



# СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ОПАСНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ:

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОСНОВЕ



2016 г.

# СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ИНСТИТУТ ЗЕМНОЙ КОРЫ

# СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ОПАСНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ: результаты исследований на количественной основе

Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике (Иркутск, 19–23 сентября 2016 г.)

# Ответственные редакторы

проф., д.г.-м.н. К.Г. Леви к.г.-м.н. В.А. Саньков

Иркутск 2016

## УДК 551.24+550.34+551.24.03 ББК Д38я431+Д217.4я431+Д9(54)3я431 С56

Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 19–23 сентября 2016 г.). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. – 305 с.

В сборнике представлены материалы III Всероссийского совещания с одноименным названием и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике, проведенных Институтом земной коры СО РАН при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в г. Иркутске в период с 19 по 23 сентября 2016 г.

В публикуемых статьях приведены результаты исследований по различным аспектам современной геодинамики Центральной Азии и окружающих территорий. Освещены результаты изучения современных движений, источников внутриконтинентального тектогенеза, строения и напряженно-деформированного состояния деструктивных зон земной коры, современной и палеосейсмичности, проявлений опасных экзогенных процессов, динамики природных процессов как отражения солнечно-земных и геосферных взаимодействий, разработок по превентивным мероприятиям по снижению риска природных катастроф.

Книга будет полезна сейсмологам, геологам, специалистам в области тектоники, геодинамики, инженерной геологии, работникам служб ГО и МЧС, а также аспирантам, проводящим исследования в области современной геодинамики и сейсмологии, и студентам старших курсов вузов геолого-геофизических специальностей.

Сопредседатели Оргкомитета чл.-корр. РАН Е.В. Скляров проф., д.г.-м.н. К.Г. Леви

**Ученый секретарь** к.г.-м.н. В.А. Саньков

Проведение совещания и издание материалов осуществляются при организационной и финансовой поддержке ФАНО и РФФИ (грант 16-05-20637-г).

# Утверждено к печати Ученым советом ИЗК СО РАН (протокол № 7 от 09.06.2016 г.)

ISBN 978-5-902754-98-5

© Коллектив авторов, 2016 © ИЗК СО РАН, 2016

### От редакторов

В предлагаемой читателям книге «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе» опубликованы материалы III Всероссийского совещания с участием приглашенных исследователей из других стран и II Всероссийской молодежной школы, посвященных обсуждению обширного круга вопросов по современной геодинамике Центральной Азии и прилегающих территорий.

Исследования по современной геодинамике отличаются тем, что основной упор делается на инструментальные методы, что позволяет получать результаты, базирующиеся на количественных данных. Такие данные могут служить граничными условиями для различных геодинамических гипотез, являются основой для математического и физического моделирования и надежной базой для сопоставления по различным регионам. Этим подходом объединены собранные под одной обложкой статьи. Публикации затрагивают пять основных тематик совещания, логически связанных между собой:

1. Количественные оценки позднекайнозойских и современных движений территории Центральной Азии. Основные факторы, определяющие геодинамическую активность литосферы.

2. Деструктивные зоны литосферы Центральной Азии: разломно-блоковое строение, напряженное состояние, унаследованность развития на современном этапе.

3. Современная и палеосейсмичность как отражение геодинамической активности литосферы.

4. Опасные экзогенные процессы в зонах современной геодинамической активности литосферы.

5. Динамика природных процессов как отражение солнечно-земных и геосферных взаимодействий. Прогноз и превентивные мероприятия по снижению риска природных катастроф.

Необходимо отметить, что вопросы сейсмичности и палеосейсмичности рассматривались на совещании в рамках специального симпозиума, посвященного 100-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР В.П. Солоненко, который являлся родоначальником иркутской школы сейсмогеологии.

Работа по организации и проведению Совещания и молодежной Школы выполнялась в соответствии с проектом 1.8. «Современная геодинамика внутриконтинентальных областей: инструментальные и геолого-геоморфологические оценки движений и деформаций земной поверхности как основа изучения опасных природных процессов (на примере Центральной Азии)» программы ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 годы. Исследования, результаты которых публикуются, частично финансируются в рамках программы ИНЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей (0341–2015–0001)».

К.Г. Леви, В.А. Саньков

## РАЗДЕЛ І

# КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКИХ И СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ

УДК 550.24

### ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ И ТЕКТОНИКА ПЛИТ

### А.В. Викулин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация. Тектоника плит так и не стала «глобальной теорией Земли», тем самым не оправдались надежды ни геологов, ни специалистов в области геодинамики. Вместе с тем разработаны новые альтернативные подходы к решению геодинамических задач. Одним из таких подходов является созданная автором с коллегами ротационная модель геодинамического процесса. Проводится сравнительный анализ тектоники плит и ротационной модели. Показано, что ротационный подход является физически и геодинамически более обоснованным.

Ключевые слова: тектоника плит, вращение Земли, геодинамика, блоковая геосреда

Тектоника плит. Теорема Эйлера. Несмотря на исключительную важность теоремы Эйлера для тектоники плит, имеет место определенная вольность, с которой исследователи трактуют и саму теорему, и следствия из нее. Теорема Эйлера или Эйлера-Даламбера является математической теоремой. Более того, в приложении к геодинамическим движениям не выполняется необходимое и достаточное условие этой теоремы - на Земле отсутствует неподвижная точка: она помимо вращения вокруг своей оси вращается вокруг Солнца и в составе Солнечной системы вокруг центра Галактики. Как видим, отсутствуют и математические, и механические, и геодинамические основания для использования в тектонике плит строго доказанной математической теоремы.

Концепция «сила». При объяснении особенностей движения вращающейся геосреды применение концепции силы было фактически предопределено использованием теоремы Эйлера, в рамках которой в тектонике плит любые вращательные движения плит механически равнозначны соответствующим им трансляционным перемещениям по поверхности Земли. Отсюда и «глобальная сила тектоники плит» [1, с. 321], которая, «воздействуя на литосферные плиты» конвекционными течениями в мантии [6, с. 303], «создает большие напряжения» в литосфере [2, с. 3]. Таким образом, отсутствие математических и геодинамических оснований для применимости теоремы Эйлера для описания геодинамических движений в рамках тектоники плит не дает оснований для физически обоснованного использования и концепции силы в качестве основополагающей в задачах геодинамики.

Свойства геосреды. Такие свойства геосреды, как энергонасыщенность, реидность и способность образовывать так называемые вихревые геологические структуры, выявленные сами ми же геологами, в рамках тектоники плит не могут найти своего объяснения, и, видимо, по этой причине ее последователями, как правило, и не рассматриваются, и не анализируются. Нелинейные свойства геосреды, выявленные геофизиками, геологами, анализируются и используются, по сути, на «бытовом уровне».

Волновая геодинамика. Применение теоремы Эйлера и, как следствие, использование концепции «сила» привели к тому, что уравнения движения, и «твердой» земной коры, и литосферы, и вязкой астеносферы в механических моделях в рамках тектоники плит записаны в инерциальной, не вращающейся системе координат [1, 3], что представляется странным, поскольку Земля является вращающейся планетой; с физической точки зрения такой «инерционный» подход к задачам геодинамики является очевидным «промахом». При этом авторы многочисленных физико-математических тектонических моделей даже не пытаются хоть как-то пояснить, почему в уравнениях движения и «твердых» земной коры и литосферы и вязкой астеносферы отсутствуют соответствующие ротационные члены, которые должны описывать компоненты движения, ответственные за вращение планеты. Очевидно, что такое «пренебрежение» физическими и геодинамическими условиями задачи является следствием применения в тектонике плит теоремы Эйлера и вытекающей из нее концепции «сила».

Сказанное выше, на взгляд автора, можно охарактеризовать однозначным образом: тектоника плит находится в «тяжелом» и даже «тяжелейшем» кризисе. Действительно, отсутствует достаточно строгое обоснование некоторых основных положений тектоники плит, применимости теоремы Эйлера и вытекающей из нее возможности использования при моделировании геодинамического процесса концепции «сила». Тектоника плит оказывается не в состоянии дать объяснение наиболее важным свойствам геологической среды, выявленным самими же геологами – реидности, энергонасыщенности и способности двигаться вихревым способом. Фундаментальное свойство геосреды – ее нелинейность – геологами используется, как правило, по усмотрению и в трактовке авторов, без достаточного на то физического обоснования. Волновая геодинамика никак не объясняет необходимость использования при моделировании геодинамических движений нелинейных математических уравнений и не имеет возможностей для изучения нелинейных свойств как геологической среды, так и геодинамического процесса.

Ротационная модель геодинамического процесса. Концепция «движение». Красивый физический результат как оригинальный анализ представлений механики – движения, деформации, напряжения и силы – был получен С.Э. Хайкиным [4], показавшим, что непосредственной причиной деформаций является движение, а не силы. К геодинамике этот вывод был применен Ю.О. Кузьминым: непосредственной причиной деформаций земной коры является движение геосреды, а не силы, на нее действующие [5]. Очевидно, что к такому тектонофизическому выводу в приложении к геодинамике следует добавить: движение геосреды, ее вполне определенного объема.

Таким образом, замена основополагающей в геодинамике концепции «сила» на концепцию «движение», по сути, приводит к «разломноблоковой» дилемме Ю.О. Кузьмина и/или известным представлениям А.М. Садовского о блоковом строении геосреды. Тектонофизические свойства такой среды в полном соответствии с физическими представлениями и данными инструментальной геодезии определяются волновым взаимодействием блоков между собой [6-8] или физикой такого взаимодействия [7].

Концепция «момент импульса». Первым основополагающим положением механики вращающегося твердого тела является независимость угловой скорости от жестко связанной с телом системы координат; все такие системы вращаются вокруг параллельных друг другу осей с одинаковой угловой скоростью. Это позволяет для геосреды применить концепцию «момент импульса», которым обладает любой ее блок. Вследствие поступательного движения верхней мантии вдоль поверхности Земли происходит изменение направления момента, что в соответствии с законом его сохранения приводит к появлению момента силы, прикладываемого к поверхности блока со стороны окружающей его среды. Как видим, движение блоковой вращающейся среды геосреды – вдоль поверхности Земли приводит в полном соответствии с ротационным фактором и законами физики к «закачке» в нее упругих напряжений с моментом силы [2]. В рамках ротационных моментно-блоковых представлений, очевидно, отсутствует необходимость поиска и источников сил, и объектов их приложения - они оказываются взаимосвязанными законом сохранения момента импульса и реализованы в виде сформировавшегося в течение продолжительного геологического времени движения геосреды.

Как видим, концепция «движение» оказалась достаточно плодотворной. В рамках блочных представлений оказалось возможным сформулировать концепцию «момент импульса», в условиях вращающейся Земли, оказавшуюся физически более обоснованной, чем концепция «сила». Именно неучет ротационного фактора и основных представлений физики твердого (вращающегося) тела и приводит в рамках концепции тектоники плит к описанным выше построениям, которые лишены и механических, и математических, и геодинамических обоснований.

С использованием концепции «момент импульса» была разработана ротационная модель геодинамического процесса, основные положения и следствия которой опубликованы в работах [6, 7, 9].

Проведенный сравнительный анализ двух разных концепций, использующихся для описания геодинамических движений - тектоники плит и ротационной модели, показывает очевидное превосходство второго подхода над первым. Это проявляется и в физико-математической строгости изложения, и в геодинамической обоснованности заложенных в их основания исходных положений, и в качестве (важности) получаемых в их рамках результатов, а также подтверждается многочисленными данными физики прочности, физической мезомеханики, физической (нелинейной) акустики, материаловедения, механики сплошной среды и других физических и физико-технических специальностей (список публ. см. в [7, 9]).

### ЛИТЕРАТУРА

- Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Науч-1. ный мир, 2004. 612 с.
- 2. Артюшков Е.В. Геодинамика. М.: Наука, 1979. 328 с.
- Николаевский В.Н. Собрание трудов. Геомеханика. Т. 2. Земная кора. Нелинейная сейсмика. Вихри и ураганы. 3. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2010. 560 с. 4.
- Хайкин С.Э. Силы инерции и невесомость. М.: Наука, 1967. 312 с.
- Кузьмин Ю.О. Тектонофизика и современная геодинамика // Физика Земли. 2009. № 1. С. 44-59. 5.
- 6. Викулин А.В., Иванчин А.Г. О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 3. С. 67-84.
- 7. Викулин А.В., Махмудов Х.Ф., Иванчин А.Г., Герус А.И., Долгая А.А. О волновых и реидных свойствах земной коры // Физика твердого тела. 2016. Т. 58. Вып. 3. С. 547-557.
- 8. Кузьмин Ю.О. Деформационные автоволны в разломных зонах // Физика Земли. 2012. № 1. С. 3–19.
- 9. Vikulin A.V. Geodynamics as wave dynamics of the medium composed of rotating blocks // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6, № 3. P. 345–364.

### EARTH ROTATION AND PLATE TECTONICS

A.V. Vikulin

Institute of Volcanology and Seismology, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

*Abstract.* Plate tectonics never became a «global theory of the Earth» and thus fell short of expectations of geologists and scientists dealing with geodynamics. However, new alternative approaches have been developed to solving geodynamic problems. One of them is the rotational model of geodynamic process proposed herein. A comparative analysis is made between plate tectonics and the rotational model. It is shown that the rotational approach is more correct in terms of physics and geodynamics. *Keywords:* plate tectonics, Earth rotation, geodynamics, block geomedium

\*\*\*

УДК 550.34+551.24

### ВЫСОКОСЕЙСМИЧНЫЕ ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ЗОНЫ АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ СТРАН

Ю.Г. Гатинский<sup>1</sup>, Т.В. Прохорова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

Аннотация. Выделены высокосейсмичные зоны на основе распространения эпицентров наиболее сильных событий и максимальных объемов высвобождающейся сейсмической энергии. Они установлены на северо-востоке Алтая вместе с прилегающей частью Западного Саяна, на западе Восточного Саяна, в Прибайкалье и Северо-Западном Забайкалье, в Восточном Забайкалье в междуречье Витима и верхнего течения Алдана. К ним приурочено большинство катастрофических землетрясений на этой территории. Дана оценка влияния различных факторов глубинной и приповерхностной структуры литосферы и коры на геодинамическую активность этих зон с установлением уровней высвобождения сейсмической энергии. Для каждой из них построены зоны возникновения очагов землетрясений и выполнен подсчет энергии в них. Показана приуроченность зон ВОЗ к межблоковым зонам, разделяющим блоки земной коры, ограниченные активными разломами, и Северо-Евразийскую литосферную плиту. В результате проведенного изучения сделан прогноз проявления повышенной сейсмичности на юге Сибири и на прилегающих территориях.

*Ключевые слова:* сейсмоактивная зона, катастрофическое землетрясение, сейсмическая энергия, глубинное строение, геофизическое поле

В пределах Южной Сибири и прилегающих территорий выделены четыре наиболее высокосейсмичных района, для которых построены зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ). Зона ВОЗ на Алтае (рис. 1) охватывает межблоковые зоны, отделяющие блок Алтай от Северо-Евразийской литосферной плиты (СЕП), блоков Западная Монголия и Саянского в пределах южной части Республики Алтай, запада Республики Тыва и соседней территории Северо-Западной Монголии. Длина ее 356 км, ширина 87-243 км, общая сейсмическая энергия составляет 1.70833·10<sup>16</sup> Дж. Максимальные магнитуды (М) землетрясений достигают 4.99-7.99. Наибольшая сейсмическая активность приходится на границу блока Алтай и СЕП, где объемы высвобождающейся сейсмической энергии достигают 10<sup>11</sup> Дж [1].

Новые землетрясения с *M* до 6.99–7.99 наиболее вероятны в западной части этой зоны в Горном Алтае, на левобережье левого истока р. Бия – р. Аргуг к ЮЗ от населенного пункта Беляши. Преобладающая глубина гипоцентров не превышает здесь 10–20 км, что позволяет ожидать разрушительные события. Для остальной территории зоны можно ожидать землетрясения с *M* до 4.99–5.99.

Зона ВОЗ в пределах межблоковых зон, отделяющих Саянский блок от СЕП и блока Хангай (рис. 1), расположена в Восточном Саяне на территории востока Республики Тыва, ЮЗ Республики Бурятия и прилегающей части Северной Монголии. Длина ее с севера на юг 350 км, ширина 100–216 км, общая сейсмическая энергия  $1.80511 \cdot 10^{15}$  Дж. Наиболее интенсивное высвобождение энергии до  $10^{13}$ – $10^{14}$  Дж установлено на двух участках зоны ВОЗ: на левобережье р. Ка-Хем в верховьях и южнее на границе РФ и Монголии. Большинство эпицентров отвечает событиям с M=2.99–5.99, отдельные на юге зоны на территории Северной Монголии до 6.99–8.99. В северной части зоны преобладают субширотные надвиги к северу, инструментально измеренные горизонтальные сокращения коры в которых составляют 2–4 мм/год [2].

Землетрясения с M до 6.99–8.99 можно прогнозировать для двух участков зоны ВОЗ: северном в Республике Тыва на левобережье р. Ка-Хем в верхнем течении между оз. Тере-Холь на западе и границей РФ с Монголией на востоке и южном по обеим сторонам государственной границы. Для остальной части зоны наиболее вероятны события с M до 4.99–5.99. Небольшие сгущения гипоцентров отмечаются, по СМТ, на глубинах 9–11 км.

Зона ВОЗ в межблоковой зоне между СЕП и Амурским блоком выделена в районе Байкальской рифтовой системы и ее северо-восточного продолжения (рис. 2). Длина зоны 950 км, ширина 113–230 км, общая сейсмическая энергия 1.79362·10<sup>15</sup> Дж. Уровень энергии колеблется в пределах 10<sup>4</sup>–10<sup>12</sup> Дж, *М* в эпицентрах изменяется от 2.99 до 6.99. По решениям механизмов землетрясений в Байкальской системе преобладают растяжения, которые, по данным СМТ, не выходят за пределы коры (10–33 км). Максимальное высвобождение энергии до  $1.4 \cdot 10^{15}$ Дж происходит над сбросами, ограничивающими впадину оз. Байкал на ЮЗ, где у пос. Култук в 2008 г. произошло землетрясение с M=6.3.

