавлена частично – может быть переведена только информация самой анкеты, хранящиеся в БД. Данный перевод осуществляется агентствами при создании анкеты.

Заключение

Большая часть поставленных перед проектом задач выполнена, сервис работает на локальном сервере и проходит тестирование. После тестирования, сервис будет наполнен вопросами и вариантами ответов на основе ГОСТ Р57546-2017 «Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности». Разработанный сервис будет запущен параллельно к существующему макросейсмическому опроснику после внедрения поддержки английского языка.

Сервис для создания, сбора и хранения опросов может быть использован для сбора макросейсмических данных и других видов информации.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

Список литераторы

1. *Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В*. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.:МГК АН СССР, 1965. 11 с.

2. *Митюшкина С.В., Токарев А.В., Раевская А.А., Чеброва. А.Ю*. Автоматическая обработка макросейсмической информации по камчатским землетрясениям на базе интернет-опросника. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды третьей научно-технической конференции. Обнинск: ГС РАН, 2011 год. С. 376–380.

УДК 550.34.06

ПРОГРАММА ДЛЯ ОБРАБОТКИ АФТЕРШОКОВ ХУБСУГУЛЬСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 11 ЯНВАРЯ 2021 ГОДА

Хритова М.А., Гилёва Н.А.

Байкальский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Иркутск, hritova@crust.irk.ru

Введение

Сильное землетрясение с *M*w=6.8 с эпицентром в северной части оз. Хубсугул в Монголии, произошедшее 11 января 2021 г., сопровождалось мощным афтершоковым процессом [1]. Только за первые полмесяца в эпицентральной зоне Хубсугульского землетрясения сетью сейсмостанций БФ ФИЦ ЕГС РАН зарегистрировано более 9 тыс. толчков (K_P=6.0–15.7). На рисунке 1 приведен график распределения количества зарегистрированных афтершоков ближайшей сейсмостанцией «Монды» (MOY) Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН по суткам за период с 1 января по 20 апреля 2021 года.

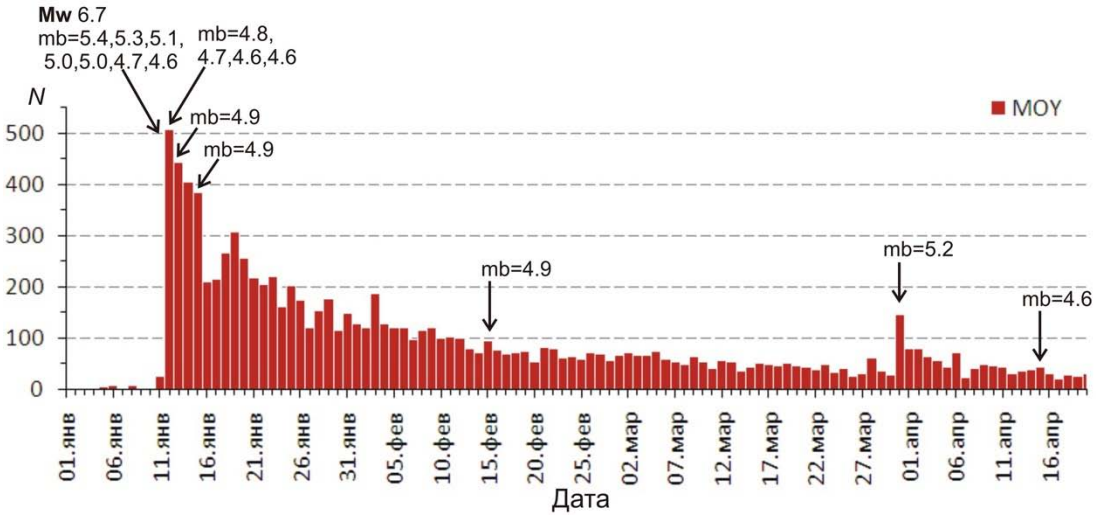


Рис.1. График распределения количества зарегистрированных афтершоков (с энергетическим классом K_P≥6) сейсмостанцией «Монды» (MOY) по суткам за период с 1 января по 20 апреля 2021 года

Необходимо отметить, что афтершоковый процесс наблюдается в течении нескольких месяцев и является активным по состоянию на сентябрь 2021 г. Например, 22 августа зарегистрирован сильный толчок с K_P=12.9 в эпицентральной зоне Хубсугульского землетрясения.

Для автоматизации и ускорения процесса обработки многочисленных афтершоков разработана программа «AftershoksBykl». Программа предназначена для получения основных параметров афтершоков (время в очаге, координаты эпицентра, энергетический класс, магнитуда) по непрерывным записям постоянных и временных сейсмических станций в ближней зоне (Δ<230 км, $N_{ст}$=8), окружающих очаг.

Исходные данные

На расстоянии до 230 км от эпицентральной зоны Хубсугульского землетрясения функционируют сейсмостанции БФ ФИЦ ЕГС РАН: «Монды» (MOY), «Орлик» (ORL), «Аршан» (ARS), «Закаменск» (ZAK) [3]. В первые дни после главного толчка были установлены временные сейсмические станции «Кырен» (KRN) и «Туран» (TUR), так же в рамках договора обмена данными были доступны записи Монгольской сейсмостанции HTGB и станции KNGR Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН. На рисунке 2 приведена схема расположения сейсмических станций, расположенных до 230 км от эпицентральной зоны Хубсугульского землетрясения.

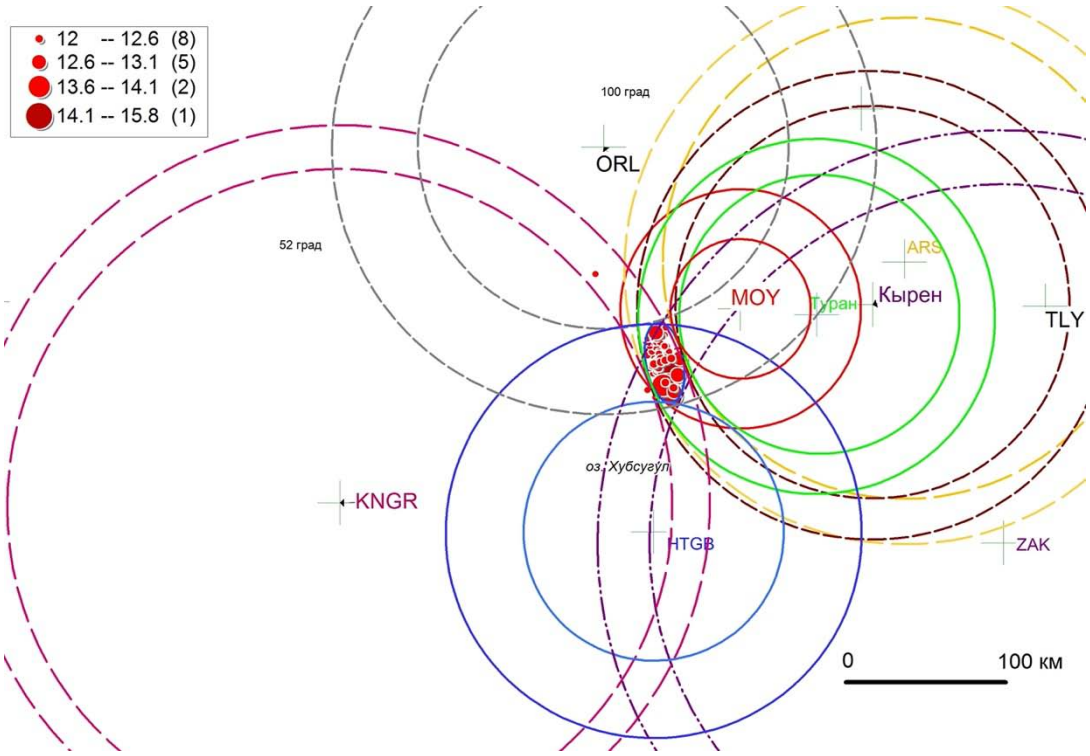


Рис. 2. Схема расположения сейсмических станций, расположенных до 230 км от эпицентральной зоны Хубсугульского землетрясения. Окружностями показано минимальное и максимальное расстояние до эпицентральной зоны. На схеме приведены эпицентры толчков с $K_P \geq 9.5$ ($M>3$) за период с 11 января по 20 апреля 2021 г, определенные в оперативном режиме.

На основании определенного минимального и максимального расстояния (d, км) от сейсмостанций до центра эпицентральной зоны, зная средние скорости сейсмических волн для региона (V_P=6.15 км/с, V_S=3.58 км/с), для каждой станции рассчитаны возможные минимальные и максимальные значения (таблица 1): разность между временем прихода прямых продольных (P) и временем в эпицентре (t_P-t_0), разность между временем прихода поперечных (S) сейсмических волн и временем в эпицентре (t_S-t_0), разность между временем прихода поперечных сейсмических волн и временем прихода прямых продольных волн (t_S-t_P).

Таблица 1. Граничные значения сейсмических параметров для станций, определенные по расположению эпицентральной зоны.

код	MIN d, км	MAX d, км	MIN (t_P-t_0), с	MAX (t_P-t_0), с	MIN (t_S-t_0), с	MAX (t_S-t_0), с	MIN (t_S-t_P), с	MAX (t_S-t_P), с
MOY	40	72	6.50	11.71	11.17	20.11	4.67	8.40
HTGB	80	128	13.01	20.81	22.35	35.75	9.33	14.94
TUR	84	107	13.66	17.40	23.46	29.89	9.80	12.49
ORL	109	160	17.72	26.02	30.45	44.69	12.72	18.67
KRN	118	141	19.19	22.93	32.96	39.39	13.77	16.45
ARS	144	167	23.41	27.15	40.22	46.65	16.80	19.49
KNGR	204	227	33.17	36.91	56.98	63.41	23.80	26.49
ZAK	218	255	35.45	41.46	60.89	71.23	25.44	29.75

Методика обработки и алгоритм программы

Далее приведены основные этапы методики автоматической обработки афтершоков, реализованной в программе «AftershoksBykl».

1. Детектирование непрерывных сейсмических записей 8 станций за выбранный промежуток времени. Перед детектированием записи предварительно фильтруются. В основе алгоритма для определения моментов вступления прямых сейсмических волн P и S используется автоматическое детектирование *STA/LTA*, основанное на анализе отношения амплитуд в коротком и длинном временных окнах [6, 7]. Для каждой станции подобраны оптимальные параметры детектора

(например, для станции MOY установлены *STA* – 0.2 с, *LTA* – 2 с, *SNR* – 2.5). По каждой станции сохраняется список срабатывания детектора – возможные вступления прямых продольных и поперечных волн. Результаты детектирования на примере записей станции MOY показаны в программе «AftershoksBykl» на рисунке 3.

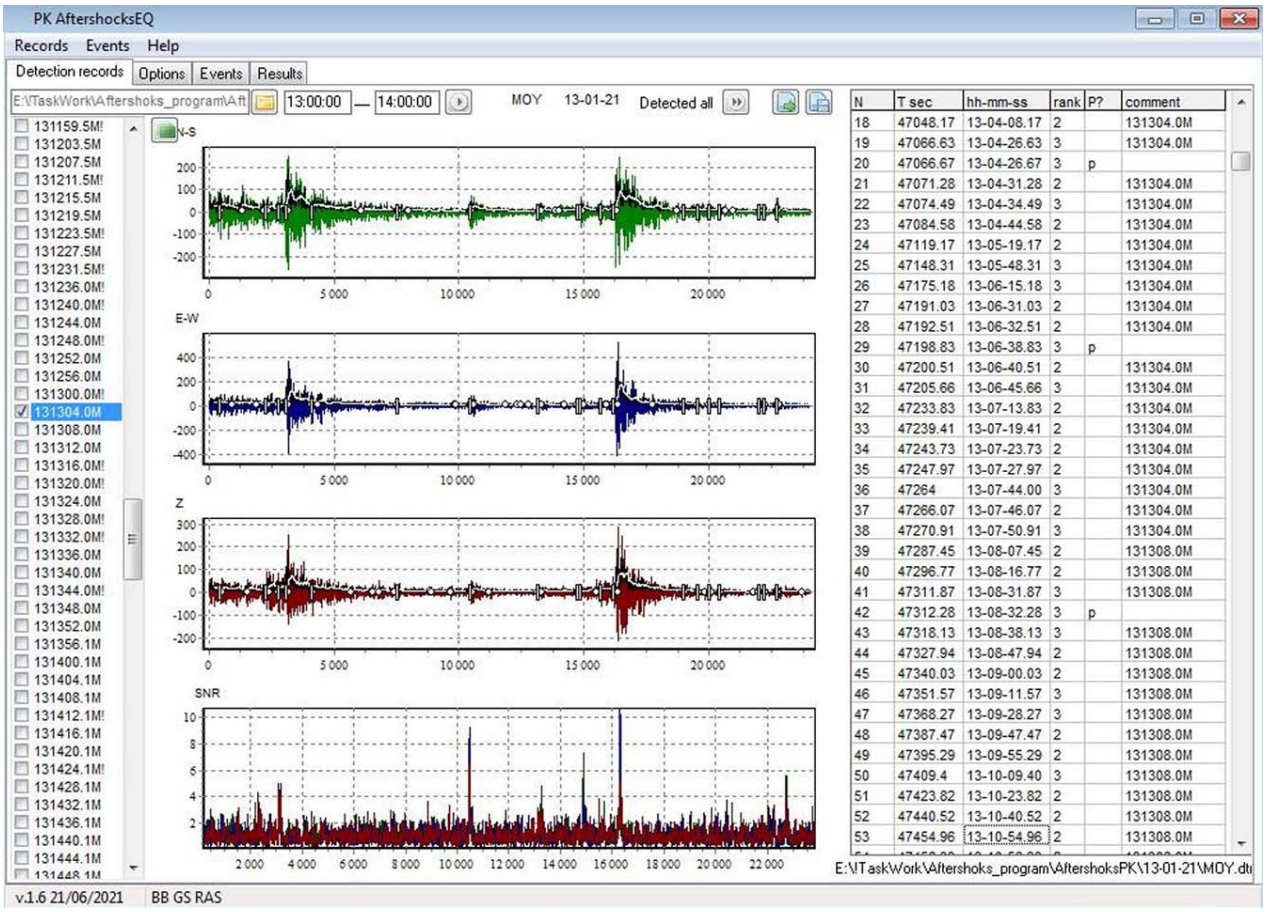


Рис.3. Экранная форма программы «AftershoksBykl» с результатами детектирования записей станции MOY за время 13–14 часов 13 января 2021 г.