Проявление процессов растяжения на востоке Центральной Азии в Байкальской системе, вокруг блока Ордос и на границах ряда других блоков имеет различные объяснения: медленное выжимание ряда блоков, включая Амурский, к востоку под влиянием процессов Индо-Азиатской коллизии [2] либо под действием мантийного потока, генерированного при глубоком погружении под Евразию тихоокеанского субдукционного слэба [3], поднятие мантийных плюмов под Северной Монголией и Байкалом [4, 5]. В верхней мантии этой части Центральной Азии отмечена повышенная анизотропия с совпадением север-северо-восточного направления высокоскоростных расщепленных Рп-волн с направлением векторов GPS, что указывает на полную сопряженность деформаций в пределах коры и литосферной мантии [6, 7].

Максимально сильные события с *M* до 6.99– 7.99 можно ожидать в пределах северо-восточной трети территории зоны ВОЗ в Становом нагорье по обоим берегам р. Верхняя Ангара и южнее к востоку от оз. Байкал в северной части Баргузинского хребта, а для остальной площади зоны – с M до 5.99– 6.99. С учетом относительно неглубокого залегания гипоцентров предшествующих событий, основные сгущения которых отмечены на глубинах 10–16 км, наиболее вероятны разрушительные землетрясения, типа того, что было у пос. Култук в 2008 г.

Зона ВОЗ в Северо-Восточном Забайкалье выделена на территории Забайкальского края, Южной Якутии и северо-запада Амурской области в междуречье Витима и верховьев Алдана, где она совпадает с межблоковой зоной, разделяющей Амурский блок и СЕП (рис. 2). Длина ее 464 км, ширина 64-108 км, общая сейсмическая энергия 4.64153·10<sup>16</sup> Дж. Уровень энергии колеблется в пределах 10<sup>4</sup>-10<sup>12</sup> Дж, М в эпицентрах изменяется от 2.99 до 6.99. На северной границе Амурского блока, по данным сейсмотомографии, наблюдается сокращенная мощность литосферы – до 100-105 км по сравнению с 200 км под СЕП [8]. Изометричные контуры проекций на земную поверхность областей замедления S-волн до 4.20-4.25 км/с на глубинах от 100 до 300 км [9], наряду с повышением теплового потока до 64-100 мВт/м<sup>2</sup>, могут отвечать подъему в этой части Забайкалья разогретого и разуплотненного мантийного материала к поверхности с возрастанием уровня сейсмичности, что подтверждается проявлениями позднекайнозойского базальтового вулканизма [4, 5].



Рис. 1. Зоны ВОЗ на Алтае и в Восточном Саяне. Изолиниями и различными оттенками серого цвета показаны объемы высвобождающейся сейсмической энергии, рассчитанные авторами по данным NEIC2015. Подписаны отдельные значения энергии в джоулях. Границы: черные толстые – зон ВОЗ, черная пунктирная – СЕП предполагаемая, черные тонкие – блоков, светло-серые – межблоковых зон. Эпицентры землетрясений с *M*=8.00–8.99 – наиболее крупные кружки с серой заливкой, 7.00–7.99 – кружки с черной заливкой, 5.00–6.99 – менее крупные кружки с серой заливкой, 3.00– 4.99 – самые мелкие кружки с светло-серой заливкой. Показаны решения механизмов отдельных землетрясений по данным СМТ. Гипоцентры всех событий здесь и на рис. 2 не глубже 80 км. Черные точки с цифрами – места определения и значения теплового потока в мВт/м<sup>2</sup> (www.heatflow.und.edu/index2.html).



25 mm/y

Рис. 2. Зоны ВОЗ в Прибайкалье, Северо-Западном и Восточном Забайкалье. Граница чередующаяся черно-белая – СЕП установленная. Остальные условные обозначения см. на рис. 1.

Можно ожидать землетрясения с M до 6.99– 7.99 в восточной части зоны ВОЗ по обоим берегам р. Олекмы в районе железнодорожных станций на БАМе Хани и Юктали и восточнее вплоть до левого берега р. Алдан в верховьях. На остальной территории зоны их M, скорее всего, не превысит 5.99. Слабые сгущения гипоцентров, по данным СМТ, приурочены к глубинам 10–11 и 21–26 км. Таким образом, на юге Сибири наиболее высокосейсмичными являются межблоковые зоны, разделяющие блок Алтай и СЕП, Хангай и Саянский блоки, Амурский блок и СЕП в республиках Алтай, Тыва, Бурятия, Иркутской обл. и Монголии, Забайкальском крае, Южной Якутии и на СЗ Амурской обл. Объемы сейсмической энергии достигают в них  $10^7-10^{12}$  Дж, часты землетрясения с *M*=3.99–5.99, отдельные до 6.99–8.99.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Gatinsky Yu.G., Prokhorova T.V. Seismic active zones in South Siberia, Russian Far East, and adjacent countries // Russ. J. Earth. Sci. 2015. V. 15, ES3003. doi:10.2205/2015ES000554.

2. Sankov V.A., Lukhnev A.I., Melnikova V.I. et al. Present-day tectonic deformations of the southern mounting frame of the Siberian platform from GPS geodesy data // Proceedings International Seminar on the use of Space Techniques for Asia-Pacific Regional Crustal Movements Studies. Irkutsk, August 2002. Moscow: GEOS, 2003. P. 118–126.

3. Parfeevets A.V., Sankov V.A. Late Cenozoic tectonic stress fields of the Mongolian microplate // Comptes Rendus Geoscience. 2012. V. 344, № 3–4. P. 227–238. doi:10.1016/j.crte.2011.09.009.

4. Грачев А.Ф. Современный вулканизм, мантийные плюмы и их связь с интенсивностью напряжений в литосфере // Неотектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. М.: Пробел, 2000. С. 245–266.

5. Gatinsky Yu., Prokhorova T., Rundquist D., Vladova G. Zones of catastrophic earthquakes of Central Asia: Geodynamics and Seismic Energy // Russ. J. Earth Sci. 2009. V. 11, ES1001. doi:10.2205/2009ES000326.

6. Pei S., Zhao J., Sun Yo et al. Upper mantle seismic velocities and anisotropy in China determined through Pn and Sn tomography // J. Geophys. Res. 2007. V. 112, № B05312. doi: 10.1029/2006JB004409.

7. San'kov V.A., Lukhnev A.V., Parfeevets A.V. et al. Coupling of the crustal and upper mantle deformations in the Mongolia–Siberian mobile area // Doklady Earth Sciences. 2011. V. 436, № 1. P. 159–164. doi:10.1134/S1028334X11010302.

8. Ашурков С.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. и др. Кинематика Амурской плиты по данным GPS геодезии // Геология и геофизика. 2011. Т. 2. С. 299–311.

9. Кожевников В.М., Яновская Т.В. Распределение скоростей волн S в литосфере Азиатского континента по данным поверхностных волн Рэлея // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 46–64.

### HIGH-SEISMICITY INTRACONTINENTAL ZONES WITHIN THE ASIAN PART OF RUSSIA AND ADJACENT COUNTRIES

Yu.G. Gatinsky<sup>1</sup>, N.V. Prokhorova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Vernadsky State Geological Museum, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Abstract.* The most active seismic areas have been identified based on strong-earthquake epicenter distribution and maximal seismic energy release. They are located in the northeastern Altai and adjacent part of the West Sayan Mountains, in the west stretch of the mountains of Eastern Sayan, in Pribaikalye and northwestern Transbaikalia, and in eastern Transbaikalia between the Vitim River and upper stream of the Aldan River. They experienced most of the disastrous earthquakes occurred therein. An estimate has been made of the influence of various factors of deep and near-surface lithospheric and crustal structures on geodynamic activity in these areas with determination of the levels of seismic energy released. Source zones have been identified for each of these areas with seismic energy calculated. Shown here is the confinedness of source zones to interblock zones, which separate the crustal blocks, bordered by active faults, and the North Eurasian Plate. The performed study has provided the possibility to predict effects of high seismic activity in South Siberia and adjacent areas.

Keywords: seismically active zone, disastrous earthquake, seismic energy, deep structure, geophysical field

\*\*\*

УДК 551.24

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В РАМКАХ РОТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ БЛОКОВОЙ ГЕОСРЕДЫ

А.А. Долгая<sup>1,2</sup>, А.И. Герус<sup>1,3</sup>, А.В. Викулин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>2</sup> Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>3</sup> Камчатский государственный университет им. В. Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация. Рассмотрены результаты исследования пространственно-временных и энергетических закономерностей геодинамического процесса, протекающего в пределах тектонически активных поясов планеты. С помощью разработанных авторами методов доказано, что миграция является характерным свойством сейсмической и вулканической активности планеты. На основании полученных данных построена принципиально новая модель волнового геодинамического процесса, в которой заложены выявленные авторами закономерности миграции сейсмической и вулканической активности и представления о векторной сохраняющейся геодинамической величине, физическим аналогом которой может являться момент импульса. В рамках этой модели движение цепочки блоков математически представлено уравнением синус-Гордона. Показано, что такое уравнение, дополненное эффектами отклонения моментов сил блоков от равновесных положений и трения на границах, позволяет количественно описать такие важные свойства сейсмического процесса, как его форшоковая и афтершоковая стадии и заключенное между ними сильнейшее землетрясение. При этом результаты численного моделирования сейсмического процесса согласуются с экспериментальными данными. *Ключевые слова:* геодинамический процесс, ротационная модель, блоковая геосреда, солитон

Геодинамический процесс в пределах тектонически активных зон планеты проявляется в виде сейсмических и вулканических событий, распределенных вдоль длинных и узких поясов. Это позволяет моделировать развитие сейсмического и/или вулканического процесса как одномерную последовательность событий, происходящих вдоль осевой линии пояса в течение рассматриваемого периода времени. В теории случайных процессов такая модель соответствует одномерному случайному блужданию, порождаемому суммами взаимно независимых одинаково распределенных величин, или цепей Маркова. Для исследования пространственновременных закономерностей проявления сейсмической и вулканической активности необходимо было установить и проанализировать марковские цепи событий, формирующие в сумме геодинамическую активность. Для этого в рамках предложенного подхода был разработан и программно реализован вычислительный метод исследования миграции сейсмической и вулканической активности [1].

Результаты проведенного нами исследования показали, что скорости миграции V сейсмической и

вулканической активности зависят от энергетических характеристик геодинамического процесса: *М* – магнитуды для землетрясений и *W* – индекса вулканической активности для извержений [2].

Было показано, что параметр р, характеризующий наклон зависимостей  $\lg V(M)$  и  $\lg V(W)$ , «чувствителен» к тектоническим обстановкам в поясах: положителен для областей сжатия – окраины Тихого океана и Альпийско-Гималайского пояса и отрицателен для областей растяжения – Срединно-Атлантического хребта и всех вулканических поясов.

Анализ значений коэффициентов «наклона» р показал, что сумма значений наклонов всех сейсмических и вулканических зависимостей с учетом точности их определения близка нулю при примерно равных по модулю средних «положительных» и «отрицательных» их значениях [3]. Возможность такого разбиения коэффициентов *p*, «чувствительных» к направлению течения процесса (сжатию или растяжению), позволяет интерпретировать их в совокупности как векторную сохраняющуюся геодинамическую величину. Для вращающейся геосреды была предложена ротационная модель сейсмотектонического процесса на примере окраины Тихого океана [4, 5], движение блоков в которой определяется уравнением синус-Гордона (СГ):

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta \tag{1}$$

Уравнение СГ имеет несколько решений, в том числе в виде бегущей волны ( $\theta(\xi - v\eta)$ ):

$$\begin{aligned} \theta &= 4 \operatorname{arctg} \left[ \exp\left(\pm k_0 \gamma (z - z_0 - \nu t)\right) \right], \\ \gamma &= \left(1 - \nu^2 / c_0^2\right)^{-\frac{1}{2}}, \\ c_0^2 &= \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \Omega R_0 \end{aligned}$$
(2)

где v – скорость распространения уединенной волны деформации (поворота),  $\Omega$  – угловая скорость вращения Земли,  $\rho$ , G – плотность и модуль сдвига геосреды,  $R_0$  – размер блока,  $c_0$  – предельная скорость геодинамического процесса. Решение уравнения СГ (2) называется односолитонным.

Известно, что солитоны подобны частицам: при взаимодействии друг с другом (или с некоторыми другими возмущениями) они не разрушаются, а продолжают движение, сохраняя свою структуру неизменной. В рамках ротационной модели геосреды такое «солитонное» свойство геодинамических возмущений позволяет миграцию сейсмической и вулканической активности описывать в виде волнового процесса со свойствами дальнодействия [6].

Как было сказано выше, геодинамический параметр р может быть интерпретирован как векторная сохраняющаяся величина. Физическим аналогом такой величины в рамках концепции блоковой геосреды [4, 6] и волновой модели геодинамического процесса может быть момент импульса. Параметр р в рамках волнового подхода можно интерпретировать как геодинамический аналог момента импульса, связанного с поворотными движениями блоков земной коры в пределах и вблизи геодинамически активных зон планеты.

В солитонном решении уравнения (1) можно очевидным образом выделить импульс  $\vec{p}$ :

$$|\vec{p}| = \frac{|\vec{v}|}{\sqrt{1 - v^2/c_0^2}} = v\gamma,$$
(3)

причем вектор  $\vec{p}$  будет иметь направление, соответствующее направлению геодинамического процесса (сжатию или растяжению). В результате закономерности миграции сейсмической активности вдоль областей сжатия и растяжения можно определить как солитонные решения, соответствующие скоростям миграции, увеличивающимся или уменьшающимся с ростом энергии (магнитуды).

В модели движения среды, описываемой уравнением СГ (1), блоки являются равновеликими и равномерно поворачиваются друг относительно друга. Скорость распространения волны вдоль такой цепочки постоянна во времени. Для более точного описания реального сейсмического процесса уравнение (1) должно быть дополнено другими слагаемыми.

Опираясь на теорию возмущений, разработанную Д. Маклафлином и Э. Скоттом [7], мы дополнили уравнение СГ эффектами отклонения моментов сил блоков от равновесных положений µ и трения на границах α для более точного описания реального сейсмического процесса:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta + \alpha \frac{\partial \theta}{\partial \eta} + \mu \delta(\xi) \sin \theta \cdot$$
<sup>(4)</sup>

Такое уравнение не имеет аналитических решений, но можно численно исследовать динамику изменения параметров (координаты X, скорости волны

U и скорости поворотной деформации  $\theta$ ) его односолитонного решения.

Скорость волны и скорость поворотной деформации в присутствии структурного возмущения меняются со временем, причем первая всегда имеет один локальный максимум  $U_{\text{max}}$ , а вторая – два максимума и один минимум между ними. После колебаний оба параметра выходят на асимптотику.

Проведенные нами расчеты позволили сформулировать следующие выводы:

1. При увеличении коэффициента трения  $\alpha$  уменьшаются значения  $U_{\text{max}}$ ,  $\dot{\theta}_{\text{max}1}$ ,  $\dot{\theta}_{\text{max}2}$ ,  $\dot{\theta}_{\text{min}}$ , а их времена увеличиваются. Таким образом, процесс распространения солитона замедляется и сглаживается.

2. При увеличении значения коэффициента неоднородности µ, наоборот, увеличиваются значения  $U_{\text{max}}$ ,  $\dot{\theta}_{\text{max}1}$ ,  $\dot{\theta}_{\text{max}2}$ ,  $\dot{\theta}_{\text{min}}$ , а их времена уменьшаются. Таким образом, моделируемый процесс идет быстрее и резче.

 При одновременном увеличении или уменьшении значений α и µ меняется и временной масштаб процесса.

4. Асимптотическое значение X, т.е.  $X_{\max}$ , при любых  $\alpha$  и  $\mu$  всегда соответствует равенству  $X_{\max} \approx R_0$ , где  $R_0$ – радиус блока.

5. Для любых  $\alpha$  и  $\mu$  волна достигает значений  $U_{\max}$ ,  $\dot{\theta}_{\min}$  и выхода X на асимптотику одновременно.

Кроме того, существуют еще и другие инвариантные величины, не зависящие от  $\alpha$  и  $\mu$ , но характерные для процесса в целом: 1) отношение максимумов скорости деформации:  $\dot{\theta}_{\max 2}/\dot{\theta}_{\max 1} \approx 2$ ; 2) отношение продолжительностей максимумов скорости деформации:  $\Delta T_{\max 2}/\Delta T_{\max 1} \approx 6$ .

Эти величины очень близки к реальным параметрам сейсмического процесса [4], что позволяет нам интерпретировать график скорости деформации

 θ следующим образом: первому и второму максимуму соответствуют форшоковая и афтершоковая стадии сейсмического процесса, а минимуму – сильнейшее землетрясение.

Кроме того, в рамках ротационной модели предельная скорость миграции глобальной сейсмической активности V<sub>1,max</sub> составляет 1–10 см/с, а энергетический характер миграционной зависимости соответствует солитонному типу возбуждения [6]. В нашей численной модели (4) солитонное решение также демонстрирует такие значения  $U_{\text{max}}=1-10$  см/с (которые мы можем расценивать как его предельную скорость  $c_0$  в (2)) на некоторых диапазонах значений параметров  $\alpha$  и  $\mu$ , в частности при соответствующих реальным разломам [8]  $\alpha=0.6$  и  $\mu=0.0005-$ 0.0050. Таким образом, в рамках ротационной концепции блоковой геосреды предложена новая, волновая, модель геодинамического процесса, протекающего в пределах тектонически активных поясов планеты, которая позволяет, в том числе, количественно описать такие важные свойства сейсмического процесса, как его форшоковая и афтершоковая стадии и заключенное между ними сильнейшее землетрясение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Викулин А.В., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р. и др. Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений // Вычислительные технологии. 2012. Т. 17, № 3. С 34–54.

2. Долгая А.А., Викулин А.В., Герус А.И. Моделирование пространственных, временных и энергетических закономерностей геодинамической (сейсмической и вулканической) активности // Материалы конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска». В 2-х томах. Владивосток: Дальнаука. 2015. Т. 2. С. 65–69.

3. Vikulin A.V., Akmanova D.R., Vikulina S.A. et al. Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process // Geodynamics & Tectonophysics. 2012. V. 3, № 1. P. 1–18.

4. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2003. 151 с.