2. Для успешной локации афтершока достаточно подтверждения оператором только наличия вступления прямой продольной волны *P* из списка срабатывания детектора, сформированного по записи ближайшей сейсмостанции. В случае Хубсугульского афтершокового процесса, оператор должен подтвердить вступления *P* волны из списка срабатываний детектора станции MOY. Это единственный этап, который требует участия оператора.

3. Далее в автоматическом режиме для ближайшей станции (MOY), для каждого вступления *P* волны, зная минимальные и максимальные значения t_S-t_P (таблица 1), из списка срабатывания детектора подбираются вступления *S*. При наличии фаз *P* и *S* рассчитывается первоначальное значение времени в очаге t_0 по данным станции MOY. Таким образом, формируется список событий, которые требуется обработать.

Пункты 4–9 выполняются для каждого события.

4. На следующем шаге для каждого события производится поиск возможных вступлений *P* и *S* волн по спискам срабатывания детектора для оставшихся 7 сейсмостанций. То есть, зная первое приближение t_0 (установленное на предыдущем шаге) и зная граничные значения t_P-t_0 и t_S-t_0 (таблица 1) подбираются возможные t_P и t_S. При наличии нескольких возможных вариантов t_P и t_S, отбираются фазы, при которых новое рассчитанное t_0 максимально приближено к t_0, определенному по данным ближайшей станции MOY.

5. При достаточном количестве фаз (*P* и *S* определены по 2-м и более станциям) производится расчет основных параметров землетрясений с помощью подпрограммы «Региональная зона» (авторы С.И. Голенецкий, Г.И. Перевалова), минимизирующей сумму квадратов невязок моментов вступлений сейсмических волн [2]. В качестве исходных данных в расчетах служат координаты сейсмических станций, моменты вступлений сейсмических волн на эти станции (t_P, t_S) и соответствующие максимальные амплитуды. Программа «Региональная зона» рассчитывает

координаты и глубину очага, время в очаге землетрясения, невязки для всех задаваемых волн, энергетический класс землетрясения; вычисляет погрешности в определении всех параметров очага [5]. На этом этапе рассчитываются только координаты эпицентра и время в очаге, энергетические характеристики не определяются.

6. На следующем шаге алгоритма проверяется полученное решение, превышение невязок времен пробега сейсмических волн заданного порога; при наличии неудовлетворительных невязок соответствующие фазы исключаются из обработки, и происходит перерасчет параметров землетрясения.

7. Зная полученное первое решение, по найденным первичным координатам эпицентра и времени в очаге рассчитываются времена прихода волн *P* и *S* для не участвовавших в обработке станций. Из списков срабатываний детектора, определенных по записям этих станций, выбираются времена t_k, близкие к рассчитанным, предполагаются как соответствующие времена вступлений фаз *P* и *S* и добавляются в обработку. Происходит перерасчет параметров землетрясения.

8. Проверяется полученное решение, превышение невязок времен пробега сейсмических волн заданного порога; при наличии неудовлетворительных невязок соответствующие фазы исключаются из обработки, и происходит перерасчет параметров землетрясения.

9. Для определения величин K_p и *M* необходимо определение максимальных амплитуд A_P и A_S в волнах *P*, *S*. Чтобы измерить амплитуды максимальных смещений, предварительно производится численное интегрирование скоростей смещения почвы – записей чувствительных каналов. Для расчета энергетического класса в программе заложена номограмма Т.Г. Раутиан [4]. Зная максимальные амплитуды в волнах и эпицентральное расстояние, по номограмме определяется энергетический класс землетрясения K_p. Полученные амплитуды соответствующих волн добавляются к входным данным для расчетного модуля, затем рассчитываются параметры землетрясения: время в очаге – t_0, координаты эпицентра – φ_0, λ_0, энергетический класс – K_p.

На рисунке 4 представлена экранная форма программы «AftershoksBykl» с результатами обработки афтершока 13 января 2021 г. в 13 ч 02 мин 37 с (K_p=9.4).

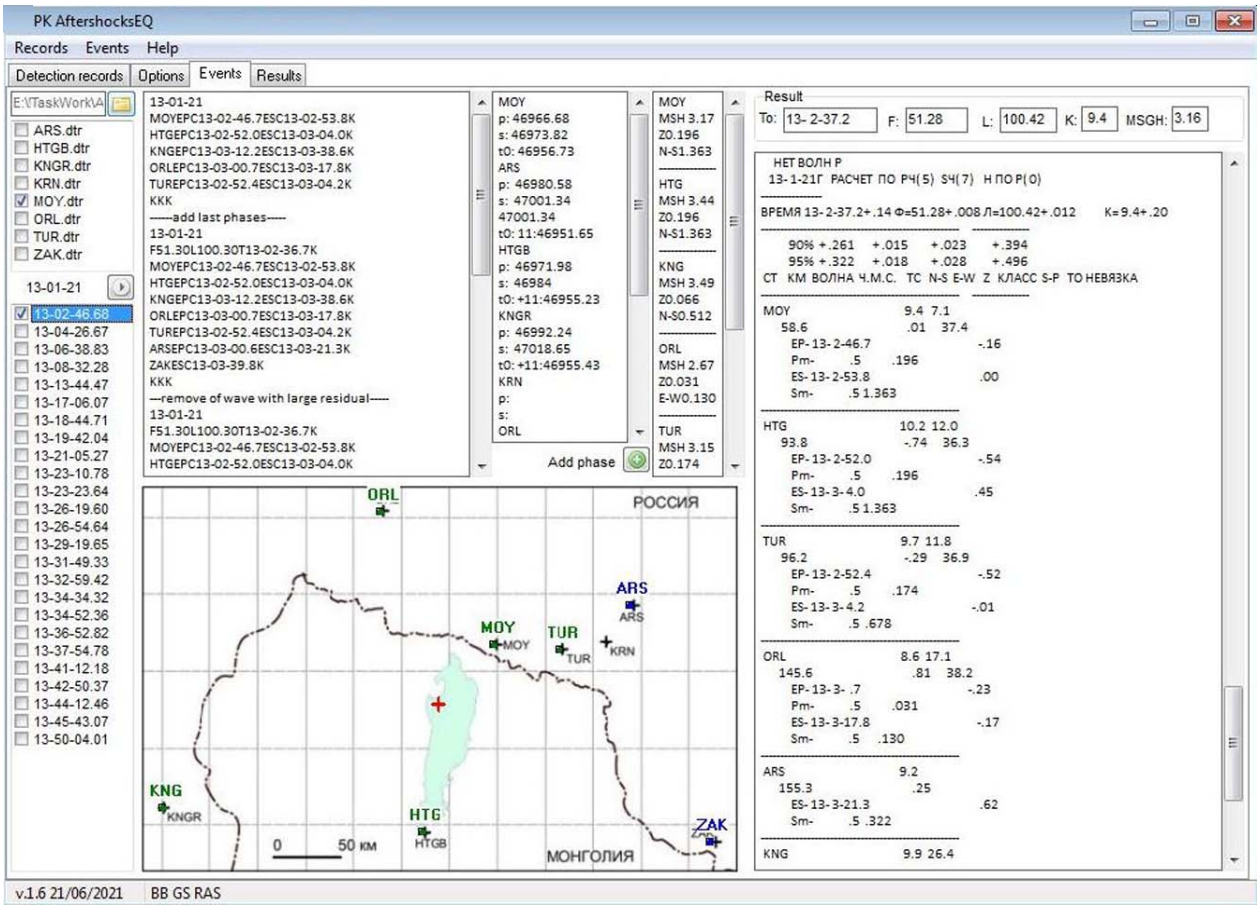


Рис. 4. Экранная форма программы «AftershoksBykl» с результатами обработки афтершока 13 января 2021 г. в 13 ч 02 мин 37 с (K_p=9.4)

10. Обработанные афтершоки доступны на отдельной вкладке программы. Результаты представляются на карте: для каждого события доступны основные параметры (время в очаге – t_0, координаты эпицентра – φ_0, λ_0, энергетический класс – K_p), рисуется эллипс с ошибкой определения координат. События имеющие большие ошибки определения помечаются цветом (рисунок 5).

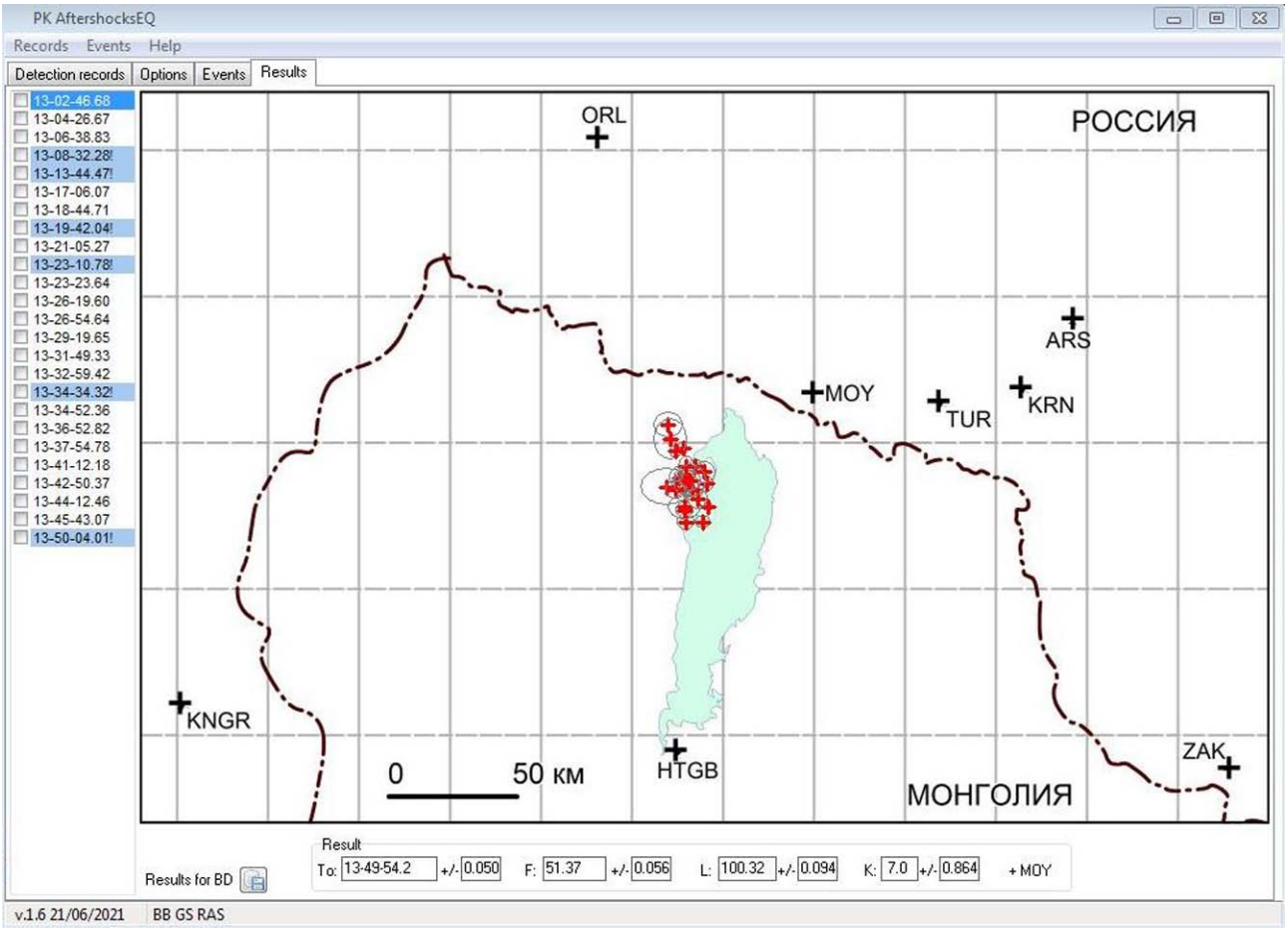


Рис. 5. Экранная форма программы «AftershoksBykl» с результатами обработки афтершоков 13 января 2021 г. за период с 13 по 14 ч.

Первые результаты использования программы

Для оценки качества обработки афтершоков с помощью программы «AftershoksBykl» был отобран временной участок за 13 января 2021 г. с 13 ч 02 мин по 13 ч 34 мин. За этот период с помощью программы обработано 20 землетрясений средних энергий с K_p=5.7–9.3 в период наличия 8 станций до 230 км. Эти же события обработаны в ручном режиме оператором, необходимо отметить что при обработке в ручном режиме участвовало большее количество станций.

Сравнение результатов обработки показало: ошибки определения времени в очаге (t_0) увеличились в среднем в 2 раза (от 0.3 с до 0.6 с); отмечается некоторое завышение энергетического класса программой, в среднем на 0.4 K_p; ошибки определения K_p в среднем не изменились; изменение положения эпицентров в среднем на 2.3 км, абсолютное большинство (90%) их переместилось не более чем на 4 км (рисунок 6).

Дальнейшее тестирование показало, что программа «AftershoksBykl» позволяет обрабатывать землетрясения средних энергий с K_p=5.6–9.5 (по данным 8 станций). Таких энергий в массе афтершоков более 95%. При этом представительность обеспечивается для землетрясений с $K_p \geq 6.6$, что вполне приемлемо. За 14 часов 13 января (с 10 до 24) обработано 362 землетрясения с K_p=5.7–12.6. 85% из них не требуют корректировки после работы программы. Средняя ошибка времени в очаге – 0.6 с, широты – 0.03°, долготы – 0.05°, энергетического класса – 0.5.

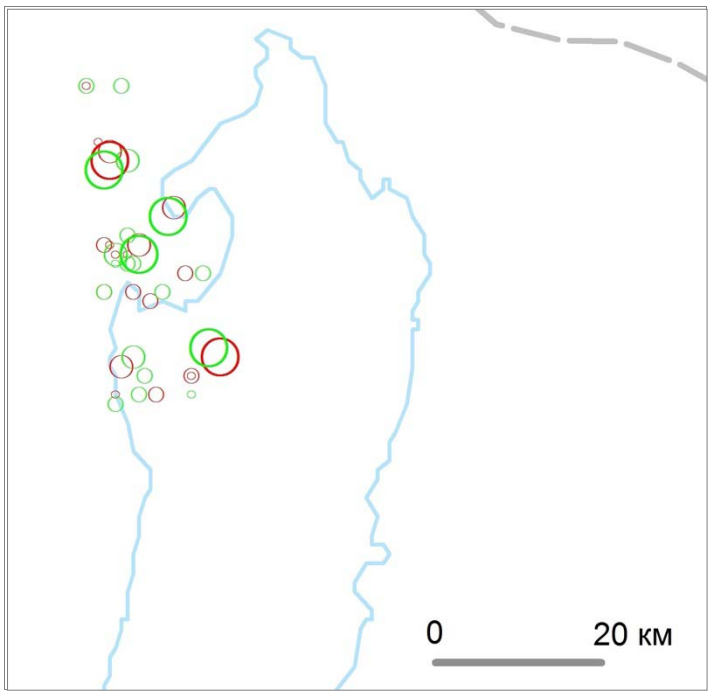


Рис. 6. Сравнение результатов обработки афтершоков Хубсугульского землетрясения с помощью программы «AftershoksBykl» (эпицентры отмечены зеленым цветом) с результатами, полученными оператором в ручном режиме (красный цвет) за период 13 января 2021 г. с 13 ч 02 мин по 13 ч 34 мин.

Заключение

Разработана программа «AftershoksBykl», позволяющая довольно качественно обрабатывать афтершоки, получая основные параметры событий (время в очаге, координаты эпицентра, энергетический класс, магнитуда) по непрерывным записям сейсмических станций в ближней зоне (Δ<230 км), окружающих очаг. С помощью представленной программы «AftershoksBykl» получены первые результаты по обработке афтершоков Хубсугульского землетрясения 11 января 2021 г. Необходимо отметить, что использование программы позволяет значительно ускорить процесс обработки большого массива афтершоков.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01304-20) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. *Гилева Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Я.Б., Тубанов Ц.А.* Сильные землетрясения Прибайкалья в 2020–2021 гг. // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ : тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. / ФГБУН ИЗК СО РАН ; ФГБОУ ВО «ИГУ» ; отв. ред. К. Ж. Семинский. Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. С. 182–183.

2. *Голенецкий С.И., Перевалова Г.И.* Программа определения основных параметров землетрясений по наблюдениям региональной сети сейсмических станций Прибайкалья // Применение математических методов и ЭВМ в геологии и геофизике: Сборник алгоритмов и программ. Иркутск, 1984. С.35–54. Деп. в ВИНИТИ 03.12.1984, № 7675.

3. *Мельникова В.И., Гилева Н.А., Масальский О.К.* Прибайкалье и Забайкалье // Землетрясения Северной Евразии. №22 (2013). Обнинск: ГС РАН, 2019. С.150–160.

4. *Раутиан Т.Г.* Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности / Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С.75–113. (Труды ИФЗ АН СССР; № 9(176)).

5. *Хритова М.А., Гилева Н.А.* Автоматическая обработка региональных землетрясений Прибайкалья и Забайкалья. // Сейсмические приборы. 2012. Т.48. №2. С.15–27.

6. *Freiberger W.F.* An approximate method in signal detection // Quarterly Appl. Math. 1963. V. 20. P. 373–378.

7. *Joswig M.* Pattern Recognition for Earthquake Detection // Bulletin of Seismological Society of America. 1990. V. 80. № 1. P.170–186.

УДК 550.34+004.42

ЕДИНАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ КФ ФИЦ ЕГС РАН В 2021 г.

Чемарёв А.С., Матвеенко Е.А., Фараонов А.А.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба Российской академии наук", г. Петропавловск-Камчатский, andrew@emsd.ru

Введение

С момента начала разработки Единой информационной системы сейсмологических данных (ЕИССД) КФ ФИЦ ЕГС РАН прошло чуть более 10 лет. За это время система обрела прочный фундамент в виде Базы данных (БД) и 7 подсистем [6] и неоднократно подтверждала свою актуальность, используясь в качестве основы как для интеграции с другими системами [5], так и для проведения научных исследований [1]. Отлаженная работа системы позволяет концентрировать усилия на её дальнейшем развитии. Развитие получила подсистема доступа к данным ЕИССД. Был открыт доступ к информации о сейсмометрических каналах (СК), разработаны web-страница с картой сейсмических станций КФ ФИЦ ЕГС РАН и программа автоматического слежения за калибровочной информацией СК, сервис доступа к данным соответствующий спецификации «FDSNWS Web Services» [10].

Пункты наблюдений

БД ЕИССД в режиме реального времени пополняется результатами обработки сейсмических событий (РОСС) производимыми лабораториями исследования сейсмической и вулканической активности, сводной обработки и региональными информационно-обрабатывающими центрами «Петропавловск», «Южно-Сахалинск» и «Владивосток». Помимо основных параметров сейсмического события, результат обработки содержит информацию о вступлениях на СК. При сохранении РОСС в базу данных происходит проверка наличия информации о сейсмометрическом канале и в случае её отсутствия создаются новые записи в таблицах Стация, Сеть, Инструмент, Канал. Сохраненная информация анализируется подсистемой «Контроль и корректировка» [3, 6] и отображается в приложении «Elman», что позволяет оперативно узнавать о появлении в БД новых сейсмометрических каналов. Для станций и СК можно внести дополнительную информацию- даты начала и конца работы, координаты, организацию-владельца и т.п.

В дополнение к уже имеющемуся на сайте ЕИССД (https://sdis.emsd.ru) разделу «Сейсмические станции» [2] была разработана веб-страница со списком и картой станций с работающими на текущий момент сейсмометрическими каналами (https://sdis.emsd.ru/stations/) (рис. 1). Имеется возможность отфильтровать список станций по региональному коду и перейти на страницу с подробной информацией о её СК.

Калибровочная информация сейсмометрических каналов хранится в виде архива файлов специального формата [9]. Для её загрузки в БД ЕИССД и дальнейшего автоматического слежения за изменениями в архиве, на языке Python (версия 3.8) разработана программа «Read Seismic Instrument Calibration». Она создает локальную копию архива, с помощью системы управления версиями git[1] ведет историю изменений.

Доступ к данным

Разработанный в 2019 г. [8] интерфейс доступа к данным каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов через протокол HTTP получил развитие в виде сервиса получения данных (далее SDIS FDSNWS) соответствующего спецификации «FDSN Web Services» [10]. Сервис может использоваться библиотекой ObsPy [11] при написании программ на языке программирования Python и позволяет работать как с данными ЕИССД, так и системы сбора, обработки, хранения и представления данных сейсмологических наблюдений [4].

С помощью сервиса «SDIS FDSNWS» можно получить:

[1] https://git-scm.com

1. Данные каталогов Камчатки и Командорских островов, РИОЦ «Южно-Сахалинск» и «Владивосток» (внутри локальной сети КФ ФИЦ ЕГС РАН без ограничений; вне локальной сети - начиная с $M_L \geq 3.5$).

2. Волновые формы сейсмометрических каналов КФ ФИЦ ЕГС РАН за последние 3 месяца (внутри локальной сети КФ ФИЦ ЕГС РАН).

3. Информацию о пунктах наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН и СК, включая калибровочную информацию (внутри локальной сети в тестовом режиме для работающих в настоящий момент каналов).

Интерактивная карта землетрясений, о которой рассказывалось в [7, 8] переведена на работу с описанным выше сервисом в качестве основного источника данных. Изменениям подвергся также внешний вид карты (рис. 2). Новый дизайн согласуется с дизайном нового сайта КФ ФИЦ ЕГС РАН (https://glob.emsd.ru), адаптируется под размер экрана, что позволяет комфортно работать с картой с мобильных устройств (рис. 3).

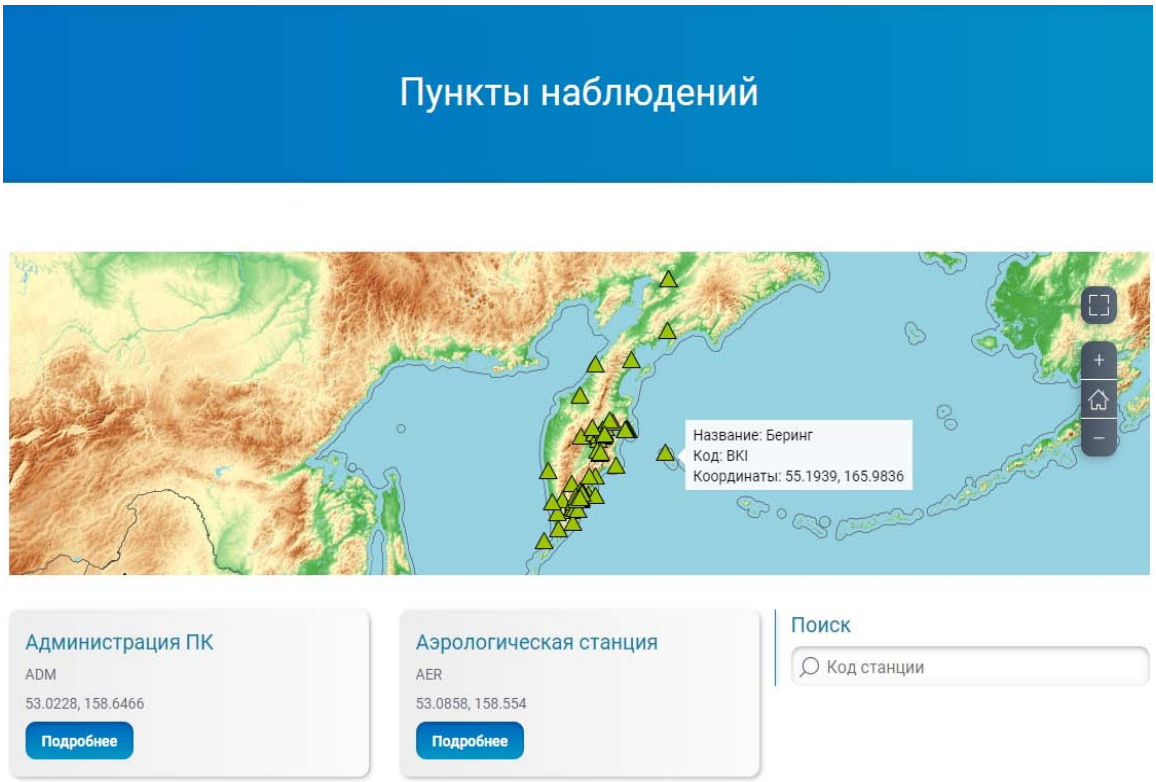


Рис. 1. Интерфейс веб-страницы с картой сейсмических станций.