5. Викулин А.В., Быков В.Г., Лунева М.Н. Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса // Вычислительные технологии. 2000. Т. 5, № 1. С. 31–39.

6. Викулин А.В., Махмудов Х.Ф., Иванчин А.Г. и др. О волновых и реидных свойствах земной коры // Физика твердого тела. 2016. Т. 58, № 3. С. 547–557.

7. McLaughlin D.W., Scott A.C. Perturbation analysis of fluxon dynamics // Phys. Rev. A. 1978. V. 18. P. 1652–1680.

8. Nur A., Ron H., Scotti O. Fault mechanics and the kinematics of block rotation // Geology. 1986. V. 14. P. 746-749.

### MODELING OF WAVE GEODYNAMIC PROCESS WITHIN THE CONCEPT OF ROTATING BLOCK GEOMEDIUM

A.A. Dolgaya<sup>1, 2</sup>, A.I. Gerus<sup>1, 3</sup>, A.V. Vikulin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Volcanology and Seismology, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

<sup>2</sup> Kamchatka State Technical University, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

<sup>3</sup> Vitus Bering Kamchatka State University, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

*Abstract.* Consideration is being given to the results of the study of spatiotemporal and energetic trends in geodynamic process running in tectonically active zones of the planet. Our proposed methods have shown that migration is a characteristic feature of the planet's seismic and volcanic activity. The obtained data served as a basis for the development of a principally new model of wave geodynamic process, which relies on seismic and volcanic activity migration patterns identified by the authors and their evaluation of the current geodynamic movements in terms of conserved (vector) quantities with angular momentum as a physical analogue. Block movements in this model are mathematically represented by the sine-Gordon equation. It is shown that this equation, modified with the effects of force and moment deviation from equilibrium positions and boundary friction, provides a quantitative description of such important characteristics of seismic process as its foreshock and aftershock stages and the strongest earthquakes in between. The results of numerical modeling of seismic process are therewith consistent with the experimental data.

Keywords: geodynamic process, rotational model, block geomedium, soliton

\*\*\*

УДК 550.348.2+551.2.03

### СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА ЛИТОСФЕРЫ МОНГОЛИИ ПО ДАННЫМ О СЕЙСМИЧЕСКИХ МОМЕНТАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

С. Дэмбэрэл<sup>1</sup>, А.В. Ключевский<sup>2</sup>, Г. Баяраа<sup>1</sup>, В.М. Демьянович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт астрономии и геофизики АНМ, Улан-Батор, Монголия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Современная геодинамика литосферы Монголии исследована по данным о сейсмических моментах землетрясений с энергетическим классом  $K_{P} \ge 8$ , зарегистрированных с 1970 по 2000 г. Данные о сильных землетрясениях с  $K_{P} \ge 10$  указывают, что в Южной и Центральной Монголии преобладают сдвиги в условиях соотношения напряжений  $S_{H} > S_{V} > S_{h}$ . На западе Монголии повышена доля взбросов, что отражает усиление горизонтальных напряжений сжатия  $(S_{H} > S_{h} > S_{V})$ . Неоднородность напряженного состояния среды возрастает на севере Монголии, а реализации сбросов указывают на преобладание вертикальной составляющей напряжений ( $S_V > S_H > S_h$ ) в некоторых частях этой территории. По данным о сейсмических моментах слабых землетрясений с  $K_P$ =8 в литосфере Монголии доминируют сбросо-сдвиги в условиях соотношения напряжений  $S_V \approx S_H \approx S_h$ . На западе Монголии доля слабых сдвигов повышена, что указывает на усиление горизонтального сжатия литосферы ( $S_H > S_V > S_h$ ). В литосфере Монголии установлены три колебательных цикла изменения напряжений, корреспондирующие с тремя перестройками напряженного состояния Байкальской рифтовой системы в конце 1960-х годов, в конце 1970-х – начале 1980-х годов и в конце 1980-х – начале 1990-х годов, а эпизоды синхронизации динамики напряжений в литосфере Монголии отражают эти перестройки. Полученные результаты позволяют полагать, что современная геодинамика литосферы Монголии формируется в условиях наложения переменного поля региональных напряжений, связанного с импульсными активизациями БРС, на квазистационарное поле глобальных напряжений Земли.

Ключевые слова: литосфера, Монголия, современная геодинамика, землетрясение, сейсмический момент

Геодинамика – отрасль геологии и физики твердой Земли, изучающая силы и процессы во внутренних сферах, обусловливающие глубинные и поверхностные движения масс во времени и пространстве. Линейная геодинамика лежит в основе тектоники литосферных плит и других квазистационарных процессов, нелинейная геодинамика изучает явления и процессы, связанные с нерегулярными, хаотическими и другими импульсами в земных глубинах [1]. В настоящей работе мы определили сейсмические моменты землетрясений Монголии с  $K_{\rm P} \ge 8$ , реконструировали по ним напряженное состояние литосферы и интерпретировали пространственно-временные изменения состояния в рамках исследования современной геодинамики литосферы Монголии.

По данным о сейсмических моментах землетрясений с *K*<sub>P</sub>≥8, зарегистрированных с 1970 по 2000 г., проанализировано напряженное состояние литосферы Монголии, входящих в нее четырех областей и пяти районов. Сейсмические моменты землетрясений вычислены для модели очага Д. Бруна [2] по формулам из работы [3]. Для характеристики напряженного состояния используется коэффициент  $b_{\rm M}$  в уравнении корреляции  $\lg M_0(K_{\rm P})$  и средние по выборке сейсмические моменты землетрясений  $M_0$ каждого К<sub>Р</sub>. Временная дискретизация материалов составляет один год, а пространственное разделение Монголии на четыре области (центральная, северная, южная и западная) и пять районов (Болнайский, Гоби-Алтайский, Монголо-Алтайский, Орхон-Тольский и Хубсугульский) выполнено на основе изолиний плотности эпицентров землетрясений [4].

Основные результаты. Суперпозиция квазистационарного и колебательного поведения b<sub>Mi</sub> (j – индекс года) находит отражение в совпадении среднего за весь интервал времени значения b<sub>av</sub>≈0.52 и тренда кривой  $b_{\text{Mi}} \approx 0.69 - 0.0002t$ . Общий тренд не зависит от времени, что указывает на устойчивость напряженного состояния литосферы Монголии, на которое накладываются возмущения. График коэффициента b<sub>Mi</sub> отражает колебания напряженного состояния литосферы Монголии около положения равновесия *b*<sub>av</sub>≈0.52 в диапазоне 0.48≤*b*<sub>Mi</sub>≤0.59. Если рассматривать колебания относительно линии равновесия, то выделяются три колебательных цикла: первый цикл начинается в 1960-х гг. и заканчивается в 1979 г., второй цикл длится 10 лет (1979-1989 гг.), а третий цикл продолжается с 1989 по 1997 г. Анализ М<sub>0i</sub> показывает, что среди землетрясений Монголии с энергетическим классом K<sub>P</sub>=8 сбрососдвиги преобладали почти все время, за исключением 1970-1972 гг., когда доминировали сдвиги, и 1992 г., когда среднегодовые значения опустились в зону сбросов. Фазовые портреты указывают на устойчивость напряженного состояния литосферы Монголии, формирующего аттракторы  $b_{\rm Mj}$  and  $M_{0j}$ , и колебания в бассейнах этих аттракторов. Напряженное состояние литосферы находится в бассейне одного аттрактора  $b_{\rm Mj}$  (устойчивый фокус), и переходы из одного состояния в другое отсутствуют. По данным  $M_{0j}$ , аттрактор напряженного состояния за период наблюдений располагается преимущественно в бассейне сбросо-сдвигов.

Анализ вариаций коэффициента b<sub>Mi</sub> во времени показал, что на всех территориях выделяются три цикла Монголии. Коэффициент парной корреляции графиков Монголии и северной области р=0.85, а Монголии и центральной области – р=0.81. Вариации  $b_{\rm Mi}$  на графиках южной и западной областей в меньшей мере коррелируются с тремя циклами Монголии (р=0.58 и р=0.54 соответственно). Анализ изменений во времени  $M_{0j}$  четырех областей Монголии показал, что графики M<sub>0j</sub> центральной, северной и южной областей соответствуют графику Монголии на уровне одного стандартного отклонения и расположены преимущественно в зоне генерации слабых сбросо-сдвигов. В западной области общие тенденции изменения  $M_{0i}$  в целом сохраняются, но график расположен выше графиков трех остальных областей (ближе к зоне генерации сдвигов). Графики b<sub>Mi</sub> трех северных районов (Болнайский, Хубсугульский и Орхон-Тольский районы) хорошо соответствуют трем циклам Монголии. Графики Гоби-Алтайского и Монголо-Алтайского районов в меньшей мере соответствуют трем циклам Монголии, на них видны «пилообразные» колебания небольшой амплитуды, которые можно интерпретировать как «тектонический шум». Графики M<sub>0i</sub> трех северных районов соответствуют графику Монголии на уровне одного стандартного отклонения и расположены преимущественно в бассейне генерации слабых сбросо-сдвигов. График Гоби-Алтайского района по форме близко соответствует графику Монголии, однако он смещен в зону сдвигов. График Монголо-Алтайского района расположен еще ближе к зоне сдвигов и отличается значительной изменчивостью.

Данные фокальных механизмов и сейсмические моменты землетрясений с  $K_p \ge 10$  указывают на ключевую роль сдвигового механизма сейсмотектонического деформирования литосферы Монголии. Сдвиги преобладают в Южной и Центральной Монголии, на западе повышена доля взбросов, что указывает на усиление горизонтальных напряжений в этой части Монголии. В Северной Монголии реали-

зуются все типы подвижек, тогда как в южной и западной областях сбросы не установлены. Среди слабых землетрясений Монголии, областей и районов с  $K_{\rm P}$ =8 и  $K_{\rm P}$ =9, доминируют сбросо-сдвиги. В Западной Монголии и Монгольском Алтае доля сдвигов повышена, что подтверждает усиление горизонтального сжатия литосферы. Пространственное распределение типов подвижек показывает, что землетрясения Монголии формируются в условиях взаимодействия квазистационарного крупномасштабного и импульсных региональных литосферных процессов, связанных с активизациями в БРС. Устойчивость фокальных решений удаленных от БРС землетрясений Южной и Западной Монголии и меньшая изменчивость графиков  $b_{\rm Mi}$  отражают квазистационарное глобальное напряжение сжатия литосферы в рамках гипотезы постоянства регионального поля напряжений [5]. Сильная изменчивость графиков  $b_{\rm Mj}$  и смешение разных механизмов очагов землетрясений «буферной» Северной Монголии указывают на влияние переменного во времени рифтинга БРС в рамках гипотезы изменений локальных напряжений. В литосфере Монголии, четырех областей и пяти районов выделяются три колебательных цикла продолжительностью около 10 лет, которые мы связываем с тремя перестройками напряжений в БРС в конце 1960-х гг., в конце 1970-х – начале 1980-х гг. и в конце 1980-х – начале 1990-х гг. Эпизоды синхронизации динамики напряжений в литосфере Монголии отражают эти перестройки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Большой энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. Т. 1. М.: Сов. энцикл., 1991. 862 с.

2. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4997–5009.

3. Ключевский А.В., Демьянович В.М. Динамические параметры очагов сильных землетрясений Байкальской сейсмической зоны // Физика Земли. 2002. № 2. С. 55–66.

4. Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С.П., Демьянович В.М., Батсайхан Ц., Баяраа Г. Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009. 420 с.

5. Zoback M.L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map project // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 11703–11728.

### **RECENT GEODYNAMICS OF THE MONGOLIAN LITHOSPHERE** EVALUATED FROM EARTHQUAKE SEISMIC MOMENTS

S. Demberel<sup>1</sup>, A.V. Klyuchevskii<sup>2</sup>, G. Bayaraa<sup>1</sup>, V.M. Demyanovich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Astronomy and Geophysics, the Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia <sup>2</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. Recent geodynamics of the Mongolian lithosphere has been evaluated from seismic moments of 17375 earthquakes of energetic class  $K_P \ge 8$ , recorded in the period of 1970 – 2000. The data on strong earthquakes of energetic class  $K_P \ge 10$  have shown the predominance of strike-slip seismic events in the southern and central Mongolia, assuming that the stress ratio is  $S_H > S_V > S_h$ . The western Mongolia is dominated by reverse seismic events showing an increase in horizontal compressive stresses ( $S_H > S_h > S_V > S_h$ ). Northern Mongolia is characterized by a greater degree of inhomogeneity in lithospheric stress field, and the occurrence of normal fault events indicates that vertical stress component ( $S_V > S_H > S_h$ ) prevails somewhere in this region. The data on weak seismic events of  $K_P = 8$  show a predominance of normal-oblique events in the lithosphere of Mongolia, assuming that the stress ratio is  $S_V \approx S_H \approx S_h$ . Weak strike-slip events dominate in the western Mongolia showing an increase in horizontal compressive stresses in the lithosphere ( $S_H > S_V > S_h$ ). Three cycles of oscillating stress, identified in the lithosphere of Mongolia, correspond to the three reconstructions of the stressed state of the Baikal Rift System (BRS) during in the late 1960s, late 1970s–early 1980s and late 1980s–early 1990s, which are reflected by episodic synchronization of dynamic stresses in the imposition of varying regional stress field, correlated with impulsive activation of the BRS, on the quasi-stationary global stress field in the Earth's lithosphere.

Keywords: lithosphere, Mongolia, recent geodynamics, earthquakes, seismic moment

\*\*\*

УДК 551.21

### НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗВЕРЖЕНИЙ И ВУЛКАНИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ (ПРИ СОСТАВЛЕНИИ КАРТ ВУЛКАНООПАСНОСТИ)

В.А. Ермаков<sup>1</sup>, А.И. Абдурахманов<sup>2</sup>, А.В. Ермаков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт РАН, Москва, Россия

*Аннотация*. Рассмотрены основы классификации вулканических извержений и общие вопросы районирования вулканоопасности. Представлена схема разделения извержений по соотношению энергий и магнитуд. Обсуждается карта вулканоопасности вулкана Менделеева на о. Кунашир масштаба 1:25000.

*Ключевые слова:* вулканы Курильских островов, о. Кунашир, классификация извержений, карта районирования вулканоопасности, прогноз катастрофических событий Попытки увязать энергетические характеристики взрывных процессов с параметрами образующихся форм или объемом выброшенных продуктов в вулканологии делались неоднократно [1, 2]. Принятая нами классификация извержений по объему их продуктов и соответствующией магнитуде [по 3] приводится в таблице. Отдельный столбец таблицы соответствует делению извержений на классы [4]; именно этот параметр мы использовали в перечне признаков для описания всех курильских вулканов при мелкомасштабном вулканическом районировании [5].

Термин «пароксизмальное извержение» был предложен Б.И. Пийпом [7], который относил к пароксизмальным те извержения, которые идут всем сечением вулканического канала или кратера. Сюда попадают все крупнейшие извержения типа Мон-Пеле, Везувия, Безымянного, Ключевского, Тяти и Авачинского (с образованием соммы) и другие подобные, хотя заметим, что кратер в данном варианте во многих извержениях исчезает, а на его месте формируется сомма, значительно большей площади, чем первичный кратер. Чаще всего в новом кратере начинает расти новый конус или экструзивный купол. Объем материала, выброшенного из кратера влк. Ключевского составил около 0.6 км<sup>3</sup>, и по этому параметру извержение 1945 г. должно относиться не к пароксизмальному, а к сильному типу.

Единообразное деление землетрясений, извержений вулканов и других природных процессов по их энергии и магнитуде предложено Хедервари и позднее Джонстоном [8, 9]. В качестве основы ими использована установленная линейная зависимость между этими параметрами (рис. 1). Энергия рассчитывается в эргах, по горизонтальной шкале показана магнитуда события. Для получения этих оценок на вулканах необходимо проведение специальных работ, которые позволят подсчитать объемы выброшенного материала для оценки энергии взрывной волны, кинетической и термической. Для курильских вулканов пока таких данных немного.

График дополнен данными по энергии взрывов некоторых известных извержений и граничными линиями, которые позволяют разделить все события на три больших класса: I – все межпароксизмальные извержения, от очень слабых до сильных включительно, II –пароксизмальные и III – катастрофические извержения. Разграничительные характеристики между I и II –  $E=10^{23}$  эрг и M=7.5, между II и III –  $E=10^{26}$  эрг и M=9.5. Таким образом, к пароксизмальным мы относим все извержения (и другие события) с M между 9.5 и 7.5, а к катастрофическим – с M более 9.5. Из известных нам извержений пароксизмальные события довольно многочисленны, а катастрофические происходят реже. На графике к последним относятся два извержения: Тамбора и Кракатау.

Энергия пароксимальных извержений, например сильнейших взрывов вулканов Сент-Хеленс, Безымянный, Шивелуч, близка к значениям среднегодовой сейсмической энергии на Земле при магнитуде 8±0.5. Еще более грандиозны выбросы энергии при катастрофических извержениях. При извержении влк. Тамбора было выброшено не менее 75–80 км<sup>3</sup> пород и магматических продуктов, по другим оценкам – до 150 км<sup>3</sup>; на Кракатау в 1883 г. объем извергнутых вулканических материалов меньше – 18 км<sup>3</sup> пород.

При извержении Кракатау возникла волна цунами высотой 20 м, поглотившая почти 37000 жителей островов Ява и Суматра. При извержении влк. Тамбора в 1815 г. на о. Сумбава в Индонезии был создан новый рельеф. Погибло 12000 человек, еще 80 тысяч человек погибло от голода и других тяжелых последствий, вызванных извержением. По затратам энергии извержение влк. Тамбора заметно превышало крупнейшее Чилийское землетрясение 1960 г. (с М=9.5). Это извержение по энергии близко к ее годовому потреблению в США (на 1989-1990 гг.) или к годовому тепловому потоку Земли. Подобные и значительно более сильные извержения широко известны в геологической истории Земли, например извержение влк. Санторин в Средиземном море, с которым некоторые исследователи связывают гибель Атлантиды [10]. В целом, результаты геолого-съемочных работ указывают на то, что параметры палеокальдер могли быть в разы больше, чем наблюдаемые в плейстоцене.