Инфраструктура ЕИССД

Описанные выше сервисы были развернуты на трех виртуальных машинах под управлением системы виртуализации Proxmox, являющейся частью системы сбора, обработки, хранения и представления данных сейсмологических наблюдений [4]. Такое количество платформ для развертывания программного обеспечения обосновано постепенным внедрением идей микросервисного подхода [12] в архитектуру ЕИССД. Восприятие подсистемы/части подсистемы в качестве микросервиса позволяет увеличить стабильность их работы при возможности более оперативно вносить изменения в кодовую базу.

Добавленные виртуальные машины выполняют следующие функции:

- №1 - Маршрутизатор (API Gateway в микросервисной архитектуре).
- №2 - Платформа развертывания сервиса SDIS FDSNWS.
- №3 - Платформа развертывания остальных сервисов и приложений (интерактивная карта, программа автоматического слежения за калибровочной информацией и др.).

Вынесение сервиса SDIS FDSNWS на отдельную платформу обусловлено организацией на этой же платформе буфера быстрого доступа к данным каталогов Камчатки и Командорских островов, РИОЦ «Южно-Сахалинск» и «Владивосток». Буфер каждого из каталогов состоит из двух частей: первая содержит данные всего каталога до текущих суток и обновляется в полночь (время по Гринвичу), вторая - данные за текущие сутки и обновляется раз в две минуты. Итоговая выборка формируется путем объединения данных из первой и второй частей буфера.

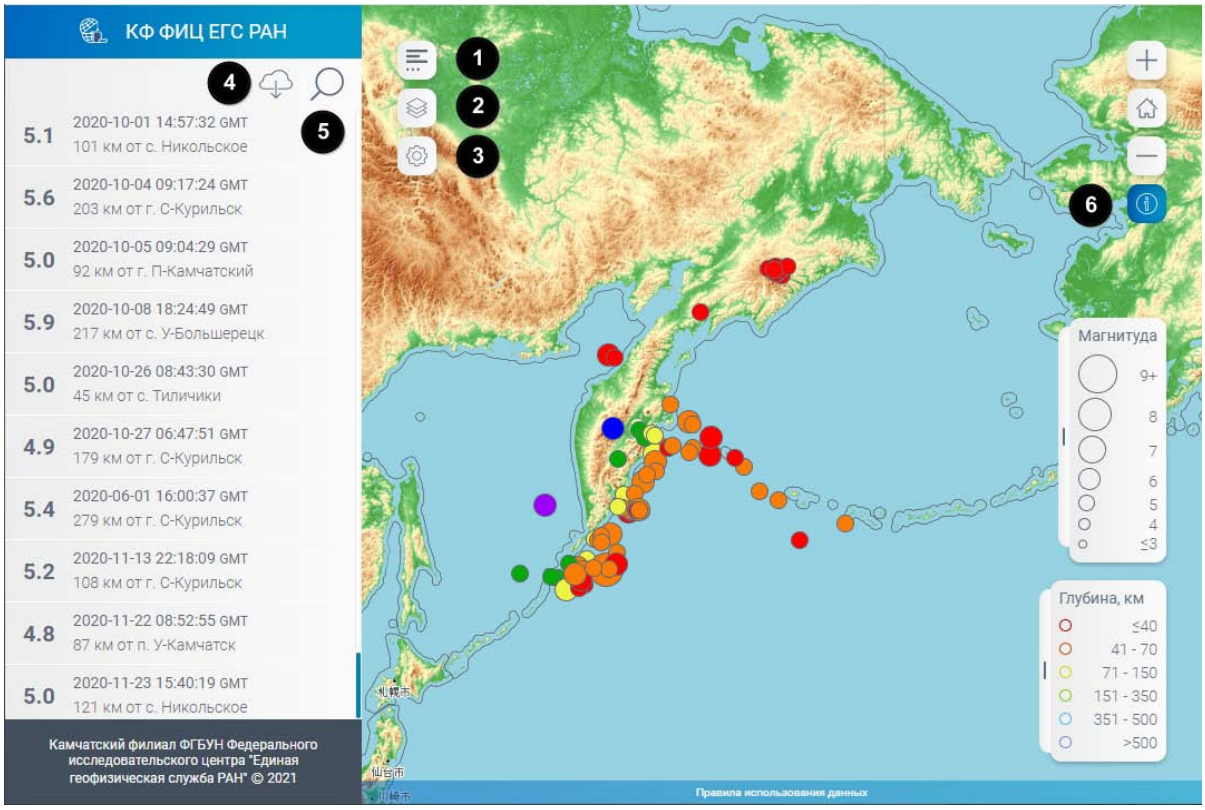


Рис. 2. Новый интерфейс интерактивной карты: 1 – Кнопка отображения расширенной информации о землетрясении, 2- кнопка отображение меню выбора базового слоя (картографической подложки), 3 – кнопка отображения настроек карты, 4 – кнопка отображения меню сохранения данных, 5 – кнопка отображения формы параметров поиска землетрясения, 6 – кнопка отображения легенды карты.

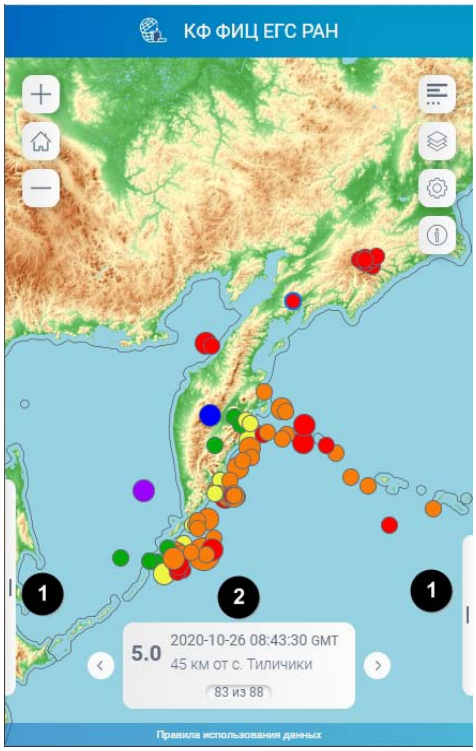


Рис. 3. Интерфейс интерактивной карты на экране мобильного телефона. 1 – Кнопки отображения легенды, 2 – мобильная версия списка землетрясений.

Использование данных ЕИССД

На основе ЕИССД организован обновляемый в реальном времени (максимальная задержка обновления – 2 мин.) буфер с данными зарегистрированных за последнюю неделю сейсмических событий. Он используется в качестве источника данных для карты «Землетрясения за последнюю неделю» на главной странице нового сайта КФ ФИЦ ЕГС РАН.

Для доступа из глобальной сети открыты два раздела веб-интерфейса ЕИССД. Раздел "Информация о сейсмических датчиках" [2] предоставляет краткую информацию о датах работы, типах каналов и используемых сейсмометрах в сети КФ ФИЦ ЕГС РАН. Раздел "Спектрально-временные характеристики сейсмического шума", содержит информацию о спектральной плотности сейсмического шума на сейсмометрических каналах сети КФ ФИЦ ЕГС РАН с 2013 года по н.в. Временной шаг дискретизации спектральной плотности мощности сейсмического шума 30 минут. Информация представлена в графическом виде в трех диапазонах: сутки, месяц, год.

Обновился регламент использования данных, ссылка [3] на него есть на каждой странице предоставляющей доступ к информации ЕИССД. По данным сервиса «Google Аналитика» системой пользуются около 100 человек в месяц.

[2] http://sdis.emsd.ru/info/instruments/seismoinstruments.php
[3] https://glob.emsd.ru/static-pages/data-usage-rules/

Выводы

Сформированный за 2010-2019 гг. фундамент ЕИССД позволил за последние пару лет сделать упор на развитие системы в сторону современных трендов в области построения информационных систем и доступа к сейсмологическим данным. Разработаны web-страница с картой сейсмических станций с работающими на текущий момент сейсмометрическими каналами, программа слежения за их калибровочной информацией; сервиса доступа к сейсмологической информации «SDIS FDSNWS» Эти сервисы позволяют повысить удобство использования сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН как в исследованиях, так и различных информационных и информационно-обрабатывающих сервисах и системах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

Список литературы

1. *Ландер А.В., Шевченко Н.А., Матвеенко Е.А.* Артефакт в Камчатском каталоге землетрясений: исследование и устранение // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2019. №1. Вып.41. С. 85–90.

2. *Матвеенко Е.А., Чеброва А.Ю., Иванов В.Ю., Иванова Е.И., Митюшкина С.В., Раевская А.А., Ромашева Е.И., Токарев А.В., Чемарёв А.С.* Развитие интерфейса доступа к сейсмологической информации ЕИССД // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 1 – 7 октября 2017 г. Обнинск: ГС РАН, 2017. С. 361–365.

3. *Токарев А.В., Чемарёв А.С.* Подсистема ЕИС для поиска и исправления ошибок в результатах обработки землетрясений // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 356–358.

4. *Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сенюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.

5. *Чебров Д.В.* Развитие системы комплексных сейсмологических и геофизических наблюдений на Камчатке и её сопряжение с аппаратно-программным комплексом «Безопасный город» Камчатского края // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября–5 октября 2019 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 113–117.

6. *Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеенко Е.А., Чебров Д.В.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. том 21. № 3. С. 66–91.

7. *Чемарёв А.С., Чеброва А.Ю.* Интерактивная карта землетрясений Камчатки // XIII Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» и Школа молодых сейсмологов государств-участников СНГ на базе сейсмической станции «Симиганч». г. Душанбе, Республика Таджикистан. 11–15 сентября 2018 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С. 317–321.

8. *Чемарёв А.С., Чеброва А.Ю.* Интерактивная карта землетрясений как интерфейс доступа к сейсмологическим данным // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября–5 октября 2019 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 500–503.

9. *Шевченко Ю.В.* Организация метрологического обеспечения на камчатской сети сейсмических станций // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 4(24). С. 226–234.

10. FDSN Web Services. URL: https://www.fdsn.org/webservices/ (дата обращения: 01.09.2021).

11. *Krischer L., Megies T., Barsch R., Beyreuther M., Lecocq T., Caudron C., Wassermann J.* ObsPy. A Python Toolbox for seismology/seismological observatories // Computational Science & Discovery. 2015. V. 8. N. 1.

12. Microservice Architecture. URL: https://microservices.io (дата обращения: 01.09.2021).

УДК 550.34

ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ СУСАМЫРСКОГО ЗНМЛЕТРЯСЕНИЯ 1992 ГОДА

Юсупов Ш.С., Шин Л.Ю., Расулов А.В.

Институт сейсмологии АН РУз. г. Ташкент, Узбекистан, shuhrat-1951@mail.ru

Гидрогеохимические наблюдения на геодинамических полигонах

Изучение гидрогеосейсмологических (ГГС) параметров в изменениях газо-химического состава подземных вод в Узбекистане проводится более 50-ти лет и является пионерским в мире, начиная с работы Султанходжаева А.Н. и др. 1967 г. Сотрудники Института сейсмологии АН РУз, под руководством академика Султанходжаева А.Н., внесли определяющий вклад в изучение ГГС предвестников в Узбекистане [13].

Ниже представлены данные наблюдений на Ферганском и Ташкентском геодинамическом полигонах, в месторождениях Хаватаг, Шурчи и на скважине в г. Бухаре 1991–1992 гг. в период предшествующий и сопутствующий одному из самых сильных землетрясений в Центральной Азии за последние десятилетия – Сусамырского землетрясения 19.08.1992 г., $M = 7.4$, глубина 25 км (координаты 42.07 с.ш., 73.63°в.д.) на территории Киргизстана. Это землетрясение затронуло большую территорию Центральной Азии, в том числе, все сейсмогенные зоны Узбекистана.

Сусамырское землетрясение 1992 года

Механизм очага Сусамырского землетрясения взбросовый с небольшой сдвиговой составляющей, обе возможные нодальные плоскости имеют субширотное положение, что подтверждается субширотным простиранием двух участков разрыва, вышедших на поверхность [1]. Положение оси сжатия – субмеридиональное и близгоризонтальное, оси растяжения – близвертикальное.

Во время Сусамырского землетрясения, произошедшего в одноименной впадине, образовались два сейсмоуступа на поверхности: один – вдоль Сусамырского краевого разлома, а второй – вдоль Арамсуйского разлома [1], отстоящий от первого на 26 км. Зона разрыва Сусамырского землетрясения, на основе афтершоковых данных, простиралась на расстояние около 50 км [18]. В то же время общая длина двух образовавшихся поверхностных разрывов составляет только около 4 км.