		Деление извержений по объему выброшенн		
Мировая шкала УЕТ	Магнитуда, <i>М</i> [3]	Объем выброшенного	Класс, <i>К</i> [4]	Интенсивность
0	0	<u>материала, м</u> <10 <sup>3</sup>	<u>[</u> ]	Очень слабая
0	Ι	$10^{3}-10^{4}$	7	Очень слабая
1	II	$10^4 - 10^5$	8	Очень слабая
1	III	$10^{5} - 10^{6}$	9	Слабая
2	IV	$10^{6} - 10^{7}$	10	Умеренная
3	V	$10^{7} - 10^{8}$	11	Средняя
4	VI	$10^{8} - 10^{9}$	12	Сильная
5	VII	$10^9 - 10^{10}$	13	Очень сильная
6	VIII	$10^{10} - 10^{11}$	14	Пароксизмальная
7	IX	$>10^{11}$	15	Сверхпароксизмальная
8	Х	$>10^{12}$		Катастрофическая

Примечание. В левом столбце показана мировая шкала. Основываясь на классификации П.И. Токарева, авторы ввели еще один тип пароксизмальных ихвержений; в этом варианте за сверхпароксизмальным классом появляется катастрофический класс, которого нет у П.И. Токарева, но есть в мировой шкале (8 по версии VEI и X по [3]).



Рис. 1. Энергетическая характеристика природных и рукотворных (связанных с деятельностью человека) процессов по [9], с дополнениями [6]. Цифрами против кружков помечены извержения вулканов: 1 – Тамбора, 2 – Кракатау, 3 – Безымянного, 4 – Шивелуча, 5 – Геклы, 6 – Ключевского. I, II, III – соответственно области межпароксизмальных, пароксизмальных и катастрофических извержений.



Рис. 2. Карта вулканоопасности вулкана Менделеева на о. Кунашир.

Картирование вулканов, детальные исследования фаций вулканических пород, изучение палеогеографии, возраста и последовательностей (разрезов), вулканотектоники, современного рельефа и даже розы ветров – обязательный этап в реконструкции событий и прогнозировании будущих извержений, прежде всего катастрофических. В виде примера здесь представлена карта вулканоопасности для вулкана Менделеева на о. Кунашир, выполненная нами в масштабе 1:25000 (рис. 2). Более подробно материал изложен в монографии [5].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Влодавец В.И. Вулканы Земли. М.: Наука, 1973. 169 с.

2. Федотов С.А. Оценка выноса тепла и пирокластики извержениями и фумаролами // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 3–28.

3. Tsua H., Morimoto R. Types of volcanic eruptions in Jupan // Bull. Volcanol. 1963. V. 26. P. 209-222.

4. Токарев П.И. Характеристика и повторяемость вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 110–118.

5. Ермаков В.А., Абдурахманов А.И., Ермаков А.В., Семакин В.П., Штейнберг Г.С. Вулканическое районирование. Геологические основы и прогноз опасности (с картой-вкладкой). М., 2011. 200 с.

6. Ермаков В.А. Систематика мировых катастроф в единой системе координат // Вулканизм, биосфера и экологические проблемы: Тезисы докладов 3-го Междун. научн. конференции. Туапсе, 2003. С. 26–28.

7. Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944–45 г. и в прошлом // Тр. лаб. вулканологии АН СССР. 1956. Вып 11. 314 с.

8. Hedervari P. On the energy and magnitude of volcanic eruption // Bull. Volcanol. 1963. XXV. P. 52-61.

9. Johnston A.C. An earthquake strength scale for the media and the public // Earthquakes&Volcanoes. 1990. V. 22, № 5. P. 214–216.

10. Милановский Е.Е. И снова Атлантида // Наука в России. 1996. № 3. С. 43-50.

### SPECIFIC FEATURES IN THE CLASSIFICATION OF VOLCANIC ERUPTIONS AND ZONING IN THE MAPPING OF VOLCANIC HAZARDS

### V.A. Ermakov<sup>1</sup>, A.I. Abdurakhmanov<sup>2</sup>, A.V. Ermakov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>3</sup> Geological Institute, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Abstract.* Consideration is being given to the basics of classification of volcanic eruptions and to the general problems of volcanic hazard zoning. The scheme presented here concerns the division of eruptions according to the relations of earthquake magnitude to energy release. The paper discusses a 1:25000 scale map of volcanic hazard zoning for the Mendeleev Volcano (Kunashir Island).

Keywords: volcanoes of the Kuril Islands, Kunashir Island, classification of eruptions, map of volcanic hazard zoning, forecasting catastrophic event

\*\*\*

УДК 551.24+551.243+550.342

### АНАЛИЗ СВЕТОДАЛЬНОМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В КОПЕТДАГСКОМ РЕГИОНЕ МЕТОДАМИ ТЕНЗОМЕТРИИ

С.Ф. Изюмов<sup>1</sup>, Ю.О. Кузьмин<sup>2</sup>, Е.А. Фаттахов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт сейсмологии и физики атмосферы АНТ, Ашхабад, Туркменистан

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты анализа светодальномерных наблюдений в Копетдагском сейсмоактивном регионе. Методом тензометрии определено изменение угла между главными осями деформаций и осями локальной системы координат во времени. Эти данные сопоставлены с землетрясениями с *М*≥4.5 в радиусе 100 км от системы наблюдений и результатами физического моделирования образцов горных пород.

Ключевые слова: горизонтальная деформация, сейсмичность, светодальномерные наблюдения, разломная зона

Исследования современных геодинами-ческих (геодеформационных) процессов в Копетдагском регионе были начаты в 1964 г. в рамках Программы «Изучение современных движений земной коры на стационарных полигонах». Ашхабадский геодинамический полигон был развернут в пределах Центрального Копетдага, и в первую очередь, охватывал очаговую область Ашхабадского катастрофического землетрясения 6 октября 1948 г. и включает в себя северный борт Копетдагского антиклинория, Предкопетдагский предгорный прогиб и южный борт Туранской плиты. На полигоне проводятся геодезические (геодинамические), геофизические, гидрогеодинамические, геохимические сейсмические и другие наблюдения. В настоящее время объем и пространственный охват ежегодного геодинамического мониторинга превосходят все другие виды мониторинга (геофизического, гидродинамического и т.д.), и поэтому полигон называется Ашхабадским геодинамическим [1]. С 1974 г. были поставлены первые светодальномерные измерения, которые представляют собой совокупность профильных и площадных систем наблюдений. Деформационная площадка «Гаудан» находится на юге г. Ашхабада и контролирует зону Передового разлома Копетдага (рис. 1).

Система наблюдений организована таким образом, что линия L3330 пересекает зону разлома, линия L2450 и линия L1532 расположены в пределах блока. Номера линий соответствуют их длине в метрах. Предыдущие исследования [2–4] показали, что имеет место полное отсутствие систематического тренда по всем измеряемым линиям на протяжении почти 40 лет. В этой связи были использованы более информативные методы анализа деформационных процессов, например, тензометрический.

Совокупность линий L1532, L2450, L3330 образует тензометрическую розетку [5], которая позволяет вычислять инвариантные характеристики деформационного процесса на основе геометрической теории деформаций.



Рис. 1. Схема системы светодальномерных наблюдений «Гаудан».

За весь период светодальномерных наблюдений (41 год) в окрестности г. Ашхабада зафиксирован ряд землетрясений с магнитудой до 6.5. Для данного исследования были выбраны землетрясения в радиусе 100 км от системы наблюдений и глубиной не более 35 км.

Для последующего анализа временных рядов пропуски были заполнены скользящим средним с шириной окна 48 месяцев. Расчеты выполнялись по специально разработанной программе ABD для анализа длительных рядов геофизических данных [6].



Рис. 2. Временной ход угла между осями главных деформаций и осями локальной системы координат (ф0). Вертикальными линиями показаны сейсмические события. Цифрами отмечены землетрясения: 1 – землетрясение 05.07.1987 г.,  $M_W$ =4.8, глубина h=33км, расстояние до системы наблюдений Δ=22 км; 2 – землетрясение 24.05.1991 г.,  $M_W$ =4.5, h=10 км, Δ=88 км; 3 – землетрясение 04.02.1997 г.,  $M_W$ =6.5, h=10 км, Δ=94 км; 4 – землетрясение 22.08.2000 г.,  $M_W$ =5.9, h=10 км, Δ=86 км. Данные по сейсмическим событиям взяты с сайта Геологической службы США (http://earthquake.usgs.gov/).

Из рисунка 2 следует, что перед наступлением сейсмического события значения угла испытывают высокочастотные знакопеременные изменения. Подобный же экспериментальный факт был обнаружен при тензометрическом анализе длительных светодальномерных наблюдений на Камчатке [8, 9].

Аналогичные результаты были отмечены при физическом моделировании деформационных процессов на образцах горных пород [7]. На рисунке 3 представлены результаты испытаний образцов известняка под действием квазистатического нагружения. Эксперимент проходил при квазистатическом длительном (около 1 года) одноосном сжатии. Образец кубической формы был изготовлен из монолитных блоков карбонатных пород. Дополнительно регистрировались локальные деформации с помощью тензодатчиков, наклеенных в виде розеток на боковые грани образца.

В каждой розетке было по три тензодатчика, ориентированных под углами 0, 45 и 90°. Каждая розетка позволяла контролировать деформацию локального участка площадью примерно 2.5–4.0 см<sup>2</sup>.



Рис. 3. Пространственно-временные изменения деформационных параметров на отдельных участках ослабленного образца во время бухтообразной вариации общей продольной деформации образца.

Для анализа был выбран трехдневный интервал наблюдений, во время которого были отмечены типичные аномальные изменения  $\phi_0$ , которые завершились разрушением образца. Видно, что перед наступлением разрушения величина угла испытывает знакопеременные изменения. При этом непосредственно перед самим актом разрушения частота знакопеременных вариаций угла уменьшается.

Касаясь физической трактовки обнаруженного явления, можно сделать следующие предварительные выводы. Знакопеременное изменение угла между главной осью деформации (например, максимального сжатия) и осью локальной системы координат (например, *X*, вдоль которой устремлена линия 1532) обусловлено собственной локальной динамикой деформационных процессов в зоне Передового разлома Копетдага, индуцированной процессами подготовки землетрясений. Подобный механизм подробно описан в работе [10], которая посвящена особенностям процесса подготовки землетрясения 02.03.1992 г., произошедшего на Камчатке.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Изюмов С.Ф., Кузьмин Ю.О. Исследование современных геодинамических процессов в Копетдагском регионе // Физика Земли. 2014. № 6. С. 3–16.

Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломов и парадоксы скоростей деформаций // Физика Земли. 2013. № 5. С. 28–46.

3. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 2. С. 401–443.

4. Кузьмин Ю.О. Тектонофизика и современная геодинамика // Физика Земли. 2009. № 11. С. 44-60.

5. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. М.: «Машиностроение», 1983. 248 с.

6. Дещеревский А.В., Журавлев В.И., Никольский А.Н., Сидорин А.Я. Технологии анализа геофизических временных рядов. Ч. 1. Требования к программе обработки // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52, № 1. С. 61–82.

7. Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Издво Московского государственного горного университета, 2004. 280 с.

8. Кузьмин Ю.О., Фаттахов Е. А. Тензометрический анализ деформаций земной поверхности по результатам длительных светодальномерных наблюдений на Камчатке // Путь науки. 2016. Т. 2, № 5 (27). С. 75–78.

 Фаттахов Е.А. Сопоставление результатов спутниковых и наземных методов геодеформационных наблюдений за СДКЗ на Камчатке // Триггерные эффекты в геосистемах: Тезисы докладов III Всероссийского семинара-совещания / Отв. редакторы В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян. М.: Изд-во «ГЕОС», 2015. С. 97.

10. Кузьмин Ю.О., Чуриков В.А. Механизм формирования аномальных деформационных процессов в период подготовки Камчатского землетрясения 2 марта 1992 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 37–51.

### ANALYSIS OF LASER RANGEFINDER OBSERVATIONS IN THE KOPETDAG REGION BY THE METHODS OF TENSOMETRY

S.F. Izyumov<sup>1</sup>, Yu.O. Kuzmin<sup>2</sup>, E.A. Fattakhov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Seismology and Atmosphere Physics, Academy of Sciences of Turkmenistan, Ashkhabad, Turkmenistan <sup>2</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Abstract.* Presented here are the analysis results for the laser rangefinder observations in the Kopetdag seismically active region. The method of tensometry has been used to determine temporal change in the angle between the principal strain axes and the axes of the local coordinate system. These data have been compared with  $M \ge 4.5$  earthquakes in a 100 km radius from the observing system and with physical modeling results for rock samples.

Keywords: horizontal deformation, seismicity, laser rangefinder observation, fault zone

\*\*\*

УДК 551.248(571.56)

### ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР АРКТИКО-АЗИАТСКОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЯСА

Л.П. Имаева<sup>1,2</sup>, В.С. Имаев<sup>1,2</sup>, В.И. Мельникова<sup>1,2</sup>, С.В. Ашурков<sup>1,2</sup>, А.И. Середкина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

Аннотация. Исследование направлено на выявление закономерности процессов сейсмотектонической деструкции земной коры в зоне взаимодействия между Североамериканской и Евразийской литосферными плитами. Проанализированы: структурно-тектоническое положение, параметры глубинного строения, системы активных разломов, поля тектонических напряжений, установленные на основе решений фокальных механизмов землетрясений, а также типов позднекайнозойских складчатых и разрывных деформаций. По сейсмологическим данным о механизмах землетрясений рассчитаны средние тензоры сейсмотектонических деформаций, что позволило совместно со структурно-тектоническими и геолого-геофизическими исследованиями выявить в данном регионе области основных и переходных режимов напряженно-деформированного состояния земной коры. Установлено, что исследуемая территория находится в области влияния разных геодинамических процессов: рифтогенеза (спрединговый хребет Гаккеля и шельф моря Лаптевых), переходная зона, где сочленяются срединно-океанические и континентальные структуры земной коры (Хараулахский сегмент), а также сжатия, действующего в сейсмотектонической зоне Черского.

*Ключевые слова:* сейсмический пояс, региональный сегмент, активный разлом, кинематический тип, парагенезис активных структур, фокальный механизм землетрясения, сейсмотектоническая деформация, режим напряженнодеформированного состояния земной коры

Комплексные геолого-геофизические и сейсмологические исследования выявили на территории северо-востока Азии протяженный Арктико-Азиатский сейсмический пояс (ААСП), который в структурно-тектоническом плане подразделяется на региональные сегменты с развитием в их пределах характерных парагенезисов активных структур, связанных с определенным типом напряженного состояния земной коры [1, 2]. На базе фокальных механизмов землетрясений ААСП в сегментах определены сейсмоактивные области с разными типами напряженно-деформированного состояния земной коры [3] и рассчитаны средние тензоры сейсмотектонических деформаций (СТД).

Лаптевоморский сегмент включает акваторию шельфа моря Лаптевых и сопряженные структуры побережья. Здесь сочленяются активизированные структуры Сибирской платформы, а также Таймыр-Верхояно-Колымской и Новосибирскоской. Чукотской покровно-складчатых систем. Сейсмичность в акватории Северного Ледовитого океана представлена линейной зоной эпицентров землетрясений и обусловлена спредингом океанического дна, на что указывают параметры фокальных механизмов местных землетрясений [2] и распределение аномалий магнитного поля [4, 5]. По данным СТД, режим растяжения распространяется на шельф моря Лаптевых и прибрежные районы континента. Здесь главные оси напряжений располагаются вкрест простирания основных тектонических элементов и при пологих углах погружения имеют северо-востокюго-западное направление. На шельфе моря Лаптевых выявляются два тектонических блока, расположенных по обе стороны от осевой зоны границы между Евразийской и Североамериканской плитами [1, 2, 4]. На западной границе Лено-Таймырского блока и на шельфе Восточно-Сибирского моря по данным фокальных механизмов землетрясений существует режим сжатия как реакция на рифтинг, действующий в пределах основной зоны эпицентров хребта Гаккеля и на шельфе моря Лаптевых.

Хараулахский сегмент в тектоническом отношении расположен на северном фланге Верхоянского складчато-надвигового пояса [6]. Напряженное состояние земной коры сегмента исследовалось на основе фокальных механизмов землетрясений [3] и данных геолого-структурных наблюдений [1, 2]. По данным СТД в Хараулахском сегменте установлены две области с переходным деформационным режимом: в пределах северо-западного фланга Верхоянской складчатой системы (от вертикального режима к сжатию) и в Буорхаинской зоне разломов (от вертикального режима к растяжению). В этих областях вклад сжимающих усилий в общую деформационную обстановку весьма существенен, при этом близгоризонтальная ось сжатия ориентирована на северо-восток-юго-запад. Полученные сейсмологические данные согласуются с материалами геологоструктурных наблюдений. Установленная кинематика активных разломов (сбросы, сдвиги, надвиги и их модификации) подтверждена также анализом тектонической трещиноватости горных пород и типами палеосейсмодислокаций. Все это свидетельствует о том, что сейсмический процесс в Хараулахской зоне развивается в условиях как растяжения, так и сжатия. Таким образом, в Хараулахском сегменте Верхоянской сейсмотектонической зоны существует уникальная переходная область изменения полей тектонических напряжений растяжения на сжатие, в пределах которой сочленяются срединноокеанические и континентальные структуры земной коры. Окончательная смена режимов сейсмотектонического деформирования земной коры (на сжатие) отмечается в региональных сегментах зоны Черско-Γ0.

Яно-Индигирский сегмент сейсмотектонической зоны Черского включает ряд террейнов различной геодинамической природы, расположенных к северо-западу от среднего течения р. Индигирка. По данным СТД, на северо-западе сегмента укорочение земной поверхности происходит в направлении северо-восток-юго-запад, при этом ось напряжений сжатия близгоризонтальна. Кинематический анализ зон динамического влияния активных разломов показал, что здесь в условиях транспрессии имеет место определенная динамическая обстановка, инициированная взаимодействием фронтальных структур Евразийской и Североамериканской литосферных плит. Подобные условия возможны, если при сближении плит роль активного индентора выполнял Колымо-Омолонский блок. Результат такого воздействия проявился в формировании перед фронтальной частью индентора расходящихся северо-западных (левых) и юго-восточных (правых) сдвигов, формирующих на своих окончаниях веерообразные зоны сжатия, представленные широким спектром складчатых и разрывных деформаций в кайнозойских отложениях Индигиро-Зырянского прогиба. Перед фронтальной областью сопряжения закономерно расположена зона растяжения [1, 4].