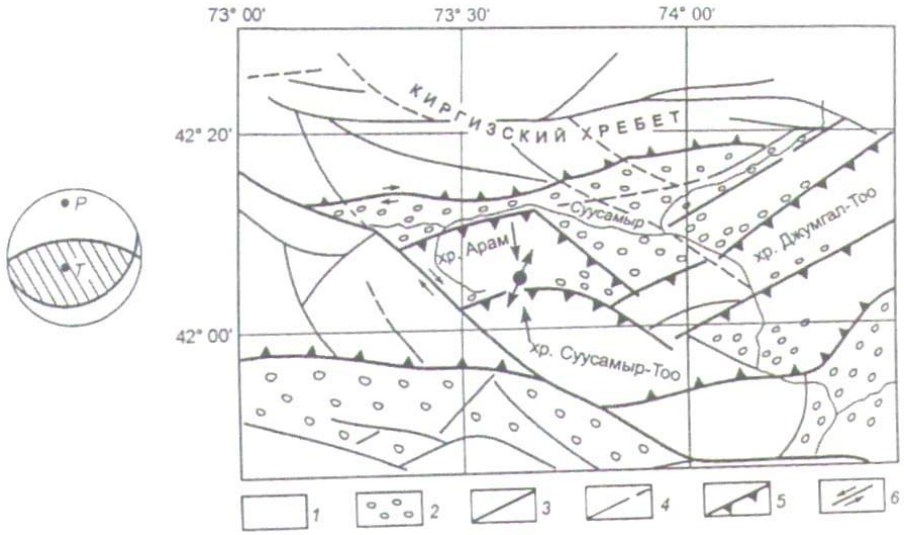


Рис. 1. Геолого-тектоническая схема района Сусамырского землетрясения [8]. 1 – докайнозойское отложение, 2 – кайнозойское отложение, 3 – основные краевые разломы, 4 – предполагаемые разломы, 5 – взбросы и надвиги, 6 – сдвиги. Стрелками показаны оси сжатия и растяжения в эпицентре Сусамырского землетрясения. Слева от основного рисунка представлена диаграмма механизма очага главного землетрясения по данным Harvard CMT catalog (верхняя полусфера).

По данным сейсмологического изучения очаговой зоны интервал глубин гипоцентров афтершоков хорошо согласуется с глубиной главного толчка. В целом же очаг Сусамырского землетрясения разместился в дизъюнктивном узле пересечения разломов близширотной тяньшанской (Арамсуйский взбросо-сдвиг) и северо-западной таласо-ферганской (Ичкелетау-Сусамырский сдвиг) ориентировок.

Сусамырское землетрясение произошло в зоне сейсмического затишья, что считалось характерным для внутренней части Тянь-Шаня и при $M = 7.4$ ощущалось в эпицентральной области интенсивностью 9–10 баллов. Землетрясение сопровождалось большим количеством афтершоков, которые продолжались несколько лет. Принимая во внимание, что афтершок с $M = 6.7$ незначительно отстает от основного толчка как по времени (через 1 час и 8 минут), так и по магнитуде (на 0.7 единицы), в случае Сусамырского землетрясения можно говорить о сопряженном двойном толчке [4].

Методика исследования, полученные результаты и их обсуждение

На многих сейсмопрогнозных станциях Узбекистана наблюдались аномальные проявления гидрогеосейсмологических и геофизических параметров. Схема расположения прогностических станций представлена на рис. 2. Как сказано выше, Сусамырское землетрясение затронуло обширную территорию Центральной Азии, в подтверждении этого можно привести аномальные проявления в скважинах станций Чартак (180 км), Ходжабад (190 км), Чимион (268 км), Ташкент (370 км), Хаватаг (480 км), Шурчи (650 км) и Бухара (850 км). Во всех станциях величина $M/\lg R$ имела значение больше 2.5 (где M – магнитуда, R – эпицентральное расстояния землетрясений, км). Для условности эту величину обозначим через $M/\lg R = I$. Величина I, применяется в качестве параметра, характеризующего интенсивность процессов подготовки землетрясений с учетом удаленности соответствующих очагов от центра полигона [11].

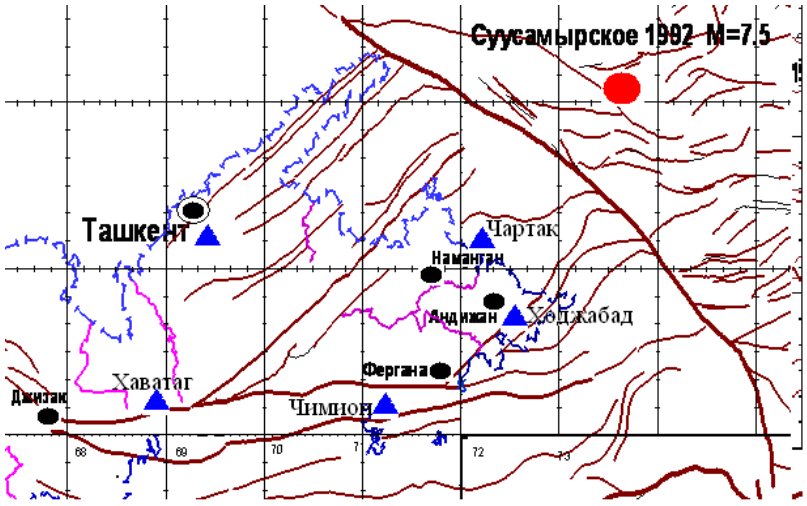


Рис. 2. Схематическая карта расположения водопунктов и эпицентра Сусамырского землетрясения.
– эпицентр землетрясения;
– ГГС прогностические станции [9]

Для Центральной Азии землетрясения, имеющие значения (I) больше или равно 2.5, можно рассматривать как входящие в зону чувствительности данного наблюдательного пункта, проводящего ГГС наблюдения [16]. Установлено, что все землетрясения с величиной I равной и более 2.5 вызывают аномальные изменения в режиме подземных вод.

Можно предположить, что ГГС аномалии, отмеченные в связи с сейсмическими событиями в пределах чувствительности наблюдательного пункта исследуемого полигона, отражают некоторый интегральный эффект различных физико-химических процессов в объеме пород, испытывающих упругие деформации. Напряженно-деформированное состояние водовмещающих пород играет первостепенную роль в образовании ГГС аномалий, формировании путей движения подземных вод в период подготовки и свершения сейсмической активности. Современные смещения, которые происходят в зонах тектонических разломов, приводят к растрескиванию водовмещающих пород и, таким образом, формируют сеть открытых проницаемых трещин, т.е. каналов движения подземных вод с различными физико-химическими характеристиками. Кроме трещинообразования ещё задействованы термические и деформометрические явления, которые могут изменять газо-химический и изотопный составы подземных вод. Для изучения напряженно-деформированного состояния земной коры разноранговых сейсмотектонических структур нами были выбраны: землетрясения крупного масштаба, т.е. ранга, произошедшие в 1991–1992 гг.

Наблюдательные пункты расположены по всей территории сейсмоактивных районов Узбекистана. Зафиксированы аномальные проявления гидрогеосейсмологических предвестников (ГГСП) по всем водопунктам наблюдательных станций. По-видимому, аномальные проявления ГГСП перед Сусамырским землетрясением (координаты 42.07°с.ш., 73.63°в.д.) отражают проявления напряженно-деформированного состояния разноранговых сейсмотектонических структур региона, т.е. обширную территорию Центральной Азии.

Таблица 1.

Сусамырское землетрясение 19.08.1992 г., $M = 7.4$																	
Ташкент		Чартак		Андижан		Чимён		Хаватаг		Жумабазар		Шурчи		Бухара		Жангелди	
R, км	*I*	*R*, км	*I*	*R*, км	*I*	*R*, км	*I*	*R*, км	*I*	*R*, км	*I*	*R*, км	*I*	*R*, км	*I*	*R*, км	*I*
380	**2.90**	180	**3.25**	180	**3.32**	270	**3.08**	470	**2.80**	610	**2.69**	670	**2.65**	820	**2.57**	870	**2.55**

Как видно из табл. 1 Сусамырское землетрясение 19 августа 1992 г. затронуло большую территорию Центральной Азии, т.е., на всех сейсмогенных зонах Узбекистана, для всех прогностических станций величина I (M/lg$R$) была больше 2.5. Несмотря на анизотропию среды и разделение разрывами пространства земной коры между очагом землетрясения и наблюдательными пунктами, все эти станции (водопункты) отреагировали на Сусамирское землетрясение своими аномальными проявлениями.

В настоящей работе в качестве ГГСП рассматриваются визуально выделяемые перед землетрясениями аномалии в изменениях временных рядов гидрогеосейсмологических данных на режим наблюдательных скважин. Аномалии в изменениях временных рядов, выделяемые статистическими методами, привлекаются лишь как дополнительное, но не определяющее подтверждение наличия ГГСП. Такой подход обусловлен тем, что рассмотрение ГГСП, как природного явления, предполагает, в первую очередь, использование методов, принятых в гидрогеологии и гидрогеохимии с привлечением актуальной информации о последующих землетрясениях, процессах их подготовки и реализации.

В обобщающих работах [6, 9] приводятся наиболее известные данные о геохимических предвестниках и показано, что данных о ГГСП сравнительно немного для однозначных выводов об их практической ценности. Вместе с тем, обобщение надежных данных о ГГСП при уточнении и расширении перечня параметров землетрясений, которым предшествовали ГГСП, позволяет оценивать общие закономерности связи ГГСП с будущими землетрясениями и характерные времена и заблаговременности их проявления. Получение таких оценок является первоочередной задачей в обеспечении научного базиса использования ГГСП для прогнозирования землетрясений. Кроме этого, наличие детальных гидрогеохимических и изотопно-геохимических данных о ГГСП в скважинах с естественным режимом самоизлива подземной воды позволяет анализировать механизмы формирования ГГСП, расширяя тем самым научный базис гидрогеосейсмологических исследований и теоретические представления о процессах в флюидонасыщенной среде сейсмоактивных регионов [17, 19].

В работе использовались временные ряды данных наблюдений за ГГС параметрами подземных вод на прогностических станциях Узбекистана (артезианских бассейнов Приташкентского и Ферганского, месторождений – Хаватаг, Жумабазар и Шурчи, на скважине Бухара) полученные за 1991–1992 гг. Сейсмопрогностическим мониторинговым Центром МЧС Республики Узбекистан.

Традиционным методом гидрогеохимических наблюдений является отбор проб воды и газа на самоизливающихся скважинах и источниках с последующим выполнением химического анализа состава воды и газа в лабораторных условиях. Периодичность гидрогеохимических наблюдений, обычно, составляет от одних до нескольких раз за неделю. В результате таких трудоемких мероприятий формируются временные ряды различных гидрогеохимических показателей, которые анализируются в сопоставлении с сильными землетрясениями. Определенные трудности в выделении ГГСП связаны с влиянием различных природных и техногенных факторов на режим водопроявлений, с условиями пробоотбора, особенностями химического анализа отдельных компонентов состава

подземных вод и газа, а также с возможным наложением эффектов динамического воздействия напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород на ГГСП и др.

Таким образом, задача изучения процессов образования ГГСП и закономерностей их проявления в целях использования для прогноза времени сильных землетрясений является комплексной и сложной. В основе ее решения лежат достоверные данные о проявлениях ГГСП в режиме подземных вод сейсмоактивных регионов, различающихся геолого-тектоническим строением, сейсмическими и гидрогеологическими условиями. По совокупности данных ГГСП оценивается связь их проявления с параметрами будущих землетрясений и механизмы формирования в природных водоносных системах и в системе «скважина – водовмещающая порода». Рассматриваются закономерности проявления ГГСП в связи с сильными землетрясениями и процессы их формирования на основе модели механического смешивания контрастных по газо-химическому составу вод в зонах повышенной водопроводимости [1, 5, 7, 12] и физико-химического анализа взаимодействия в системе «газ – вода – порода» [13, 14].

Данный метод поиска предвестников землетрясений основывается на чувствительности подземной гидросферы к изменениям напряженно-деформированного состояния земной коры на стадиях подготовки землетрясений [5]. Он представляет собой систему гидрогеодинамических (уровень воды, дебит источников и скважин, пластовое давление), гидрогеохимических (состав воды, газов и изотопов) и температурных показателей.

Рассмотрим по всем водопунктам отдельные параметры, которые проявились во время подготовки и свершения Сусамырского землетрясения.

Углекислый газ является одним из самых активных и информативных предвестников землетрясений для нашего региона. Он проявил себя как предвестник перед такими землетрясениями, как Таваксайское, Назарбекское, Избасканское, Учкурганское и др. Параллельно с изучением концентрации углекислого газа в подземных водах измерялись и изотопный состав углерода $\delta^{13}C$ в CO_2 растворенном в подземных водах в Ташкентском геодинамическом полигоне и частично на скважинах Чартакской прогностической станции. Получены убедительные результаты по выяснению генетической принадлежности углекислого газа во время подготовки сильных землетрясений. Т.е. изотопным исследованием доказано, что аномальные проявления углекислого газа связаны с напряженно-деформированными процессами в карбонатной системе «газ – вода – порода», а $\delta^{13}C$ выступает как индикатор [15].