Индигиро-Колымский сегмент зоны Черского является северным блоком Охотоморской коровой плиты. Здесь пространственное распределение сейсмичности и систем активных разломов позволяет четко выделить три зоны повышенной сейсмотектонической активности. В первой из них землетрясения концентрируются вдоль Кетандино-Ульбейской системы правых сдвигов субдолготной ориентации. Фокальные механизмы произошедших здесь землетрясений имеют восток-северовосточную ориентацию напряжений сжатия и правосдвиговые смещения в их очагах. Вторая полоса сейсмичности приурочена к Индигиро-Колымской системе левосдвиговых разломов северо-западного простирания [1, 2]. По данным СТД здесь также устанавливается сдвиговая зона сейсмотектонических деформаций, где вклад сжимающих и растягивающих усилий примерно сопоставим, что выражается в пологих углах погружения главных осей напряжений. Следующая зона относится к системе Челомджа-Ямского левого сдвига со взбросовой компонентой. Пространственная комбинация данных структурно-динамических зон показывает, что под воздействием сжимающих усилий Охотоморская плита выталкивается к юго-востоку, способствуя конвергенции Североамериканской и Евразийской плит с развитием левосторонних движений по разломам в северо-западной части зоны Черского, а правосторонних перемещений – в Северном Приохотье.

На основе скоростей современных горизонтальных движений с помощью программного пакета QOCA [7], а также метода, предложенного М. Хаклом с соавторами [8], были рассчитаны деформационные параметры Арктического сектора. Результаты расчетов показали, что для территории Российской Арктики характерны низкие значения скоростей деформации на уровне 10<sup>-9</sup> год<sup>-1</sup>, что в тектоническом плане соответствует Евразийской и Североамериканской литосферным плитам.

Максимальные значения скоростей деформаций  $\approx |3 \times 10^{-8} \text{ год}^{-1}|$  фиксируются в зоне сочленения Евразийской, Североамериканской и Охотоморской плит. В зоне межплитной границы, между Североамериканской и Охотоморской плитами, отмечается область вращения против часовой стрелки – в обратном для остальной территории направлении.

Таким образом, исследуемая территория находится в области влияния разных геодинамических процессов: на ней сказывается воздействие рифтогенных процессов в спрединговом хр. Гаккеля и на шельфе моря Лаптевых, а также сжатие, действующее в сейсмотектонической зоне Черского, возникающее при сближении литосферных плит: Тихоокеанской (скорость 8–10 см/год), Североамериканской (~1 см/год) и Евразийской (~0.2 см/год) [1, 2].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15– 17–20000).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии. М.: ГЕОС, 2000. 226 с.

2. Имаев В.С., Имаева Л.П., Маккей К.Г. и др. Геодинамика отдельных сегментов литосферных плит на северовостоке Азии // Геофизические исследования. 2009. Т. 10, № 1. С. 5–17.

3. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.

Грачев А.Ф. Основные проблемы новейшей тектоники и геодинамики Северной Евразии // Физика Земли. 1996.
 № 12. С. 5–36.

5. Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. Введение в геодинамику. М.: Недра, 1979. 311 с.

6. Парфенов Л.М., Оксман В.С., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Третьяков Ф.Ф., Трунилина В.А., Дейкуненко А.В. Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: Наука, 2001. С. 199–254.

7. Dong D., Herring T.A., King R.W. Estimating regional deformation from a combination of space and terristrial geodetic data // Journal of Geodynamics. 1998. V. 72. P. 200–214.

8. Hackl M., Malservisi R., Wdowinski S. Strain rate patterns from dense GPS networks // Natural Hazards Earth System Science. 2009. V. 9. P. 1177–1187.

# GEODYNAMIC ACTIVITY AND SEISMOTECTONIC DEFORMATIONS OF NEOTECTONIC STRUCTURES OF THE ARCTIC-ASIAN SEISMIC BELT

L.P. Imaeva<sup>1, 2</sup>, V.S. Imaev<sup>1, 2</sup>, V.I. Melnikova<sup>1, 2</sup>, S.V. Ashurkov<sup>1, 2</sup>, A.I. Seredkina<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Diamond and Precious Metal Geology Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

*Abstract.* The present study is focused on determining regular patterns of seismotectonic destruction of the Earth's crust in the zone of interaction between the North American and the Eurasian lithospheric plates. Analysis has been made on structural-tectonic position, deep-structure parameters, active fault systems, and tectonic stress fields calculated based on focal mechanism solutions of strong earthquakes and types of the late Cenozoic folded and ruptural deformations. Average seismotectonic deformation tensors have been estimated from the data on focal mechanisms of strong earthquakes that, together with structural-tectonic and geologic-geophysical data, made it possible to identify the main and intermediate stress-strain regime zones in the Earth's crust in this region. It has been found that the investigated area is influenced by a wide range of geodynamic processes: rifting (spreading Gakkel ridge and Laptev Sea shelf), the transition zone between the midocean and continental structures of the Earth's crust (Kharaulakh segment), and the current compressional regime in the Chersky seismotectonic zone.

*Keywords*: seismic belt, regional segment, active fault, kinematic type, parageneses of active structure, earthquake focal mechanism, seismotectonic deformation, stress-strain regime in the Earth's crust

\*\*\*

УДК 551.24+551.243+550.342

### АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОЙ И СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ

### Ю.О. Кузьмин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Аннотация. Приведены результаты сравнительного анализа данных, полученных наземными и спутниковыми геодезическими измерениями на тестовых объектах: геодинамических полигонах в сейсмоактивных зонах, на месторождениях нефти и газа и в подземных хранилищах газа. Показано, что амплитуды вертикальных и горизонтальных смещений, полученные по данным спутниковых измерений, в 5–10 раз превосходят аналогичные параметры, измеренные наземными методами.

Ключевые слова: наземные геодезические наблюдения, ГНСС-измерение, среднегодовая скорость относительных деформаций, вертикальные и горизонтальные смещения

Исторически сложилось так, что результаты повторных геодезических наблюдений используются специалистами наук о Земле в соответствии с существующими парадигмами научных направлений. Так, например, в период господствования фиксистских представлений в геотектонике исследователи активно использовали результаты повторных нивелирных наблюдений вдоль протяженных (сотни и тысячи км) линий Государственного нивелирования. По этим данным были сделаны выводы о преобладании вертикальных движений земной коры.

Когда эти представления сменились на мобилистские, оказалось, что для инструментального доказательства современных горизонтальных движений литосферных плит материалы повторных геодезических наблюдений некондиционны. Действительно, измерения горизонтальной компоненты смещений наземными геодезическими методами (триангуляция, трилатерация, светодальнометрия и т.п.), вопервых, имели меньшую точность по сравнению с нивелирными измерениями, а во-вторых, не могли обеспечивать большой пространственный охват территорий.

Появление спутниковых геодезических наблюдений ознаменовалось их широким использованием для определения скоростей и направленности горизонтальных движений литосферных плит. При этом сложилась ситуация, противоположная предыдущей. Точность измерения горизонтальной компоненты смещений земной поверхности в ГНСС измерениях оказалась существенно выше, чем вертикальной, при большом пространственном масштабе наблюдений. Кроме этого, длинные профили Государственной нивелирной сети повторяются с интервалом в первые десятки лет, а спутниковые наблюдения обеспечивают высокую временную детальность наблюдений, вплоть до непрерывной.

Объективные особенности технологии геодезических наблюдений позволяют существенно точнее измерять вертикальную составляющую смещений земной поверхности наземными методами, а горизонтальную компоненту – спутниковыми. Отсюда напрашивается вывод о принципиальной невозможности совместного анализа результатов измерения идентичных компонент движения, полученных наземными и спутниковыми методами. Однако постулаты метрологии требуют независимости результатов наблюдений от способа измерений идентичных величин [1, 2]. В противном случае вывод о преобладании вертикальных или горизонтальных движений в общем ходе геодинамического процесса будет отражать уровень технологических возможностей того или иного метода измерений.

В конце XX в. сменилась парадигма и в вопросе о структуре литосферы. Была выдвинута концепция дискретности геофизической среды на разных масштабных уровнях. Эти представления диктуют необходимость изучения современных геодинамических процессов в различных пространственновременных масштабах. Отсюда следует необходимость сопоставления данных наземной и спутниковой геодезии, поскольку каждый из методов имеет свои особенности в обеспечении пространственновременной детальности наблюдений. Густота пунктов спутниковых и наземных геодезических сетей существенно различается. Это объясняется различием в технологии закладки наблюдательных пунктов. Например, реперы для наземной съемки могут быть заложены с произвольной густотой, а расстояния между пунктами существующих сетей ГНСС наблюдений колеблются от десятков до сотен километров.

Первые же сопоставления среднегодовых скоростей относительных горизонтальных деформаций земной поверхности, измеренные наземными и спутниковыми методами, выявили их существенное различие. Так, например, по данным повторных светодальномерных наблюдений, на Камчатском геодинамическом полигоне эти скорости оказались в пределах  $3-5 \cdot 10^{-8}$  в год, а по данным ГНСС – порядка 10<sup>-7</sup> в год [3, 4]. Аналогичные результаты получены в Копетдагском регионе. По данным ГНСС наблюдений за кинематикой Туранской и Иранской плит, скорость систематического сдвигового перемещения вдоль Передового разлома Копетдага должна составлять 25 мм в год. Тогда за период 40летних светодальномерных измерений в зоне этого разлома была бы получена итоговая амплитуда в 1 м. Однако величина накопленных смещений не превышает первые миллиметры, что при существующей длине линий обеспечивает среднегодовую скорость относительных деформаций на уровне 2–3·10<sup>-8</sup> в год [5–7].

В рассмотренных примерах пункты спутниковых и наземных наблюдений не совпадали. Для сравнительного анализа результатов следует привлекать данные, получаемые на геодинамических полигонах, так как в их пределах используются совмещенные пункты наземных и спутниковых наблюдений за деформациями земной поверхности.

Ниже рассмотрены результаты, полученные на геодинамическом полигоне, который организован в пределах нефтяного месторождения (рисунок), расположенного на северо-западе Казахстана.

На рисунке представлены два варианта анализа информативности спутниковых методов. В верхней части показано распределение вертикальных смещений (по вертикали – мм, по горизонтали – м), полученное по данным нивелирования (сплошная линия) и GPS (прерывистая линия) вдоль профиля, пересекающего область отбора нефти, ниже – площадное распределение вертикальных и горизонтальных смещений, полученное исключительно по материалам повторных GPS-измерений. Наземные и спутниковые наблюдения выполнялись синхронно с интервалом 1 год.

Как известно, при интенсивной добыче углеводородов происходит оседание земной поверхности [8]. Этот процесс отразился на профильном графике вертикальных смещений. Однако амплитуда оседания, по данным нивелирования, практически на порядок меньше, чем по GPS-измерениям.

Большой интерес представляет сопоставление вертикальных и горизонтальных смещений, полученных только в рамках GPS-измерений. По существу, имеет место тестовая задача. При оседании земной поверхности в ее центральной части величины горизонтальных смещений должны быть близки к нулю. Из рисунка следует, например, что в районе пункта № 17 наблюдается максимальное оседание земной поверхности (до 35 мм).



Результаты сопоставления вертикальных смещений земной поверхности по данным нивелирования и GPS (вверху) и площадное распределение вертикальных и горизонтальных смещений по данным GPS (внизу).

Если данная ситуация объективно существует, то векторы горизонтальных смещений в пунктах № 15, 16, 18, 19 должны быть направлены в сторону максимального оседания, а пункт № 17 не должен перемещаться в горизонтальном направлении. Но этого не происходит. Пункты испытывают движения в различных хаотичных направлениях, а пункт № 17 активно смещается в северо-северозападном направлении.

Отсюда следует, что методы спутниковой геодезии, используемые в реальном масштабе времени, нуждаются в серьезных метрологи-ческих исследованиях, особенно в части создания

надежных способов закрепления наблюдательных пунктов [9]. Это касается тех случаев, когда необходимо изучать современ-ные деформации в локальной системе коор-динат. Большое количество пунктов мировой сети и жесткое уравнивание при отсчетной основы, определении безусловно, способствуют эффективности ГНСС измерений для исследо-вания кинематики плит. Однако, если пространственно-временной масштаб сети становится более локальным, сразу выявляется спектр помех, принципиально неустранимый из-за малого количества пунктов наблюдений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин Ю.О. Проблемные вопросы изучения деформационных процессов в современной геодинамике // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 3. С. 98–107.

 Кузьмин Ю.О. Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике // Физика Земли. 2014. № 5. С. 51–64.

3. Левин В.Е., Бахтияров В.Ф., Титков Н.Н., Сероветников С.С., Магуськин М.А., Ландер А.В. Современные движения земной коры (СДЗК) на Камчатке // Физика Земли. 2014. № 6. С. 17–36.

4. Кузьмин Ю.О., Чуриков В.А. Механизм формирования аномальных деформационных процессов в период подготовки Камчатского землетрясения 2 марта 1992 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 37–51.

5. Изюмов С.Ф., Кузьмин Ю.О. Исследование современных геодинамических процессов в Копетдагском регионе // Физика Земли. 2014. № 6. С. 3–16.

6. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломов и парадоксы скоростей деформаций // Физика Земли. 2013. № 5. С. 28–46.

7. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 2. С. 401–443.

8. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О., Полоудин Г.А. Оценка процессов проседания земной поверхности при разработке газовых месторождений (на примере Северо-Ставропольского месторождения) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2002. № 7. С. 54–57.

9. Кузиков С.И. Методические задачи и проблемы точности GPS-наблюдений (на примере Бишкекского геодинамического полигона). 2012. № 6. С. 55–69.

### ACTUAL PROBLEMS OF COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF TERRESTRIAL AND SATELLITE GEODETIC MEASUREMENTS

### Yu.O. Kuzmin

Schmidt Institute of Physics of the Earth, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Presented here are the results of comparative analysis of the data on terrestrial and satellite geodetic measurements at the test sites: geodynamic polygons in seismically active zones, oil and gas fields, and underground gas storage facilities. It is shown that the amplitudes of vertical and horizontal displacements derived from satellite measurements are 5–10 times higher than those derived from ground-based measurements.

Keywords: ground-based geodetic observations, GNSS measurements, average annual rate of relative deformations, vertical and horizontal displacements

\*\*\*

УДК 528.8.044.2+528.873.044.1

### ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ НОВОГО РАДАРНОГО СПУТНИКА ALOS-2/PALSAR-2 В ИССЛЕДОВАНИИ АКТИВНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

М.А. Лебедева<sup>1</sup>, В.А. Саньков<sup>1</sup>, А.И. Захаров<sup>2</sup>, Л.Н. Захарова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

Аннотация. В работе представлены первые результаты исследования деформаций земной поверхности методом дифференциальной PCA-интерферометрии по новым данным японского радиолокатора PALSAR-2. Изучаемые объекты находятся в пределах Байкальской рифтовой системы (БРС). Новые данные позволили продолжить изучение тектонических деформаций, происходящих в зоне сочленения субширотной Мондинской и субмеридиональной Хубсугульской впадины. Результат проведенного исследования – обнаружение сейсмогенных деформаций в северо-восточной части БРС на склонах Муяканского хребта, получение новых данных об оползневом процессе вблизи станции Казанкан Байкало-

Амурской железнодорожной магистрали (БАМ), а также выявление деформации неясного генезиса в восточной части Муяканской впадины.

Ключевые слова: PALSAR-2, РСА интерферометрия, деформационный процесс

Ключевая концепция интерферометрии состоит в обработке пар изображений, полученных с помощью радара с синтезированной апертурой (РСА), и интерпретации данных о разности фаз сигналов, отображающейся на интерферограммах. В интерферометрии повторного хода изменения земной поверхности, произошедшие между пролетами, наблюдаются в проекции по направлению к спутнику - LOS (от англ. line-of-sight direction). Имея дополнительную информацию об объекте, можно оценить истинное смещение и определить вертикальную и горизонтальную составляющие. В нашем исследовании применялись данные, полученные новым радиолокатором PALSAR-2 на борту спутника ALOS-2, запущенного на орбиту Японским аэрокосмическим агентством ЈАХА в 2014 г. Результаты сравнивались с материалами, полученными ранее по данным ALOS/PALSAR [1, 2]. Несмотря на то, что радиолокаторы работали в одном и том же Lдиапазоне, длины волн немного отличаются и составляют 23.6 см для ALOS/PALSAR и 22.9 см для ALOS-2/PALSAR-2. На неразвернутых интерферограммах с компенсированным рельефом изменение разности фаз на 2π соответствует изменению наклонной дальности на половину длины волны, что составляет 11.8 см для данных PALSAR и 11.45 см лля PALSAR-2.

В сравнении с другими методами измерения деформаций преимуществом PCA интерферометрии является наблюдение смещений земной поверхности по всей площади объекта с высокой точностью. Ограничения метода: временная декорреляция, происходящая из-за изменения радиофизических свойств поверхности, и влияние атмосферных и ионосферных явлений. Методы преодоления ограничений детально описаны в литературе [3, 4].

Активная разрывная зона тектонического происхождения была обнаружена ранее на нескольких интерферограммах, полученных по данным PALSAR, в зоне влияния активных разломов и сочленения субширотной Тункинской и субмеридиональной Хубсугульской впадины юго-западной части Байкальской рифтовой системы [1]. Длина зоны составляет около 4 км, смещение по направлению к спутнику (LOS) от 18 до 42 мм, что соответствует вертикальному смещению 22–50 мм.

Новые данные, полученные при обработке интерференционных пар PALSAR-2, подтвердили продолжение активизации деформационного процесса. Хорошая когерентность в районе исследований, несмотря на съемку во время разных сезонов, наблюдается для пары 24.09.2015–12.02.2015. С помощью инструмента ROI (Region Of Interest), встроенного в программу SARscape, оценены смещения зон повышенных деформаций а и в относительно референсной поверхности R (рис. 1). Смещения по LOS составили 3.6 мм, что соответствует вертикальному смещению 4 мм. Полученные значения коррелируют с данными ALOS/PALSAR.