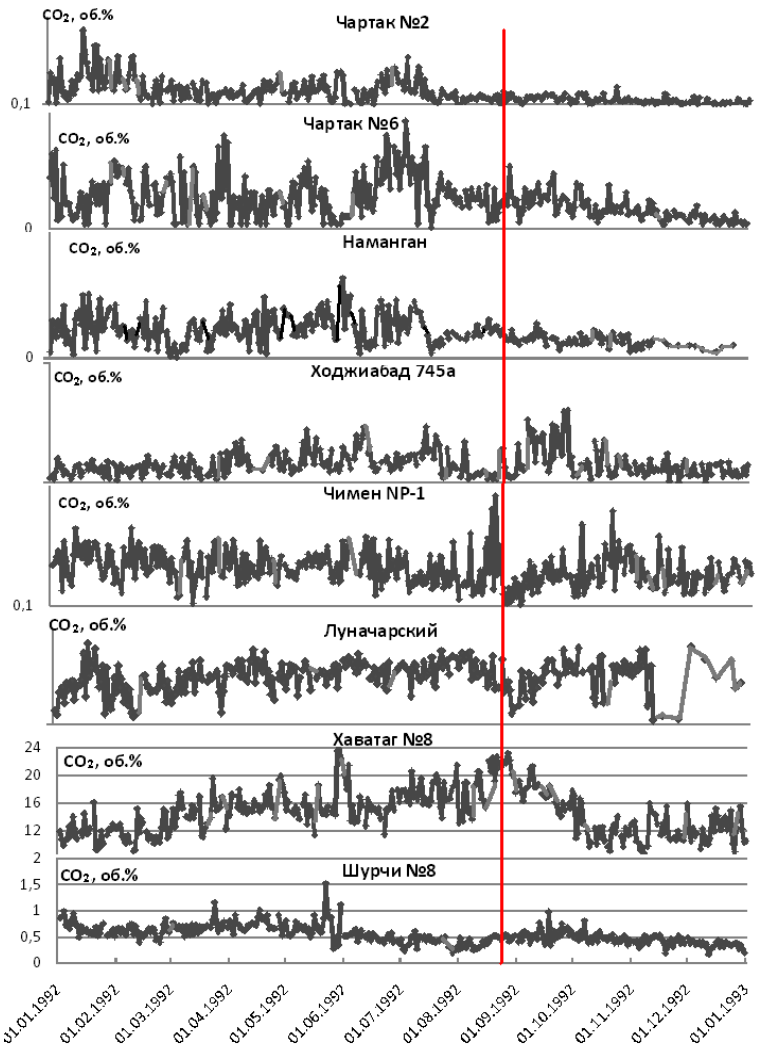


Рис. 3. Аномальные вариации CO_2 в подземных водах Узбекистана во время Сусамырского землетрясения

На рис. 3 видно, что один из самых активных и информативных ГГСП – CO_2 проявился почти во всех водопунктах всех сейсмоактивных районов Узбекистана. Одной из видимых особенностей

этого предвестника является то, что чем ближе наблюдательный пункт к эпицентру аномалия проявляется перед землетрясением и чем дальше от эпицентра она проявляется во время или же после землетрясения. Аномальные проявления углекислого газа в подземных водах в основном объясняются нарушением равновесия в карбонатной системе («газ – вода – порода») подземных вод и трещинообразованием в водовмещающих породах во время напряженно-деформированного состояния земной коры.

К аномальным проявлениям можно отнести и изменения органических компонентов газового состава, т.е. содержания ***метана CH_4*** в подземной воде (рис. 4).

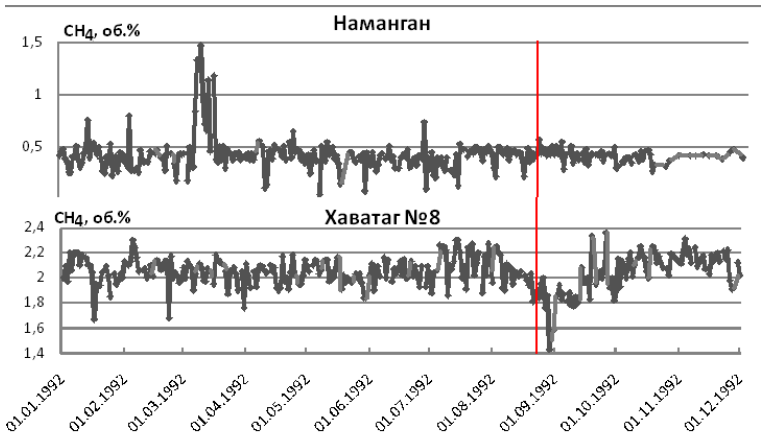


Рис. 4. Аномальные вариации CH_4 в подземных водах сейсмоактивных районов Узбекистана во время Сусамырского землетрясения

На рис. 4 видно, что, на ближайшей станции положительная аномалия органического газа проявляется перед землетрясением (в начале марта, примерно за 5 месяцев до события), а на дальней станции, т.е. в Хаватаге проявилась во время событий (отрицательная аномалия).

В ***температурном*** отношении во всех скважинах в подземной воде имелись аномалии и выражались, в основном, в повышении температуры (Чартак, Ходжабад, Хаватаг) перед землетрясением, а в Ташкентских скважинах аномалии наблюдались во время землетрясений (рис. 5).

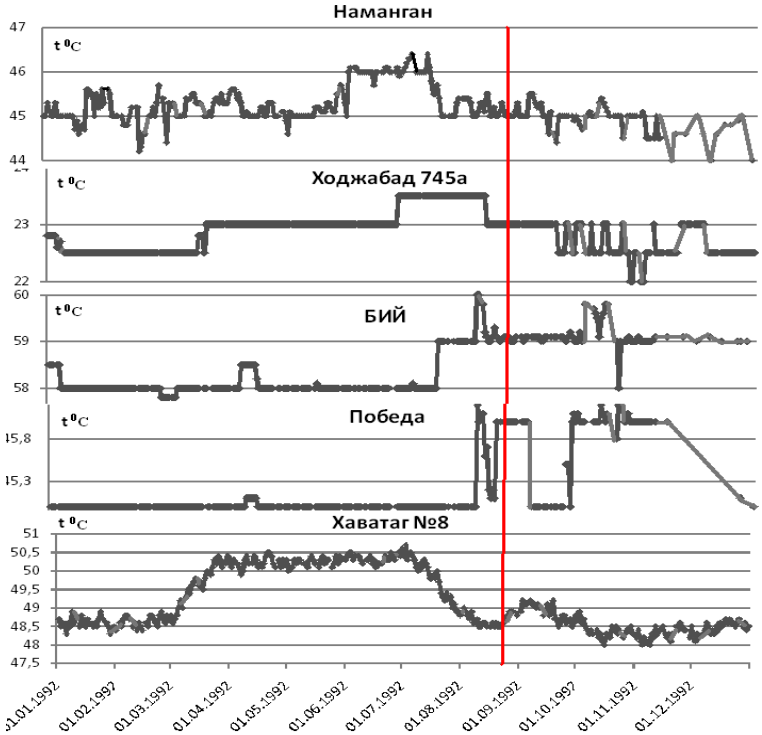


Рис. 5. Аномальные вариации температуры (t°C) в подземных водах сейсмоактивных районов Узбекистана во время Сусамырского землетрясения

Растворенный газ – радон проявил себя на ближайшей станции (скв. Наманган) перед землетрясением положительной аномалией, а на дальней станции (Хаватаг) тоже перед землетрясением, но отрицательной аномалией (рис. 6). Видимо здесь играли роль процессы сжатия (Наманган) и растяжения (Хаватаг) горных водовмещающие слоев.

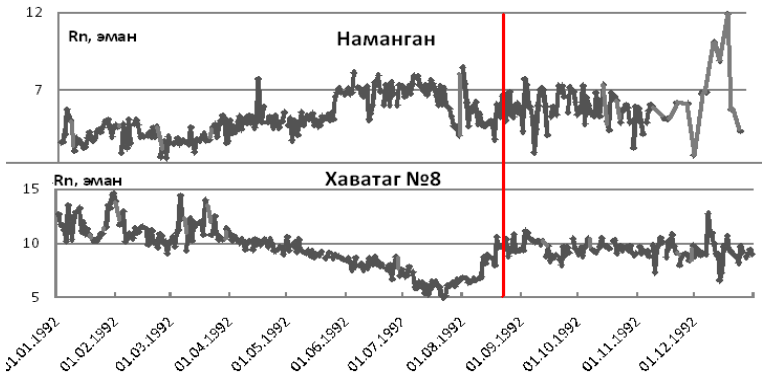


Рис. 6. Аномальные вариации содержание Rn в подземных водах сейсмоактивных районах Узбекистана во время Сусамырского землетрясения

Показатели среды подземных вод тоже испытывал аномальные вариации на Сусамырское землетрясение. Во многих водопунктах сейсмоактивных районах Узбекистана зафиксированы предвестники (см. рис. 7, 8).

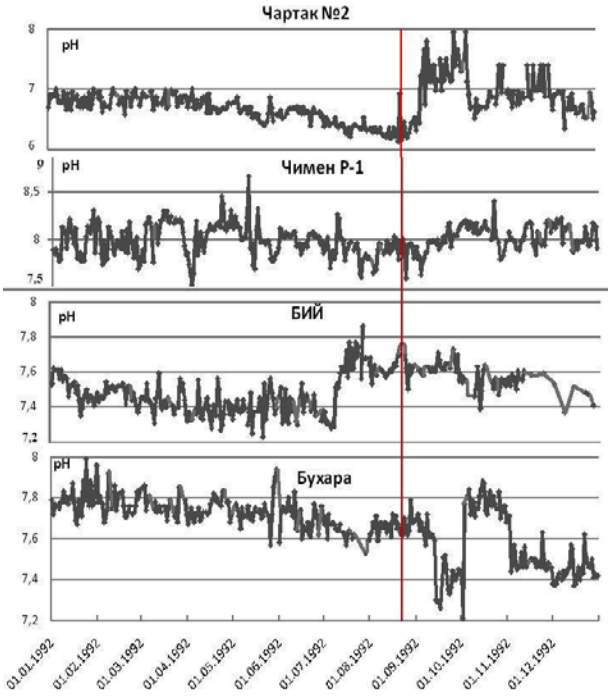


Рис. 7. Аномальные вариации величины pH в подземных водах сейсмоактивных районов Узбекистана во время Сусамырского землетрясения

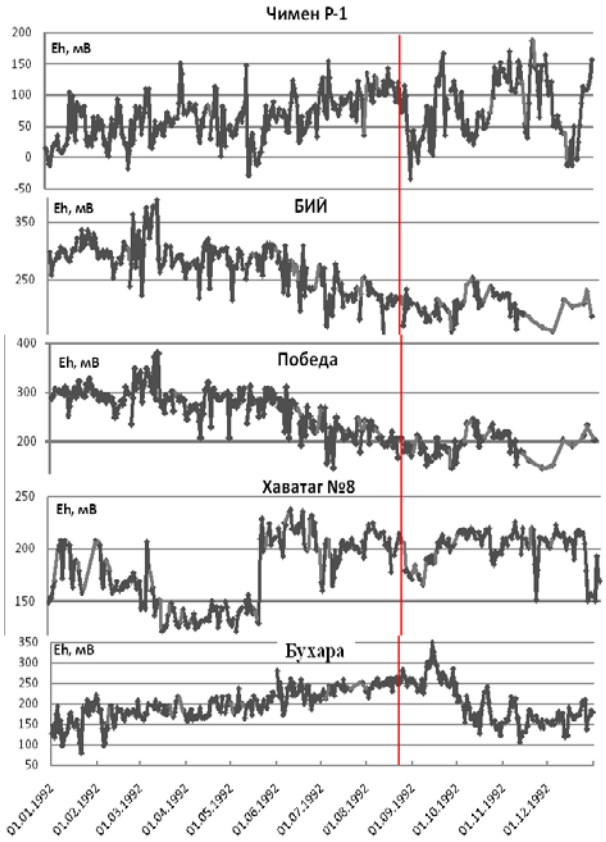


Рис. 8. Аномальные вариации величины Eh в подземных водах сейсмоактивных районов Узбекистана во время Сусамырского землетрясения

Таким образом, в проявлении землетрясений и связанных с ними предвестников особое место занимает пространственное положение тектонических блоков и ограничивающие их сейсмогенные разломы. При проявлении предвестников на большие расстояния определяющую роль играют масштабы тектонических блоков, по границам которых распространяется импульс тектонической активизации.

Степень «чувствительности» отдельных пунктов, характер, интенсивность и время проявления предвестниковых аномалий обусловлены, в первую очередь, общностью или различием структурно-геологических и сейсмотектонических условий местоположения очагов землетрясений и пунктов наблюдений, а также интенсивностью готовящегося землетрясения. Неоднозначное поведение предвестниковых параметров, даже тогда, когда очаг землетрясения расположен относительно недалеко от пункта наблюдения, свидетельствует о том, что существуют другие факторы, которые контролируют проявления предвестниковой деформации в разных масштабных

уровнях (рангах). До настоящего времени не установлен механизм передачи предвестникового возмущения на большие расстояния, не до конца изучена роль тектонических неоднородностей в процессе распространения деформационного поля. Решения необходимо искать на пути учета неоднородности поля деформаций, обусловленного блоково-разломным строением литосферы. Известно, что структура блоков земной коры иерархически упорядочена [3]. Результаты исследований показывают, что структурные особенности с размерами, изменяющимися от тысячи километров до сантиметров, приводят к появлению локальных полей напряжений с таким же диапазоном размеров [10]. Силы внешнего воздействия объединяясь с внутренними энергетическими источниками создают сложную геодинамическую обстановку сейсмоактивных территорий. Каждая тектоническая структура, в зависимости от своего масштабного уровня, испытывает действия полей напряжений всех уровней характерных размеров.