Рис. 1. Деформации в южном борту Мондинской впадины по данным ALOS-2/PALSAR-2: *a* – фрагмент амплитудного снимка; *б* – фрагмент развернутой интерферограммы (PALSAR-2, 24.09.2015–12.02.2015); *в* – фрагмент развернутой интерферограммы с добавлением ROI (пояснения в тексте). Треугольниками показано положение деформации.



Рис. 2. Деформации земной поверхности на Муяканском хребте по данным ALOS-2/PALSAR-2: a - фрагментамплитудного снимка;  $\delta - фрагмент$  развернутой интерферограммы (PALSAR-2, 26.09.2015 – 27.09.2014);  $\epsilon$ увеличенный фрагмент развернутой интерферограммы с добавлением ROI; R – референсная поверхность, a -зона повышенных деформаций.



Рис. 3. Эпицентры землетрясений ( $M_L$ =2.5–4.9), зарегистрированных на полигоне за период с сентября 2014 г. по сентябрь 2015 г.

В наиболее активной части северо-западного сегмента Байкальской рифтовой системы в зоне активных разломов Верхнеангарсковлияния Муйской междувпадинной перемычки, по данным РСА интерферометрии, обнаружено три участка, испытывающих деформационные процессы различного генезиса. К сожалению, большая часть интерферограмм, полученных для района, по данным PALSAR-2, подвержены декорреляции. Однако участки с хорошей корреляцией можно обнаружить на паре 26.09.2015-27.09.2014. Благодаря полученным данным на склонах Муяканского хребта был обнаружен участок, испытывающий опускание земной поверхности (рис. 2). Его длина составляет около 8 км, ширина – от 1 до 4 км. Изменение дальности LOS составило 60 мм, что соответствует вертикальному смещению 68 мм. Наблюдаемые смещения земной поверхности связаны с роем землетрясений, локализованным в районе в период между съемками (рис. 3).

В этом же районе исследований, по данным РСА интерферометрии, ранее нами наблюдались экзогенные деформации, происходящие на участке Байкало-Амурской железнодорожной магистрали в нескольких километрах от Северо-Муйского тоннеля (ст. Казанкан, п. Северомуйск, координаты 56.1 °с.ш., 113.8 °в.д.) [2]. Для изучения оползневого процесса применялись данные ALOS/PALSAR. Значительные подвижки земной поверхности были обнаружены около железнодорожных мостов. Наибольшее изменение дальности (LOS) по направлению от поверхности к радару составило 61 мм для интерферометрической пары 17.01.2009–12.01.2007 и 86 мм для пары 23.01.2011–01.03.2008. Эти значения соответствуют смещениям грунтовых масс оползня вдоль по склонам на 80 и 112 мм.

На интерферограммах, полученных по данным ALOS-2/PALSAR-2, на склоне выше железнодорожных путей было обнаружено оседание земной поверхности (рис. 4, *e*, *a*), около двух железнодорожных мостов также наблюдаются подвижки (см. рис. 2). Изменение дальности составило 32 мм (а), 34 мм (b) и 31 мм (c), что соответствует вертикальному смещению 37 мм (а), 39 мм (b), 35 мм (c). Таким образом, деформационные процессы продолжаются, несмотря на инженерные работы, направленные на укрепления склонов.

Вблизи окончания Муяканского разлома и на замыкании Муяканской впадины обнаружены деформации земной поверхности неясного генезиса (рис. 5).

Поднятие, наблюдаемое в областях, не может быть объяснено сейсмическими собы-тиями. Картина распределения деформаций не похожа на соответствующую мерзлотным процессам и пучению болот. Ранее на восточном окончании северного крыла разлома и непосредственно в зоне сместителя с помощью PCA интерферометрии, по данным ENVISAT, наблюдались деформации эндогенного происхождения [2].



Рис. 4. Деформации земной поверхности около железнодорожной станции Казанкан, по данным ALOS-2/PALSAR-2: *а* – фрагмент амплитудного снимка; *б* – фрагмент развернутой интерферограммы (PALSAR-2, 26.09.2015 – 27.09.2014); *в* – увеличенный фрагмент развернутой интерферограммы с добавлением ROI. Рамка показывает положение увеличенного фрагмента; R – референсная поверхность; a, b, c – зоны повышенных деформаций.



Рис. 5. Деформации земной поверхности в Муяканской впадине, по данным ALOS-2/PALSAR-2: *а* – фрагмент амплитудного снимка; *б* – фрагмент развернутой интерферограммы (PALSAR-2, 26.09.2015 – 27.09.2014).

Однако локализация деформаций, наблюдаемых по данным PALSAR-2, не совпадает с обнаруженными ранее. В настоящий момент вследствие недостаточного количества данных невозможно сделать выводы о генезисе деформаций. Длина области (1) (рис. 5) составляет около 9 км, ширина ~ 6 км. Смещение по направлению к спутнику LOS=20 мм, что соответствует вертикальному смещению 23 мм. Длина области (2) (рис. 5) ~ 3 км, ширина ~ 1 км. LOS=30 мм, что соответствует вертикальному смещению 34 мм.

Первые исследования, проведенные при помощи данных ALOS-2/PALSAR-2, показывают высокий потенциал в исследованиях медленных смещений земной поверхности различного генезиса и их применимость в залесенных и горных условиях Байкальской рифтовой системы. Полученные данные коррелируют с наблюдениями, проведенными ранее с помощью ALOS/PALSAR. Мы планируем продолжить исследования деформаций с использованием данных ALOS-2/PALSAR-2 для мониторинга и выявления новых динамических процессов.

Авторы выражают благодарность Японскому аэрокосмическому агентству JAXA (Japan Aerospace eXploration Agency) за радарные данные ALOS-2/PALSAR-2, предоставленные для исследования по гранту ALOS-2 4th RA. При расчетах использовались цифровые модели рельефа SRTM.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедева М.А., Саньков В.А., Захаров А.И., Захарова Л.Н. Активные деформации в зоне влияния разломов Мондинской впадины по данным РСА-интерферометрии // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 5. С. 63–65.

2. Лебедева М.А., Саньков В.А., Захаров А.И., Захарова Л.Н. Деформации земной поверхности вблизи трассы Байкало-Амурской железнодорожной магистрали по данным дифференциальной РСА интерферометрии // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7, № 2. С. 315–328. doi:10.5800/GT-2016-7-2-0209

3. Hanssen R.F. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. Delft University of Technology, the Netherlands, 2001. 308 p.

4. Massonnet D., Rabaute T. Radar interferometry: Limits and potential // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1993. V. 31, № 2. P. 455–464.

### AN EXPERIENCE IN THE USE OF THE DATA FROM THE ADVANCED LAND OBSERVING SATELLITE ALOS-2/PALSAR-2 RADAR IN THE RESEARCH OF ACTIVE DEFORMATIONS IN THE BAIKAL RIFT SYSTEM

### M.A. Lebedeva<sup>1</sup>, V.A. Sankov<sup>1</sup>, A.I. Zakharov<sup>2</sup>, L.N. Zakharova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia
 <sup>2</sup> Fryazino Branch of the Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, the Russian Academy of Sciences, Fryazino, Russia

*Abstract.* The paper presents the first results of the Earth's surface dynamics studies by means of differential SAR interferometry analysis of the new data from Japanese spaceborne SAR system PALSAR-2. The investigated areas are located within the Baikal rift system (BRS). The new data has made it possible to continue the studies of tectonic deformations in the junction zone between the sublatitudinal Mondy basin and the submeridional Khubsugul basin. The study has allowed identifying seismogenic deformations in the northeastern BRS on the Muyakan ridge slopes, obtaining new data on landslide processes near Kazankan station of the Baikal-Amur mainline (BAM), and discovering deformations of unclear genesis in the eastern Muyakan basin. *Keywords:* PALSAR-2, SAR interferometry, deformation process

\*\*\*

УДК 550.8.053

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ИЗВЕСТНЫЕ СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

О.Ф. Лухнева, А.В. Лухнев

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Показан пример обработки временных рядов GPS-наблюдений для оперативного исследования косейсмических деских деформаций, сопровождающих сильнейшие землетрясения. Разработан подход для изучения косейсмических смещений в момент землетрясения с целью расчета амплитуд смещений и построения схем подвижек косейсмических деформаций земной поверхности. Получены количественные параметры и векторы направлений косейсмических деформаций для землетрясений с  $M_W \ge 7.0$  в Индонезии, Чили, Гаити, Японии и Непале. В качестве примера приведены рассчитанные нами амплитуды косейсмических деформаций по выборочным GPS-станциям во время землетрясения в Чили 27 февраля 2010 г. с  $M_W = 8.8$ . Амплитуда смещения составила 2902.14 мм для пункта CONZ, расположенного на расстоянии около 92 км от эпицентра землетрясения, а для станции BUE2, расположенной на расстоянии около 49 км, 53.22 мм. Построены графики зависимости амплитуды от кинематики смещений (или кинематического типа землетрясений), удаленности GPS-станций от эпицентра землетрясений.

Ключевые слова: глобальная система позиционирования, землетрясение, косейсмическая деформация, амплитуда

Деформации земной поверхности, которые сопровождают сильнейшие землетрясения, отражают действие физических процессов различной природы, различающихся как по интенсивности, так и по пространственно-временным характеристикам. По времени действия эти деформации подразделяются на косейсмические, происходящие непосредственно в момент землетрясения, и постсеймические, которые могут длиться месяц, год или десятилетия после сейсмического события. Косейсмические деформации можно наблюдать как сейсмологическими, так и геодезическими методами, а постсейсмические – только геодезическими.

Во многих странах мира, где наблюдается высокая сейсмическая активность, развернуты геодинамические полигоны и на постоянной основе функционируют GPS-станции, а приемники ведут непрерывную высокоточную регистрацию деформаций земной коры [1–7]. Практика показывает, что такой мониторинг позволяет отслеживать процессы тектонических деформаций поверхности земной коры, рассчитывать косейсмические/постсейсмические деформации и содействует изучению изменений в напряженно-деформированном состоянии, что, в конечном итоге, способствует решению задач прогноза землетрясений.

В данном исследовании предпринята попытка изучения косейсмических деформаций земной поверхности, являющихся следствием сильнейших землетрясений. Рассмотрены косейсмические деформации для большинства сильнейших землетрясений, произошедших за последние десять лет активного GPS-мониторинга в различных сейсмоактивных регионах: Японо-Курило-Камчатская островная дуга, Суматра-Андаманская субдукционная зона, Чилийская зона. Характерной общей чертой всех перечисленных событий является схожий механизм межплитового субдукционного пологого надвига.

Целью данной работы был анализ временных рядов GPS-измерений для определения направлений и величин косейсмических деформаций, сопровождающих сильнейшие землетрясения.

В выборке участвовали данные по GPSстанциям, на которых в момент сейсмических событий велись непрерывные наблюдения и которые находятся в свободном доступе для использования. Для анализа мы обработали временные ряды наблюдений по сильнейшим землетрясениям мира последних лет: три сильных землетрясения в Индонезии – Северная Суматра – 26.12.2004 г.,  $M_W$ =9.3; Северная Суматра – 26.12.2004 г.,  $M_W$ =9.3; Северная Суматра – 26.12.2004 г.,  $M_W$ =9.3; Северная Суматра – 28.03.2005 г.,  $M_W$ =8.6; Южная Суматра – 12.09.2007 г.,  $M_W$ =8.5; на Гаити 12.01.2010 г.,  $M_W$ =7.0; в Чили – 27.02.2010 г.,  $M_W$ =8.8; Сендайское землетрясение 11.03.2011 г. в Японии,  $M_W$ =9.0; два землетрясения 25.04.2015 г. в Непале,  $M_W$ =7.8 и  $M_W$ =8.1 [2–7]. Нами разработан подход для оперативного изучения косейсмических деформаций в момент землетрясения с целью расчета амплитуд смещений и построения схем подвижек косейсмических деформаций земной поверхности на основе смещений положения станции. В результате исследования рассчитаны амплитуды деформаций и векторы направлений деформаций для крупнейших землетрясений мира в различных геодинамических обстановках. Построены графики зависимости амплитуд от кинематики смещений (или кинематического типа землетрясения), удаленности стационарных GPSстанций от эпицентра землетрясения.

Выявленные косейсмические движения хорошо выражены для всех сейсмических событий. Вопервых, они наблюдаются на большинстве станций, расположенных на разном удалении от эпицентра землетрясения. Во-вторых, временные функции сигнала на различных станциях и компонентах не являются идентичными, но имеют сопоставимую длительность и относительно простую импульсообразную форму. В-третьих, их амплитуда смещений сопоставима с силой сейсмического события.

В качестве примера приведем рассчитанные нами амплитуды косейсмических деформаций по выборочным GPS-станциям во время землетрясения в Чили 27.02.2010 г. с  $M_W$ =8.8. Смещения всех пунктов ориентированы на запад. Амплитуда смещения составила 2902.14 мм для пункта CONZ, расположенного на расстоянии около 92 км от эпицентра землетрясения, а для станции BUE2, расположенной на расстоянии около 49 км, – 53.22 мм. Полученные нами данные хорошо согласуются по количественным параметрам и направлению смещений скольжения с результатами исследований зарубежных специалистов [7].

Исследование показало, что спутниковые геодезические построения косейсмических смещений, сопровождающих сильнейшие землетрясения, являются информативным и оперативным источником информации о реологических свойствах среды. Представленная методика исследования может быть использована для получения оценок и количественных параметров в сейсмоактивных регионах, где развернуты сети спутниково-геодезических наблюдений достаточной плотности и непрерывающихся GPS-записей. Знания глубинного строения земной коры и моделирование косейсмических процессов составляют базу для корректного прогнозирования накопления деформационного потенциала и сейсмической энергии, выделившейся во время землетрясения. Это так же важно для определения параметров постсейсмических деформаций – продолжительности во времени, вектора направления и амплитуды.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Вызов Л.М., Саньков А.В., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Кале Э. Современные деформации земной коры в области сочленения сегментов рифтов центральной части Байкальской рифтовой системы по данным GPS-геодезии // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 11. С. 1814–1825.

2. Calais E., Freed A., Mattioli G., Amelung F., Jónsson S., Jansma P., Hong S.-H., Dixon T., Prépetit C., Momplaisir R. Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake // Nature Geoscience. 2010. V. 3. P. 794–799. doi: 10.1038/NGEO992.

3. DeMets C., Mattioli G., Jansma P., D.Rogers R., Tenorio C., L. Turner H. GPS-geodetic measurements from Honduras and Nicaragua Present motion and deformation of the Caribbean plate: Constraints from new // Geological Society of America Special Papers. 2007. V. 428. P. 21–36. doi: 10.1130/2007.2428(02).

4. Devi M., Barbara A. Total electron content and anomalous appearance of GPS-satellites as pointers to epicentre identification of major Japan earthquake of 2011 // Positioning. 2012. V. 3, № 1. P. 7–12. doi: 10.4236/pos.2012.31002.

5. Prawirodirdjo L., McCaffrey R., Chadwell D., Bock Y., Subarya C. Geodetic observations of an earthquake cycle at the Sumatra subduction zone: Role of interseismic strain segmentation // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115, B03414. doi:10.1029/2008JB006139.

6. Takahashi H. Static strain and stress changes in eastern Japan due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, as derived from GPS-data // Earth Planets Space. 2011. V. 63. P. 741–744.

7. Vigny C., Socquet A., Peyrat S., Ruegg J.-C., Métois M., Madariaga R., Morvan S., Lancieri M., Lacassin R., Campos J., Carrizo D., Bejar-Pizarro M.. The 2010 Mw 8.8 Maule Megathrust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS // Science. 2011. V. 332. P. 1417–1491. doi: 10.1126/science.1204132.

### A STUDY OF THE COSEISMIC DEFORMATION ASSOCIATED WITH THE KNOWN STRONG EARTHQUAKES

### O.F. Lukhneva, A.V. Lukhnev

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. Shown here is an example of processing the time series of GPS observations for expeditious research of coseismic deformations associated with the strongest earthquakes. An approach has been developed to study coseismic displacements during an earthquake for calculating amplitudes of displacements and to define patterns of coseismic deformations of the Earth's surface. Quantitative parameters and directions of coseismic displacement vectors have been obtained for the earthquakes with  $M_W \ge 7.0$  in Indonesia, Chile, Haiti, Japan, and Nepal. This is exemplified by the calculated amplitudes of coseismic deformations from the February 27, 2010  $M_W = 8.8$  Chili earthquake recorded at selected GPS stations. The displacement amplitudes were up to 2902.14 mm for CONZ, located about 92 km from the epicenter, and 53.22 mm for BUE2, located about 49 km from the epicenter. Curves have been plotted as relationships between the amplitudes and kinematics of displacements (or kinematic types of earthquakes), and between those and distances from GPS stations to earthquake epicenters.

Keywords: Global Positioning System, earthquake, coseismic deformation, amplitude

\*\*\*

УДК 528.481:551.24(517)

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПОСТОЯННЫХ GPS-ПУНКТАХ (МОНГОЛИЯ)

А.И. Мирошниченко<sup>1</sup>, А.В. Лухнев<sup>1</sup>, Ф.Л. Зуев<sup>1</sup>, В.А. Саньков<sup>1</sup>, Е. Баярсайхан<sup>2</sup>, Д. Эрдэнзул<sup>2</sup>, С. Дэмбэрэл<sup>2</sup>, М. Улзийбат<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт астрономии и геофизики АНМ, Улан-Батор, Монголия

Ключевые слова: GPS-измерение, перманентная станция, современная деформация

Байкало-Монгольский GPS-полигон был создан в 1997 г. в рамках сотрудничества между Исследовательским центром астрономии и геофизики Академии наук Монголии, Институтом земной коры СО РАН и национальным Центром научных исследований «Géosciences Azur», Франция. В настоящее время полигон включает более 50 полевых пунктов, установленных в районах Западной, Северной и Восточной Монголии и на территории Прибайкалья (рисунок). Основные результаты исследований, выполненных с использованием сети GPS-пунктов Байкало-Монгольского полигона. изложены в работах [1-3]. В рамках соглашения о российскомонгольском сотрудничестве с 2010 г. проводится расширение сети полигона. Установлено 29 новых полевых GPS-пунктов на трех геодинамических полигонах разного масштабного уровня в Центральной и Восточной Монголии.

С 2011 г. в Монголии произведена установка более двух десятков перманентных GPS-станций, большинство из которых расположены вблизи станций Национальной сейсмологической сети Монголии.

Наше исследование посвящено статистическому анализу временных рядов данных, полученных в результате измерений на некоторых постоянных станциях Монгольской сети, за интервал 2011–2015 гг. В результате исследований установлены особенности изменения параметров современных деформаций земной коры во времени для различных регионов Монголии.



Поле скоростей современных горизонтальных движений для территории Монголии по данным измерений методом GPS-геодезии за период с 1997 по 2015 г. Скорости полевых GPS-станций показаны: белым цветом – инсталлированных до 2010 г., черным – после 2010 г., серым – постоянные станции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. и др. Вращения и деформации в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. С. 785–793.

2. Calais E., Vergnolle M., San'kov V. et al. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): Implications for current kinematics of Asia // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N B10. P. 2501. doi:10.1029/2002 JB002373.

3. Demberel S., Miroshnichenko A., Loukhnev A. et al. GPS measurements in Ulaanbaatar and its vicinity // Abstracts of the XIX General Assembly of Asian Seismological Commission, Ulaanbaatar, Mongolia, 2012. 2012. P. 268–272.

### STATISTICAL ANALYSIS OF THE DATA FROM THE PERMANENT GPS SITES IN MONGOLIA

A.I. Miroshnichenko<sup>1</sup>, A.V. Lukhnev<sup>1</sup>, F.L. Zuev<sup>1</sup>, V.A. Sankov<sup>1</sup>, E. Bayarsaikhan<sup>2</sup>, D. Erdenzul<sup>2</sup>, S. Demberel<sup>2</sup>, M. Ulziibat<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Astronomy and Geophysics of Science Academy of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

*Abstract.* The measurements in the Baikal-Mongolian GPS network have been started since 1997 as a result of collaboration between the Research Center of Astronomy and Geophysics (Mongolian Academy of Sciences), the Institute of the Earth's Crust (the Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia), and the National Center of Research «Géosciences Azur» (France). At present, the network consists of more than 50 monitoring stations located in the western, northern and eastern Mongolia as well as in the southern Baikal region (Fig.1). The key results of the measurement-based research are given in [1–3]. The collaboration agreement between Russia and Mongolia involves the network expansion since 2010. Twenty-nine new GPS sites have been installed within the three different-scale geodynamic test areas in the central and eastern Mongolia. Since 2011, Mongolia has been an area of installation of more than 20 permanent sites, most of which are located near the stations of the National seismic network.

Our research deals with statistical analysis performed on the time-series data that were obtained at several permanent GPS sites during 2011–2015. As a result, some specific features of temporal variability of the recent crustal deformation parameters have been identified for different parts of Mongolia.

Keywords: GPS-measurement, permanent station, recent deformation

### \*\*\*

УДК 550.34.03+550.34.06.013.3+551.24+551.439

### ГЛОБАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

### А.В. Михеева<sup>1</sup>, И.И. Калинников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Аннотация. В работе показано применение геоинформационной программной системы изучения природных катастроф Земли GIS-ENDDB для выявления масштабных линеаментных (прямолинейных и кольцевых) структур Центральной Азии. При этом используются недавно реализованные алгоритмы построения глобальных линеаментов сейсмичности по большим кругам Земли, расчет распределения различных характеристик землетрясений, функции визуализации и трансформации различных геофизических полей. В результате формализованных построений выявлена центральноориентированная система линеаментов Центральной Азии с областью пересечения в Памиро-Гиндукушской сейсмофокальной зоне (ПГЗ). Последняя представляет собой особую геодинамическую область, к которой, по данным GIS-ENDDB, приурочены кольцевые линеаменты глубинной сейсмичности, λ-образная конфигурация глубинного распределения сейсмичности в разрезе, многокольцевая аномалия силы тяжести, аномалия повышенного теплового потока и, наконец, преобладание взбросового механизма землетрясений ПГЗ, что резко отличает характер подвижек этой зоны от области к северо-востоку от нее. Сделано предположение о космогенной природе образования этих структур. Допуская ударное образование радиальной системы разломов в наиболее «хрупком» верхнем слое земной коры, а также магматической камеры в мантии, контролирующей постимпактную тектоническую активность сейсмофокальной зоны и связанной с ней системы разломов, можно согласовать весь комплекс геоинформационных, геологических и геофизических материалов по этой зоне, дополняя существующие гипотезы ее образования. Ключевые слова: морфоструктурный элемент, линеамент сейсмичности, геофизическая аномалия, импактномагматический генезис

Геоинформационная система GIS-ENDDB, разрабатываемая для геофизиков [1], обеспечивает возможность. по выбору исследо-вателя, оперировать множеством характеристик сейсмогеодинамических Формалипроцессов. линеаментных зованный алгоритм построений физические опирается основополагающие на принципы разрушения среды причинноследственную обусловленность, проявляющуюся в хронологической последовательности пространственно взаимосвязанных событий, требование минимума потенциальной энергии поверхности разрыва И на статистическую обеспеченность линеамента событиями. Несмотря на то, что геофизическая среда не изотропна (имеет блочную и слоистую структуру), а поля напряжений неоднородны, конечные реализации действия всех физических законов на глобальном уровне должны тяготеть к линеаментам, т.е. геометрическим формам, обеспечивающим минимум поверхностной энергии.

В этом случае линеаменты отражают результат геологических процессов, частично охваченных инструментальными сейсми-ческими данными (имеющимися лишь за последний век), и, по мнению авторов, позволяют реконструировать долговременные геологические процессы в рамках единого механизма структурообразования.

В настоящее время в рамках GIS-ENDDB разработано два алгоритма выявления линейных структур, соответствующих активной (в заданный период времени) системе разломов. Первым алгоритмом [2], условно названным методом распознавания образов (PO), была выявлена система трансформных линеаментов по крупным землетрясениям Центральной Азии (на временном интервале 2250 лет) [3], которая показала, что линеамент – это не просто разрыв в монолите, а протяженная полосовая структура, близкая к дуге большого круга Земли, внутри которой мигрирует сейсмичность (рис. 1).

В связи с этим был предложен второй вариант линеаментных построений, который также предполагает работу фундаментальных законов физики в глобальных геодинамических процессах – упомянутого принципа наименьшего действия, предписывающего разрушение однородной среды по плоскостям, цилиндрическим и сферическим поверхностям (при линейном или точечном нагружении), в частности по сегментам большого круга (БК), если разрыв преодолевает слой Мохоровичича. Новый алгоритм (условно названный БК), имеет два задаваемых параметра: число точек в цепочке  $n_{\min}$  и максимальное расстояние между референтными событиями L.

Алгоритм предполагает наличие у эксперта навыка в задании выборки событий и значений управляющих параметра L (и связанного с ним параметра  $\Delta D = L/20$  – ширины выявляемой разломной зоны) с учетом многих осложняющих факторов. Например, варьируя  $h=(L/n_{\min})$ , можно построить различные варианты «Афро-Байкальского» БК, охватывающие новейшие землетрясения или соответствующие известным межплитным разломам (рис. 1). Полученные дуги БК подтверждают достоверность выделенной предыдущим алгоритмом (РО) системы глобальных линеаментов (ломаные линии), в частности наиболее протяженного «Афро-Байкальского» линеамента, соответствующего Внутриазиатскому горному поясу (рис. 1). Отметим, что на более масштабном уровне оба алгоритма выявляют также Альпийско-Гималайский сейсмический пояс.



Рис. 1. Структурные особенности ПГЗ по данным NEIC (1973–2015 гг.) и SIGN (-250–2008 гг): *a* – сейсмичность с глубиной  $H \ge 50$  км (NEIC) на фоне карты локальной составляющей аномалий силы тяжести (в МГал, *R*=40 км). Белым овалом (а) и звездочкой (б) отмечена область глубокофокусной сейсмичности ПГЗ ( $H \ge 200$  км);  $\delta$  – многокольцевая гравитационная аномалия ПГЗ, искаженная коллизией (направление которой показано стрелкой); *в* – разрез по профилю AB (а) (NEIC:  $H \ge 40$  км); *г* – разрез суммарной сейсмической энергии очаговой зоны Ключевской группы вулканов (локальный каталог ГС РАН:  $H_{MAX}$ =500 км, проведена граница субдукции, выявленная по данным NEIC:  $M \ge 4$ );  $\delta$  – разрез сейсмичности в зоне пересечения Филиппинской, Охотоморской, Тихоокеанской и Евроазиатской плит (JMA:  $H_{MAX}$ =700 км, до 1990 г.) по [4] (границы плит – жирные линии).

При рассмотрении средствами GIS-ENDDB зоны пересечения выявленных линеаментов (рис. 1) – Памиро-Гиндукушской сейсмофокальной зоны (ПГЗ) – прежде всего отмечено структурное сходство ее кольцевой гравитационной аномалии (рис. 1,  $a-\delta$ ) с наблюденными над некоторыми достоверно установленными импактными структурами [1].

Лучевая форма сочленения сейсмических линеаментов в области ПГЗ (см. рис. 1) и λ-образная конфигурация глубинного распределения сейсмичности (в разрезе) (рис. 1, e) схожи с картиной, наблюдаемой в точке сочленения четырех плит в зоне Западно-Тихоокеанской субдукции (рис. 1, d), где отмечается существование «сейсмического гвоздя» [4]. Похожая конфигурация сейсмичности и смещение глубинной части очага наблюдаются и в разрезе очаговой зоны Ключевской группы вулканов (рис. 1, e).



Рис. 2. Система линеаментов Аравийская плита – Байкальская рифтовая зона – Гималаи: каталог SIGN –250–2008 гг: жирной ломаной линией выделен «Афро-Байкальский» линеамент [3], толстыми дуговыми линиями показаны линеаменты БК, построенные с параметрами:  $(L, n_{min})=(34000 \text{ км}, 19); M \ge 7.2; 15 \le H \le 80 \text{ км};$  тонкой дуговой линией – «осевые» линеаменты более локального уровня:  $(L, n_{min})=(1000 \text{ км}, 14); M \ge 6.5; H \le 100 \text{ км}$ . Во врезке: схема границ плит и микроплит (I-V – крупные плиты, I-20 – мелкие плиты, сплошные и точечные линии – по представлениям разных авторов).

Учитывая эти и ряд других наблюдений авторов [1] (в частности, шлейфообразную форму простирания сейсмичности ПГЗ в плане, рис. 2), а также привлекая кометно-галактическую гипотезу А.А. Баренбаума [5], можно интерпретировать ассоциируемые с «сейсмическими гвоздями» региональные суперлинеаменты сейсмичности как производные космогенного удара, представляющие собой структуру «битой тарелки» (по терминологии «ударновзрывной тектоники» [6]), которые активизируются впоследствии как глубинной активностью очага, расплавленного энергией кометы, так и другими геологическими процессами, описанными в рамках тектоники плит.

Таким образом, формализованные линеаментные построения, опирающиеся на фундаментальные физические законы, и сравнительный анализ структурных особенностей различных регионов (наряду с привлечением геодинамики нетривиальных гипотез [5-8])позволяют сложных согласовать комплекс геоинформационных И геолого-геофизических геотектонического материалов спорного образования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Михеева А.В. Геоструктурные элементы, выявляемые математическими алгоритмами и цифровыми моделями геоинформационно-вычислительной системы GIS-ENDDB. Новосибирск: Омега Принт, 2016. 300 с.

2. Дядьков П.Г., Михеева А.В. Методы выявления пространственного группирования землетрясений в сейсмогеодинамическом исследовании районов Центральной Азии // Математические методы распознавания образов: 15-я всероссийская конференция (Петрозаводск, 11–17 сентября 2011 г.): сб. докл. М.: МАКС Пресс, 2011. С. 560–563.

3. Kalinnikov I.I., Mikheeva A.V. The GIS-EEDB computing system, lineaments and a problem of earthquake prediction // Computing Center Bulletin. Series Math. Model. in Geoph. 2015. № 17. P. 17–34.

4. Владковский В.Н. Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений – сейсмические "гвозди" // Вестник ОНЗ РАН. 2012. № 4. NZ1001.

5. Баренбаум А.А. Галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии М.: Изд. Дом «ЛИБКОРОМ», 2010. 544 с.

6. Зейлик Б.С. Ударно-взрывная тектоника и краткий очерк тектоники плит. Алма-Ата: Гылым, 1991. 120 с.

7. Опарин В.Н. и др. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 278 с.

8. Гвишиани А.Д., Горшков А.И. О связи эндогенного оруденения с результатами распознавания сейсмоопасных пересечений линеаментов // Доклады академии наук СССР. 1989. Т. 307, № 2. С. 328–332.

### GLOBAL SEISMIC STRUCTURES IN CENTRAL ASIA

### A.V. Mikheeva<sup>1</sup>, I.I. Kalinnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The paper shows the application of geographic information system software GIS-ENDDB for studying natural disasters of the Earth to identify large-scale lineament (linear and circular) structures in Central Asia. This involves using new algorithms for constructing global seismic lineament along the great circles of the Earth, calculation of the distribution of different seismic characteristics, and functions for visualization and transformation of various geophysical fields. The formal constructions provided a basis for identifying a centrally-oriented system of lineaments in Central Asia intersecting in the Pamir-Hindu Kush seismic zone (PHZ). The latter is a specific geodynamic area, which, according to the GIS-ENDDB data, is characterized by ring lineaments of deep seismicity,  $\lambda$  -shaped configuration of deep seismicity distribution in the cross-section, multi-ring gravity anomaly, anomaly of high heat flow and, finally, predominance of reverse faulting, differentiating clearly the character of movements in the PHZ from that to the northeast of it. The above-mentioned phenomena are assumed to have cosmogenic origin. The assumable impact-related radial fault system in the most fragile layer at the top of the Earth's crust and magma chamber in the mantle, which controls post-impact tectonic activity of the seismic focal zone and related fault system, allow the correlation between geo-information, geological and geophysical datasets on this area, extending the existing hypotheses of its formation. *Keywords:* morphostructural element, seismic lineament, geophysical anomaly, impact-magmatic genesis

\*\*\*

УДК 550.34.05.013.4+550.344.094.5(571.53/.55)

### ГЛУБИННАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ СИБИРСКОГО КРАТОНА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОКРУЖАЮЩИХ СТРУКТУР

В.В. Мордвинова<sup>1</sup>, А.В. Треусов<sup>2</sup>, М.М. Кобелев<sup>1</sup>, М.А. Хритова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Аннотация. Телесейсмической томографией по данным продольных и поверхностных волн выявлены особенности скоростного строения юго-восточной окраины Сибирского кратона вдоль международного профиля PASSCAL\_1992. Плотный древний кратон проявляется на моделях областями повышенной сейсмической скорости. Вертикальная конфигурация юго-восточной границы кратона определяется на Р-томографии по форме линии контакта скоростных аномалий противоположного знака. Согласно моделям, к юго-востоку от границы Сибирской платформы с Байкальской складчатой областью мощность кратона резко уменьшается от 270 до 150 км. Утоненный край кратона имеет форму клина, верхняя кромка которого составляет с дневной поверхностью угол около 45°, а нижняя – более пологая. Кратон полностью выклинивается на глубине около 150 км под хребтами Хамар-Дабан восточнее озера Байкал. Таким образом, коллизионные протерозойские структуры, представляющие собой систему террейнов и островных дуг, и кайнозойская Южно-Байкальская впадина находятся над наклонным клинообразным краем кратона. Тепловые и флюидные ловушки примыкают к Сибирскому кратону на различных глубинах. Они обусловлены влиянием внешней формы кратона на тепловую конвекцию земных недр. Такой каскад ловушек может быть генератором вещественных и структурных перикратонных изменений, в том числе Байкальского рифтогенеза.

*Ключевые слова:* телесейсмическая томография, продольная приемная функция, сейсмический скоростной разрез, вертикальная конфигурация юго-восточной границы Сибирского кратона, кайнозойский Байкальский рифтогенез

Выявление роли и перспектив взаимодействия Сибирского кратона с соседними юго-восточными структурами требует более точных сведений о глубинном строении контактирующих тектонических областей и о конфигурации вертикальных границ кратона. Их получение до сих пор затруднено ограниченностью сейсмологических наблюдений, необходимых для одновременного исследования строения земной коры и верхней мантии региона. Согласно результатам глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) [1-3], центральная часть низкоскоростной верхнемантийной зоны (V<sub>P</sub>=7.5-7.9 км/с, V<sub>S</sub>=4.3±0.1 км/с) соответствует минимальной мощности коры под Байкальской впадиной и представляется в виде утолщенного под рифтом гриба с почти вертикальным ограничением со стороны Сибирской платформы и плавным выклиниванием в юговосточном направлении. Однако в таком представлении области аномальной мантии не было большой уверенности ввиду малой детальности исследований. На участках с большей плотностью ГСЗ, в зонах пониженных скоростей, выявлены включения с «нормальной» скоростью, а в обрамляющем аномальную область поле «нормальных» скоростей найдены включения пониженных скоростей. Позже независимыми исследованиями [4, 5] было показано отсутствие утонения коры и понижения сейсмических скоростей под Южной и Центральной Байкальскими впадинами, что скорее всего также свидетельствует о неоднородности поля скоростей [6, 7]. Что касается глубинных исследований ГСЗ по мирным ядерным взрывам, то, к сожалению, близость Байкала к юго-восточному концу линии взрывов на профиле «Рифт» [8] не позволила прозондировать мантийную структуру под озером.

В данном сообщении представлены результаты томографии земной коры и верхней мантии, для которой в качестве источников колебаний служат сильные далекие землетрясения. Благодаря субвертикальным сейсмическим лучам удаленных на тысячи километров источников, горизонтальное разрешение методов, использующих объемные волны, зависит в основном от плотности сейсмостанций. Совместный анализ построенных независимо друг от друга скоростных разрезов вдоль профиля PASSCAL\_1992 [9–12] позволяет получить более определенное представление о вертикальной конфигурации окраины Сибирского кратона, во многом влияющей на формирование и состояние Саяно-Байкальского региона. Для взаимной верификации модели представлены в едином масштабе, без смещения структур относительно друг друга (рисунок).