Но, все-таки, главная причина всех проявлений (предвестники и землетрясения) обусловлена, изменением напряженно-деформированного состояния земной коры всего региона. От этого фактора зависит амплитуда и длительность аномальных проявлений и энергетическая характеристика предстоящего землетрясения. Детальное исследование этого фактора побуждает нас к изучению причинно-следственной взаимосвязи аномальных изменений прогностических полей с возникшими землетрясениями, механизма передачи предвестникового возмущения на большие расстояния от эпицентра и влияние разноранговых пространственных неоднородностей геологической среды на проявления аномальных возмущений, связанные с подготовкой землетрясений.

Становится очевидным, что для понимания природы процесса подготовки землетрясения и разработки универсальных методов прогноза необходим глубокий анализ современной геодинамической ситуации региона в целом и более тонких тектонических особенностей и оценка роли геолого-тектонических особенностей пунктов наблюдений в проявлении и формировании предвестников землетрясений.

Таблица 2 показывает нам общую тенденцию напряженно-деформационного состояния земной коры в региональном масштабе. Изменения в газо-химическом составе в подземных водах выступают как индикаторы степени деформированного состояния земной коры в данном регионе. Для наглядности были отмечены зеленым все параметры, которые проявились в до-сейсмической активизации, желтым отмечены параметры, проявившейся ко-сейсмической активизации, а красным отмечены параметры, проявившиеся уже пост-сейсмически. Как видно, **предвестники** в основном проявились на близких расстояниях, т.е. на станциях ближе к эпицентру землетрясений. Чем дальше от эпицентра, тем меньше проявились прогнозные способности ГГС параметров. С другой стороны, эти аномалии прямо пропорциональны энергии землетрясений. Мы это видим на примере Сусамырского землетрясения, несмотря на неоднородности или пересекающиеся разломы вдоль и поперек, на удаленность наблюдательного пункта аномальные проявления все-таки наблюдались.

Это указывает нам, что, независимо от геолого-тектонических условий для сильных землетрясений, как Сусамырское ($M = 7.4$), распространения деформационного поля далеко уходит за пределы одного полигона, охватывает большие территории, т.е. на тысячи километров.

Таблица 2.

Станц.	**Скважины**	***R*, км**	***M*/lg*R***	**Досейсмич. параметры**	**Косеймич. параметры**	**Постсейсм. параметры**
Чартак	Скв.2	180	3.25	CO_2, He, ^{o}t, Eh, pH		P
	Скв.6			CO_2, He		
	Скв. Наманган			CO_2, He, ^{o}t CH_4	Eh	
Ходжаб		180	3.32		t^{o}	CO_2, Cl^{-}, P, HCO_3^{-}
Чимион	Скв.Р-1	210	3.08	^{o}t, pH, Eh, Si_2O		
	Скв. НР-1			CO_2,		
Ташкент	БИЙ	380	2.90		CO_2, ^{o}t, Eh	
	Победа				^{o}t. Rn, Eh	
Хаватаг		410	2.89	Rn, ^{o}t, , CH_4	CO_2, Eh	
Шурчи		670	2.65			CO_2,
Бухара		820	2.57			Eh, pH

Список литературы

1. *Багачкин Б.М., Плетнев К.Г., Рогожин Е.А.* Суусамырское землетрясение 1992 г.: материалы геологического и сейсмологического изучения в ближней зоне // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: Геоинформмарк, 1993. С. 143–147.

2. Гидрогеохимические особенности некоторых сейсмоактивных зон Средней Азии. А.Н. Султанходжаев и др. Ташкент: Фан, 1977. С. 9–21.

3. *Головков В.П., Нурматов У.А., Нармирзаев Ф.Д.* Современные движения земной коры и сейсмичность. Ташкент: Фан, 1990. 179 с.

4. *Кальметьева З.А., Миколайчук А.В., Молдобеков Б.Д. и др.* Атлас землетрясений Кыргызстана. Бишкек: ЦАИИЗ, 2009. 73 с.

5. *Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2009. 328 с.

6. *Копылова Г.Н., Воропаев П.В* Процессы формирования постсейсмических аномалий химического состава термоминеральных вод // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 42–48.

7. *Копылова Г.Н., Гусева Н.В, Копылова Ю.Г., Болдина С.В.* Химический состав подземных вод режимных водопроявлений Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка: типизация и эффекты сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2018. № 4. С. 43–62. DOI: 10.1134/S0203030618040041.

8. *Кучай О.А., Муралиев А.М., Абдрахматов К.Е. и др.* Сусамырское землетрясение 1992 года и поле деформации афтершоковой последовательности // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 11. С. 1038–1048.

9. *Нурматов У.А., Юсупов Ш.С., Шин Л.Ю., Юсупджанова У.А.* Связь особенностей проявления гидрогеосейсмологических предвестников землетрясений с сейсмотектонической обстановкой // Геология и минеральные ресурсы. № 2. Ташкент, 2016. С. 38–43.

10. *Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю.* Перестройка тектонического поля напряжений в очагах землетрясений в окрестностях систем тектонических разрывов // Физические процессы в очагах землетрясений М.: Наука, 1982. С. 82–98.

11. *Серафимова Ю.К., Копылова Г.Н.* Среднесрочные предвестники сильных ($M \geq 6.6$) землетрясений Камчатки 1987–2007 гг.: ретроспективная оценка их информативности для прогноза // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 3–12.

12. *Султанходжаев А.Н. и др*. Гидрогеосейсмологические исследования в Восточной Фергане. Ташкент: ФАН, 1978. С. 6–47.

13. *Султанходжаев А.Н., Латипов С.У., Зиган Ф.Г. и др.* Гидрогеосейсмологические предвестники землетрясений / Под.ред. акад. Мавлянова Г.А. Ташкент: ФАН, 1967. 136 с.

14. *Чернявский Е.А.* К вопросу о методике вывода суточного хода атмосферно-электрического потенциала // Информ. сб. по земному магнетизму и электричеству. М.: Гидрометеорологическое изд-во, 1937. С. 82–86.

15. *Юсупов Ш.С.* Изотопная геохимия углерода подземных вод Центральной Азии / Под. ред. акад. Абдуллабекова К.Н. Ташкент: Изд. СИВАШ, 2017. 219 с.

16. *Юсупов Ш.С., Шин Л.Ю.* Зона чувствительности гидрогеосейсмологического предвестника землетрясений (углекислый газ) // Геология и минеральные ресурсы. № 6. Ташкент, 2016. С. 53–56.

17. *Kopylova G., Boldina S.* Anomalies in Groundwater Composition Caused by Earthquakes: Examples and Modeling Issues // E3S Web of Conferences 98, 01029 (2019), https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199801029 *WRI-16.3*.

18. *Mellors B.I., Vernon F.L. Parvis G.L. et al.* The M_s=7.3 1992 Suusamyr, Kyrgystan, Earthquake on Fault Geometry and Source Parameters Based on Aftershocks andBody-Wave Modeling // B SSA. 1997. V. 87. № 1. P. 11–22.

19. *Wang R., Woith H., Milkereit C., Zschau J.* Modelins of hydrogeochemical anomalies induced by distant earthquakes // Geophys. J. Int. 2004. V. I 57. P. 717–726.

РЕШЕНИЕ
VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов»

С 26 сентября по 2 октября 2021 г. в г. Петропавловке-Камчатском в очно-дистанционном формате прошла VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов». Это научное мероприятие проводится раз в два года, его организатором выступает Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук». В текущем году Конференция сменила название, что отражает существенное расширение тематики мероприятия. Несколько лет назад камчатская Конференция приняла эстафету научных совещаний «Проблемы сейсмичности Дальнего Востока России», став единственной в Российской Федерации регулярной многопрофильной конференцией, на которой комплексно рассматриваются научно-методические, технические и прикладные аспекты исследования и контроля опасных геодинамических процессов.

В работе Конференции приняли участие более 110 ученых из России и стран ближнего и дальнего зарубежья, в том числе 28 докторов и 44 кандидата наук. Представители России прибыли из Москвы, Обнинска, Апатитов, Сыктывкара, Екатеринбурга, Новосибирска, Иркутска, Красноярска, Магадана, Хабаровска, Владивостока, Южно-Сахалинска и пос. Паратунка Камчатского края. Зарубежные страны были представлены 7 специалистами из Великобритании, Украины, Узбекистана, Таджикистана и Азербайджана.

На открытии Конференции выступили: научный руководитель Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, д-р физ.-мат. наук, академик РАН Е.И. Гордеев; заместитель директора ИНГиГ СО РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН И.Ю. Кулаков; директор КФ ФИЦ ЕГС РАН, канд. физ.-мат. наук Д.В. Чебров.

Открытие конференции (слева направо): директор Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, канд. физ.-мат. наук Д.В. Чебров; научный руководитель ИВиС ДВО РАН, д-р физ.-мат. наук, академик РАН Е.И. Гордеев; заместитель директора ИНГиГ СО РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН И. Ю. Кулаков. 27.09.2021 г.
Фото А. Сокоренко.

Очные участники VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов». 27.09.2021г.
Фото А. Сокоренко.

В течение недели сейсмологи, геофизики, вулканологи и специалисты по цунами имели возможность обменяться мнениями по широкому кругу вопросов от организации инструментального сейсмического и геофизического мониторинга до проблем снижения рисков и смягчения последствий стихийных бедствий на территории сейсмоактивных регионов Российской Федерации и ближнего зарубежья. В ходе Конференции был затронут широкий круг проблем по исследованию сейсмичности, предвестников землетрясений, их прогнозу и вопросов предупреждения о цунами. Рассматривались результаты сейсмического мониторинга вулканов и прогнозы вулканических извержений. Было представлено и обсуждено 74 устных и 47 стендовых докладов. Из-за сложной эпидемиологической обстановки часть работ были представлены дистанционно, что позволило существенно расширить круг участников. Кроме того, а в ходе Конференции в смешанном формате был проведен Круглый стол «Система предупреждения о цунами в России: современное состояние и задачи на будущее».

Была организована и проведена автомобильно-пешеходная научная экскурсия в район кальдеры вулкана Горелого с посещением водопада Медвежий и лавовых пещер. Также были организованы экскурсии по Петропавловску-Камчатскому, посещение Информационно-обрабатывающего центра «Петропавловск» КФ ФИЦ ЕГС РАН и Научного музея вулканологии ИВиС ДВО РАН.

К началу работы Конференции подготовлена брошюра, включающая тезисы и программу научного мероприятия. По результатам работы Конференции издан электронный сборник трудов, в который вошло более 80 статей, отражающих содержание представленных докладов. Разработано Решение, которое опубликовано в Сборнике трудов конференции и на сайте Конференции по адресу http://emsd.ru/conf2021. Очередную научно-техническую конференцию рекомендовано провести осенью 2023 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Российская академия наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Единая геофизическая служба Российской академии наук»
Камчатский филиал

Российский фонд фундаментальных исследований

Восьмая Всероссийская научно-техническая конференция
с международным участием
Проблемы комплексного геофизического
мониторинга сейсмоактивных регионов

26 сентября – 2 октября 2021 г.
г. Петропавловск-Камчатский

ПРОГРАММА
ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Петропавловск-Камчатский
2021

Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов».

Водопад Медвежий. 28.09.2021 г.
Фото А. Чемарёва.

Участники конференции на фоне Вилючинского вулкана. 28.09.2021 г.
Фото А. Чемарёва.

Заслушав и обсудив доклады, обменявшись мнениями по актуальным проблемам геофизического мониторинга опасных эндогенных процессов на Дальнем Востоке России и в других сейсмоактивных активных регионах, участники Конференции констатировали следующее:

Тематика Конференции реально отражает комплексный подход к геофизическому и сейсмическому мониторингу. Уровень представленных докладов достаточно высок, исследования охватывают широкий спектр проблем и сопоставимы с мировыми тенденциями развития наук о Земле.

Вместе с тем в последние годы состояние наблюдательных систем постепенно ухудшается. В условиях постоянно сокращающегося финансирования приходит в негодность оборудование сейсмических станций, автоматических постов для наблюдений за уровнем моря, пунктов геофизических наблюдений и оборудование системы сбора, обработки и хранения информации.

Конференция отмечает, что наиболее выдающиеся научные результаты последних лет в области сейсмологии опираются на данные Федеральной сети сейсмических наблюдений (ФССН). Ряд значимых результатов был получен на основе данных региональных сегментов ФССН – Сахалинского и Камчатского, что отражено в многочисленных публикациях в ведущих мировых научных журналах. Это в очередной раз подтверждает важность развития и поддержки национальной системы сейсмического мониторинга, прежде всего, как информационной базы для фундаментальных исследований в области наук о Земле, без которой невозможно ожидать прогресса в ряде актуальных научных направлений, включая прогнозирование землетрясений. Масштабные краткосрочные сейсмические эксперименты, которые в настоящее время являются одним из перспективных методов сверхдетальных исследований в районах действующих вулканов, резко теряют эффективность без привязки к

глобальным и региональным системам сейсмических наблюдений. Изолированный мониторинг ответственных сооружений (газопроводов, АЭС, ГЭС и прочих объектов инфраструктуры, а также горных выработок и разрабатываемых месторождений полезных ископаемых) без обеспечения его сопряжения с методической и наблюдательной базой ФССН демонстрирует низкую эффективность и не обеспечивает адекватную оценку локальной сейсмической опасности.

Одной из важнейших функций ФССН остается обеспечение Службы срочных сейсмических донесений (ССД) и Службы предупреждения о цунами (СПЦ). Решение этих задач непосредственно касается безопасности населения и приобретает особую важность в наиболее сейсмически активных и цунамиопасных районах России, таких как Сахалин, Камчатка и Курильские острова. Полученные результаты позволяют уверенно планировать дальнейшие работы, в области более точного и быстрого оповещения об опасных природных событиях, прогнозирования сейсмической обстановки, извержений вулканов, цунами, а также прогноза развития чрезвычайной ситуации.

До настоящего времени не решен вопрос специального целевого финансирования Сейсмической подсистемы Системы предупреждения о цунами (далее СП СПЦ). Это означает, что возможности СП СПЦ могут существенно понизиться уже в ближайшее время, что отрицательно скажется на безопасности населения Дальнего Востока России. Конференция констатирует отсутствие полноценной современной гидрофизической подсистемы СПЦ на Дальнем Востоке России. Вследствие этого Россия является едва ли не единственной страной бассейна Тихого океана, не имеющей глубоководных станций измерения уровня океана, позволяющих осуществлять оперативный прогноз цунами.

Десятилетняя пауза в технологическом и методическом развитии отечественной СПЦ привела к износу основного парка оборудования и приборов, отставанию в технологиях от ведущих центров предупреждения о цунами тихоокеанского региона. Эта система не позволяет в полной мере отвечать на современные вызовы, главные из которых – быстрый и точный выпуск тревоги цунами с четкой локализацией по участкам побережья в формулировках, позволяющих автоматизированное использование в системах поддержки принятия управленческих решений при предупреждении и ликвидации ЧС. В то же время ведущие мировые державы продолжают совершенствовать свои системы предупреждения и стремительно наращивают отрыв от российской СПЦ. Накопленное отставание отечественной СПЦ от зарубежных систем пока не является критичным. Имеющийся в России научно-технический задел позволит существенно сократить его в первые же годы, при условии запуска соответствующей национальной программы.

Решение одной из важнейших задач сейсмологии – проблемы прогноза землетрясений и извержений вулканов возможно только на основе детального многолетнего комплексного мониторинга. На Камчатке достигнуты некоторые успехи в области прогноза землетрясений: создан ряд методов прогнозирования, которые применяются в рутинном режиме, ведутся непрерывные наблюдения по широкому спектру методов, производится регулярная комплексная оценка прогнозов в рамках деятельности Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС). Эти результаты внушают определенный оптимизм, в то же время следует заключить, что задача прогноза сильных землетрясений далека от окончательного и точного решения. Накопленный опыт многолетней работы КФ РЭС, в том числе архив этого совета, содержащий данные о проявлениях предвестников и прогнозах землетрясений по отдельным методам, необходимо сделать достоянием отечественной и мировой сейсмологии путем создания открытой базы данных и ее включения в состав информационных ресурсов ФИЦ ЕГС РАН.

Более весомо выглядят успехи, достигнутые при разработке и применении методик прогнозировании извержений вулканов Камчатки. Практически отсутствуют сомнения, что эти методики можно распространить на другие действующие вулканы. Особое внимание при этом следует уделять вулканам, представляющим наибольшую опасность для населения, а

именно находящимся в непосредственной близости от крупных населенных пунктов Камчатского края: Авачинскому, Корякскому, Горелому и Мутновскому. Существующая система мониторинга состояния этих вулканов не обеспечивает надежный контроль опасности их извержений.

Следует особо отметить присутствие на Конференции большого числа молодых исследователей, многие из которых сделали интересные научные доклады.

Конференция рекомендует:

Рассматривать Федеральную сеть сейсмических наблюдений и ее региональные сегменты как основную информационную базу для фундаментальных и прикладных исследований в области наук о Земле. Добиваться государственной поддержки национальной системы сейсмического мониторинга, значимость которой возрастает в связи со значительной активизацией техногенной сейсмичности не только в сейсмоактивных, но и на асейсмичных территориях России.

В связи с высокой сейсмической опасностью района гг. Петропавловск-Камчатский, Елизово и Вилючинск, расположенных на восточном побережье полуострова Камчатка, необходимо обратить самое пристальное внимание государственных органов на необходимость обеспечения надежного и непрерывного функционирования системы комплексного геофизического мониторинга на территории Петропавловского геодинамического полигона, включая сейсмологические, геодезические, геофизические, гидрогеохимические и другие виды наблюдений.

Предпринять усилия по разработке межведомственной программы развития и модернизации на современной технологической основе российской системы предупреждения о цунами (СПЦ) на дальневосточном побережье Российской Федерации и создании новой СПЦ для Чёрного моря. Данная программа должна охватывать широкий круг вопросов, включающих расширение наблюдательных сетей, введение новых методов мониторинга и оценки цунамигенного потенциала землетрясений, исследования цунами несейсмического происхождения, широкого использования результатов моделирования воздействий цунами и разработки новых регламентов СПЦ и организации взаимодействия с международными программами МОК ЮНЕСКО.

Очередную научно-техническую конференцию с названием «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов» провести осенью 2023 г.

Оргкомитету Конференции рекомендовать ряд представленных материалов к публикации в ведущих научных журналах.

Посвятить сборник трудов Конференции 2021 года памяти камчатских сейсмологов: Тамары Георгиевны Константиновой, Юлии Александровны Кугаенко, Дмитрия Анатольевича Ототюка, Павла Павловича Фирстова и Владимира Алексеевича Широкова – организаторов и постоянных участников Конференции.

Материалы Конференции разместить на сайте Камчатского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» по адресу http://emsd.ru/conf2021.

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

А

Акбашев Р.Р. 359

Александров П.Н. 22

Алешина Е.И. 147

Арапов В.В. 172

Артемова А.И. 172

Аптикаева О.И. 27

Архипова Е.В. 59

Атрохин В.В. 147

Б

Баранов Б.В. 112

Баранов С.В. 152

Батсайхан Ц. 167

Батухтин И.В. 32, 99

Беседина А.Н. 32, 99

Блох Ю.И. 36

Богданов В.В. 157, 245

Болдина С.В. 41, 264, 396

Бондаренко В.И. 36

Брагинская Л.П. 378

Брыжак Е.В. 167

Брянцева Г.В. 59

Будилова Е.А. 405

Бурмин В.Ю. 241

Бусс Ю.Ю. 51,245

В

Ваганова Н.В. 192

Валитов М.Г. 46

Верхоланцев Ф.Г. 199

Власов Ю.А. 51

Воронина Т.А. 333

Г

Габдарахманова Ю.В. 147

Гаврилов В.А. 51, 245

Герман В.И. 162

Гейслер В. 112

Гилева Н.А. 95

Гладышев Е.А. 172

Глинский Б.М. 293

Гоев А.Г. 363

Горбунова Э.М. 32, 99

Губанова А.А. 338

Григорюк А.П. 378

Гусев О.И. 341

Д

Делемень И.Ф. 382

Денисенко В.П. 51

Дещеревский А.В. 51, 245

Джурик В.И. 167

Долгаль А.С. 36

Долгая А.А. 387

Долгих В.П. 396

Должикова А.Н. 216

Дрознин Д.В. 216, 228, 338, 372

Дрознина С.Я. 216, 221, 228

Дягилев Р.А. 199

Е

Еманов А.А. 172

Еманов А.Ф. 172

Ескин А.Ю. 167

Ж

Жигалин А.Д. 59

З

Заводевкин И.А. 323, 392

И

Ивельская Т.Н. 346

Идармачев И.Ш. 138

К

Кайстренко В.М. 349

Карпенко Е.А. 216

Карпенко Л.И. 147

Касимова В.А. 64

Кобелева Е.А. 172

Кобзев В.А. 396, 401

Ковалевский В.В. 378

Кожевникова Т.Ю. 216, 221, 228

Козьмин Б.М. 112

Козырева О.В. 274

Коновалова А.А. 241, 252, 258

Копылова Г.Н. 41, 64, 69, 264, 405

Коркина Г.М. 396, 401, 405

Кравченко Н.М. 252

Крупина Е.М. 338

Крылов А.А. 112

Крюгер Ф. 112

Кулешов Д.А. 74

Куляндина А.С. 112

Курткин С.В. 147

Кучай М.С. 268, 298

Л

Лавров В.С. 59

Левочкин К.Р. 74

Лемзиков М.В. 78

Лисунов Е.В. 178

Лоскутов А.В. 333

Любушин А.А. 64, 69, 83

М

Макаров Е.О. 74, 312

Малышев А.И. 182

Малышева Л.К. 182

Мартинес-Беденко В.А. 274

Мартынов В.Н. 293

Матвеенко Е.А. 86, 92, 372, 414, 424

Митюшкина С.В. 92, 372, 414

Михеева А.В. 187

Морозов А.Н. 192

Морозова К.Г. 368

Морозова Ю.В. 51, 245

Моторин А.Ю. 152

Н

Назарова З.А. 216, 221, 228

Наумов С.Б. 410

Непеина К.С. 22

Новикова П.Н. 36

Носкова Н.Н. 199

Нуждина И.Н. 216, 221, 228

О

Остапчук А.А. 368

П

Павлов А.В. 157

Пантелеев И.А. 245

Папкова А.А. 95

Петрова В.В. 36

Петухова С.М. 99

Пилипенко В.А. 274

Пилипенко О.В. 36

Пинегина Т.К. 354

Плётц А. 112

Подкорытова В.Г. 172

Полетаев В.А. 283

Полтавцева Е.В. 51, 245

Предеин П.А. 107

Прошкина З.Н. 46

Пулинец С.А. 245

Пупатенко В.В. 202

Р

Радзиминович Н.А. 107, 172

Раевская А.А. 372

Расулов А.В. 428

Рашидов В.А. 36, 387

Ребецкий Ю.Л. 279

Резниченко Р.А. 363

Родкин М.В. 206

Ромашева Е.И. 92, 414

Рябинин Г.В. 283

С

Салтыков В.А. 104, 211, 241, 252, 258, 288, 316

Санжиева Д.П.-Д. 107

Сапетина А.Ф. 293

Сенюков С.Л. 216, 221, 228

Серафимова Ю.К. 69, 316

Серебренников С.П. 167

Славина Л.Б. 268, 298

Соболевская О.В. 216, 221, 228

Соловьева М.С. 405

Соломатин А.В. 236, 245

Стенькин Ю.В. 74

Сухов Р.Р. 307

Т

Таранова Л.Н. 64

Тарасов С.А. 363

Титов Е.М. 410

Толокнова С.Л. 216

Трусов А.А. 36

Тубанов Ц.А. 107

Туктаров Р.М. 112

Ф

Фатеев А.В. 172

Фараонов А.А. 414

Федористов О.В. 51

Федоров А.В. 363

Фирстов П.П. 74, 312, 323, 359, 392

Х

Хаберланд К. 112

Хакимзянов Г.С. 341

Хритова М.А. 418

Ц

Цуканов Н.В. 112

Цыдыпова Л.Р. 107

Ч

Чебров Д.В. 86, 117, 316, 338, 372

Чемарёв А.С. 414, 424

Чечельницкий В.В. 172

Чирков Е.Б. 125, 133, 138

Чубаров Л.Б. 341

Ш

Шагун А.Н. 167

Шакирова А.А. 323, 392

Шапиро Н.М. 216

Шарафиев З.З. 143

Шебалин П.Н. 152

Шевкунова Е.В. 172

Шибаев С.В. 112

Шин Л.Ю. 428

Шиокава К. 274

Щ

Щеголев О.Б. 74

Ю

Юсупов Ш.С. 428

F

Feshchenko A. 327

N

Norden D. 327

P

Pankov N. 327

Pankov F. 327

Pigulevskiy P. 327

S

Shcherbyna S. 327

Научное электронное издание

Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов

Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием
г. Петропавловск-Камчатский, 26 сентября–2 октября 2021 г.

Ответственный редактор
Чебров Данила Викторович

Статьи публикуются в авторской редакции. Мнения и позиции авторов не обязательно совпадают с мнением и позицией редакционной коллегии

Технический редактор С.В. Болдина

Дата подписания к использованию 25.09.2021. – Электронное издание. – 56 Мб. – Тираж 10 дисков. – Заказ № 139. – Минимальные системные требования: процессор с тактовой частотой 1.3 Гц и выше; оперативная память 128 Мб; операционные системы: Microsoft Windows XP/Vista/7/8/10, ОС MAC OS версии 10.8; программные средства: Acrobat Reader 4.0 и выше. – Загл. с этикетки диска.

Изготовлено в Камчатском филиале Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба Российской академии наук»

ISBN 978-5-903258-45-1

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Единая геофизическая служба Российской академии наук»
Камчатский филиал

683006 г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9