Линия сейсмостанций PASSCAL\_1992 проходит через юго-восточную окраину Сибирской платформы, Южно-Байкальскую впадину, Хэнтей и Гоби-Алтай. По невязкам времен пробега Р-волн при сравнительно небольшом расстоянии между станциями трансекта получены довольно детальные модели A, E и B до глубины 250 и 400 км. Плотный древний кратон проявляется на моделях областями повышенной сейсмической скорости, отрицательные аномалии свидетельствуют о более молодых структурах и об активности мантии. Таким образом, вертикальная конфигурация юго-восточной границы кратона определяется на Р-томографии по форме линии контакта скоростных аномалий противоположного знака.

Томографические инверсии А и Б выполнены до глубины 250 км, что явно недостаточно для того, чтобы оценить максимальную толщину кратона на данном сечении. Томографический образ Б получен инверсией центрированных вдоль профиля невязок времен пробега Р-волн по программе А. Треусова [10]. По тем же центрированным невязкам мы выполнили инверсию до глубины 400 км (В), изменив параметризацию модели [11]: добавлены ряды элементарных прямоугольников в нижнюю часть модели и уменьшено (для получения устойчивого решения системы алгебраических уравнений) количество элементарных прямоугольников в верхней части модели (тем самым увеличена их площадь, что делает модель менее детальной). Результат инверсии В свидетельствует о том, что мощность кратона в исследуемом сечении достигает 270 км. Подкоровая высокоскоростная аномалия, характеризующая кратон, определяется и по поверхностным волнам (модель  $\Gamma$ ), но ее максимальная глубина немного меньше [12].

Рисунок демонстрирует большое сходство результатов различных методов. Все четыре модели в основных чертах согласуются в определении конфигурации контакта верхней части высокоскоростного Сибирского кратона со смежной низкоскоростной юго-восточной областью. Надежность определения глубинной формы юго-восточного краевого выступа Сибирского кратона подтверждается также более детальной V<sub>S</sub>-моделью до глубины 80 км, построенной методом продольной приемной функции вдоль того же трансекта [6, 11 (рис. 8)].



Выявление конфигурации юго-восточной окраины Сибирского кратона томографическими методами вдоль сейсмологического профиля PASSCAL\_1992. А – Р-томография по Байкальскому участку профиля [9]; Б – Р-томография до глубины 250 км [10]; В – Р-томография до глубины 400 км [11]; Г – поверхностно-волновая томография [12]. Пояснения в тексте.

На основании комплекса представленных моделей можно сделать вывод, что к юго-востоку от границы Сибирской платформы с Байкальской складчатой областью мощность Сибирского кратона резко уменьшается от 270 до 150 км. Утоненный край кратона имеет форму клина, верхняя кромка которого составляет с дневной поверхностью угол около 45°, а нижняя более пологая. Кратон окончательно выклинивается на глубине около 150 км под хребтами Хамар-Дабан восточнее озера Байкал. Таким образом, коллизионные протерозойские структуры, представляющие собой систему террейнов и островных дуг, и кайнозойская Южно-Байкальская впадина находятся над наклонным клинообразным краем кратона. Каскад флюидно-тепловых ловушек, примыкающих на различных глубинах к Сибирскому кратону (рисунок), обусловлен влиянием внешней формы кратона на тепловую конвекцию земных недр и может быть генератором перикратонных вещественных и структурных изменений.

Тонкий наклонный юго-восточный край Сибирского кратона и максимально флюидизированная под ним астеносфера, по-видимому, являются существенными составляющими сложного механизма формирования кайнозойской Байкальской впадины и поднятия массива Хамар-Дабан. Безусловно, один трансект PASSCAL\_1992 (Братск-Листвянка-Улан-Батор), проходящий через южное окончание озера Байкал, не позволяет судить определенно о геодинамике всего Байкальского рифта. Но, как отмечается во многих работах, например в [13, 14], параллельное расположение основных тектонических структур в Забайкалье позволяет в какой-то степени предполагать подобие глубинного строения для значительной части Байкальской впадины и Забайкалья в направлении югозапад-северо-восток [7].

В таком случае на базе выверенных данных о глубинном строении по профилю PASSCAL\_1992 и MOBAL\_2003 появляется возможность уточнить решения некоторых геологических и геодинамических задач. В частности, есть достаточное основание заменить плюмовую концепцию Байкальского рифтогенеза, порожденную ранее невозможностью применения адекватных математических методов исследования глубинного строения к прежним бедным данным несовершенной сейсмической сети, на концепцию ведущей роли влияния массивной литосферы Сибирского кратона, окраины которого имеют сложную конфигурацию. Возможное существование тепловых, флюидных ловушек, образующихся на неровностях под литосферой – это не новая идея [15, 16]. Но прежде на юге Сибири она не была наглядно подтверждена глубинными исследованиями. При современном юго-восточном мантийном течении, выявленном сейсмическими и геодезическими методами, ловушка в интервале глубин 150-250 м может способствовать тем деструктивным процессам в верхах мантии и земной коре, которые приводят к растяжению Байкальской впадины.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пузырев Н.Н., Мандельбаум М.М., Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Крупская Г.В., Петрик Г.В. Глубинное строение Байкальского рифта по данным взрывной сейсмологии // Геология и геофизика. 1974. № 5. С. 155–167.

2. Недра Байкала по сейсмическим данным / Ред. Н.Н. Пузырев. Новосибирск: Наука, 1981. 173 с.

3. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р- и S-волнах / Ред. Н.Н. Пузырев. Новосибирск: Наука, 1993. 199 с.

4. Ten Brink U.S., Taylor M.H. Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting // Journal of Geophysical Research. 2002. V. 107 (B7), ETG 2-1–ETG 2-15. http://dx.doi.org/10.1029/2001JB000300.

5. Nielsen C., Thybo H. Lower crustal intrusions beneath the southern Baikal Rift Zone: Evidence from full-waveform modelling of wide-angle seismic data // Tectonophysics. 2009. V. 470. P. 298–318.

6. Mordvinova V.V., Artemyev A.A. The three-dimensional shear velocity structure of lithosphere in the southern Baikal rift system and its surroundings // Russian Geology and Geophysics. 2010. T. 51, № 6. C. 694–707. http://dx.doi.org/ 10.1016/j.rgg.2010.05.010.

7. Ананьин Л.В., Мордвинова В.В. Строение земной коры и верхов мантии вдоль Байкальской рифтовой системы по телесейсмическим данным // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444, № 4. С. 440–443.

8. Суворов В.Д., Мишенькина З.Р., Мельник Е.А. Сейсмические верхнемантийные корни структур фундамента Сибирской платформы по профилю Рифт // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 8. С. 1134–1150.

9. Burkholder P.D., Meyer R.P., Delitsin L.L., Davis P.M., Zorin Yu.A. A teleseismic tomography image of the upper mantle beneath the southern Baikal rift zone // Proceeding to IUGG XXI General Assembly. Boulder, 1995. P. 400.

10. Mordvinova V.V., Vinnik L.P., Kosarev G.L., Oreshin S.I., Treusov A.V. Teleseismic tomography of the Baikal rift lithosphere // Doklady Earth Sciences. 2000. T. 372 (4). C. 716–720.

11. Мордвинова В.В., Кобелев М.М., Треусов А.В. и др. Глубинное строение переходной зоны Сибирская платформа – Центрально-Азиатский подвижный пояс по телесейсмическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7, № 1. С. 85–103. doi:10.5800/GT-2016-7-1-0198.

12. Кожевников В.М., Яновская Т.Б. Распределение скоростей волн S в литосфере Азиатского континента по данным поверхностных волн Рэлея // Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Ред. К.Г. Леви, С.И. Шерман. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 46–64.

13. Zorin Yu.A., Turutanov E.Kh., Mordvinova V.V., Kozhevnikov V.M., Yanovskaya T.B., Treussov A.V. The Baikal rift zone: the effect of mantle plumes on older structure // Tectonophysics. 2003. V. 371 (1–4). P. 153–173. http://dx.doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00214-2.

14. Mazukabzov A.M., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Paderin I.P. The Late Paleozoic geodynamics of the West Transbaikalian segment of the Central Asian fold belt // Russian Geology and Geophysics. 2010. V. 51 (5). P. 482–491. http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2010.04.008.

15. Артюшков Е.В. Геодинамика М.: Наука, 1979. 327 с.

16. Тычков С.А. Глубинная геодинамика внутриконтинентальных областей (на примере Центральной Азии): Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск: Ин-т геологии СО РАН, 1998. 46 с.

### DEEP CONFIGURATION OF THE SOUTHEAST MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON AND ITS INFLUENCE ON THE FORMATION OF ADJACENT STRUCTURES

V.V. Mordvinova<sup>1</sup>, A.V. Treussov<sup>2</sup>, M.M. Kobelev<sup>1</sup>, M.A. Khritova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Shmidt Institute of Physics of the Earth, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Abstract.* The velocity structure features of the southeast margin of the Siberian craton have been identified from the P-wave and surface wave data using teleseismic tomography along profile PASSCAL\_1992. The model-based ancient consolidated craton is characterized by high seismic velocity zones. The vertical configuration of the southeastern boundary of the Siberian craton has been revealed through P-wave tomography from the shape of the contact line between velocity anomalies showing opposite signs. The models imply that the craton thins abruptly from 270 km thickness to 150 km, to the southeast of the Siberian platform border with the Baikal folded area. The thin edge of the craton is wedge-shaped, with the top of the wedge inclined at an angle of
45° to the daily surface and the more gently sloped bottom. The Siberian craton pinches out entirely at a depth of about 150 km beneath the Khamar-Daban to the east of Lake Baikal. Thus, the Proterozoic collisional structures forming a system of island arcs and terranes and the Cenozoic South Baikal basin are located beneath an inclined wedge-shaped edge of the craton. Thermal and fluid traps are adjacent to the Siberian craton at different depths. They are related to the influence of the external shape of the craton on the thermal convection of the Earth's interior. Such a cascade of traps can be a generator of material and structural changes in the pericratonic setting, as well as in the Baikal rifting.

*Keywords:* teleseismic tomography, P-wave receiver function, seismic velocity section, vertical configuration of southeast margin of the Siberian craton, Cenozoic Baikal rifting

\*\*\*

УДК 550.837

## ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИТОСФЕРЫ ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ

Ю.Ф. Мороз, Л.И. Гонтовая

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация. По данным сейсмотомографии и глубинного магнитотеллурического зондирования рассмотрены основные особенности в распределении скоростных и геоэлектрических неоднородностей в земной коре и верхней мантии Восточной Камчатки. Геоэлектрическая модель содержит коровый проводящий слой, вытянутый вдоль средней части Камчатки. В литосфере Восточной Камчатки выделены поперечные проводящие зоны шириной до 50 км, имеющие продолжение в сторону Тихого океана. К поперечным зонам приурочены крупные центры современного вулканизма. Верхняя мантия содержит астеносферный проводящий слой, вытянутый вдоль Камчатки, образующий поднятия под современным вулканическим поясом. Приведены вертикальные сечения объемной скоростной модели по P- и S-волнам вдоль Восточной Камчатки и широтные — в районах Ключевской и Авачинской групп вулканов. Отмечена взаимная корреляция аномалий пониженной сейсмической скорости  $V_P$  и  $V_S$  с аномалиями повышенной электропроводности. Обсуждается возможная природа соответствия выявленных аномалий и их возможная связь с расслоенностью литосферы, наличием флюидов и магматических расплавов, питающих активные вулканы.

*Ключевые слова:* магнитотеллурическое зондирование, сейсмическая томография, сейсмическая и геоэлектрическая неоднородность, астеносферный слой, магматический расплав

В последние годы на Камчатке выполнен большой объем исследований методами МТЗ и сейсмической томографии с использованием современных подходов и методик. Результаты интерпретации показали, что в земной коре и верхней мантии существуют скоростные и геоэлектрические неоднородности. В связи с получением новой информации возникла необходимость обобщения и комплексного анализа данных МТЗ и сейсмотомографии с целью определения возможной природы аномалий повышенной электропроводности и сейсмической скорости, а также их связи с зонами магматического питания вулканов. Большой интерес представляют районы Ключевской и Авачинской групп вулканов, которым уделено основное внимание в настоящей статье.

По данным МТЗ выполнено районирование Камчатки на области с различной глубинной электропроводностью [1, 2]. В земной коре и верхней мантии выявлены слои повышенной электропроводности (рис. 1). В западной части Камчатки на кривых МТЗ коровый слой не проявился. Если он здесь и существует, то по своей проводимости соизмерим с проводимостью осадочно-вулканогенного чехла. В центральной части полуострова выделяется область шириной около 200 км, протяженностью 1200 км, в которой коровый слой проявился как на поперечных, так и на продольных кривых. Он расположен на глубине 15-35 км и имеет удельное электрическое сопротивление первые десятки Ом.м. В средней части области выделяется зона, в которой коровый слой приближен к дневной поверхности до глубины 15-20 км и характеризуется увеличенной проводимостью. Данная зона приурочена к КамчатскоКорякскому антиклинорию с наложенным вулканическим поясом, в основании которого предполагается Центрально-Камчатский глубинный разлом. В восточной части полуострова выделяется область, в которой коровый слой проявляется только на поперечных кривых. Показано, что здесь земная кора содержит поперечные проводящие зоны шириной до 50 км, имеющие продолжение в Тихий океан. К таким зонам приурочены крупные области современного вулканизма.



Рис. 1. Схема расположения профилей глубинных разрезов объемной модели. *1* – профили; 2 – вулканы; *3* – действующие вулканы; *4* – ось глубоководного желоба.

По продольным кривым МТЗ выделяется астеносферный проводящий слой, кровля которого с глубины 150 км на Западной Камчатке поднимается до глубины 70–80 км под зоной современного вулканизма и опускается в сторону восточного побережья полуострова до глубины примерно 120 км. Удельное электрическое сопротивление слоя оценивается в 5–10 Ом·м (рис. 2).

Таким образом, в результате анализа продольных и поперечных кривых МТЗ мы приходим к модели, в которой крупные центры современного вулканизма Восточной Камчатки приурочены к поперечным проводящим зонам в земной коре и к поднятию астеносферного выступа, вытянутого вдоль пва.

На Камчатке в 70–90 гг. прошлого столетия с использованием взрывной сейсмологии были получены сведения о строении земной коры в районах Авачинского и Ключевского вулканов [3, 4]. В настоящее время наиболее информативные данные о глубинной структуре Земли получены методом сейсмической томографии.

В основу нашего анализа положена сейсмотомографическая модель, разработанная коллективом ученых ИВиС ДВО РАН, ИДГ РАН и Университета г. Цюриха (Швейцария). Результаты моделирования частично (в основном касающиеся технологии моделирования и данных по Р-волнам) опубликованы в работах [5, 6]. Скоростная модель построена на основе времен пробега волн от региональных камчатских землетрясений, которые были зарегистрированы камчатской сетью из 37 станций за период 1971-2006 г. Данные взяты из регионального каталога, разработанного в Камчатском филиале Геофизической службы РАН. Отбор данных из каталога выполнялся таким образом, что все отобранные события удовлетворяли примерно одним и тем же критериям качества. В таком случае рассчитанная исходная скоростная модель совместно со станционными поправками дает минимальное среднее значение среднеквадратичной ошибки времени пробега для всех землетрясений, используемых в расчетах. Исходя из особенностей камчатской сети станций и геометрии гипоцентрии региональных землетрясений, 3D скоростная модель литосферы, с разной степенью разрешенности, получена лишь для Восточной Камчатки до глубин 150-200 км.

Рассмотрим особенности скоростных изображений вдоль вертикальных сечений объемной модели (см. рис.1). Профиль CD пересекает Ключевскую группу вулканов (КГВ) и выходит в Камчатский залив. Он ориентирован примерно в направлении структур Императорских гор и разлома. На разрезе выражены аномалии V<sub>S</sub> положительного и отрицательного знака в земной коре и верхней мантии (см. рис. 2). Низкоскоростная коровая аномалия проявляется в районе КГВ. Верхнемантийная аномалия пониженной скорости расположена над сейсмофокальной зоной (СФЗ). На разрезе показаны слои повышенной электропроводности на глубине 15-35 км и 80-120 км. В районе КГВ коровая аномалия повышенной электропроводности приближена к дневной поверхности до глубины около 15 км. Эта аномалия в общих чертах соответствует аномалии  $V_{\rm S}$ , что может быть связано с наличием в земной коре жидкой фазы (магматических расплавов и гидротермальных растворов). Отметим, что в верхней коре под КГВ зафиксирована аномалия повышенной сейсмической скорости обоих типов, которая находит подтверждение в данных электропроводности осадочно-вулканогенного чехла [2], поле силы тяжести и данных КМПВ [3]. Природа аномалии, повидимому, обусловлена насыщенностью разреза магматическими породами. В левой части разреза, которая относится к Центрально-Камчатскому прогибу, в верхней коре хорошо выражена аномалия пониженной скорости, которая, вероятно, связана с мощной низкоскоростной толщей. Не исключено, что в основании прогиба заложен глубинный разлом, выраженный в скоростном поле до глубины средней части коры. Восточнее КГВ зафиксирована интенсивная аномалия пониженной скорости, которая имеет продолжение в верхнюю мантию (см. рис. 1). Можно предположить, что аномалия отображает проницаемую зону, по которой глубинные флюидрасплавы поднимаются в верхнюю часть литосферы, где формируются магматические очаги, питающие КГВ. Большой интерес представляет проводящий слой в верхней мантии. Он с глубины 120 км на западе поднимается до глубины 70-80 км под КГВ. Слой располагается над СФЗ в мантийном клине и согласуется с зоной пониженной скорости V<sub>S</sub>, что можно связать с частичным плавлением ультраосновных пород при температуре более 1200 °С.



Рис. 2. Скоростные аномалии продольных (слева) и поперечных (справа) волн и глубинные проводящие зоны в земной коре и верхней мантии вдоль поперечного сечения через район Ключевской группы вулканов. 1 – интенсивность аномалий скорости; 2 – гипоцентры землетрясений; 3 – вулканы; 4 – проводящие зоны; 5 – аномалии повышенной электропроводности.



Рис. 3. Скоростные аномалии и глубинные проводящие зоны в земной коре и верхней мантии вдоль поперечного сечения через район Авачинской группы вулканов. Условные обозначения на рис. 2.

Обратимся к поперечному профилю EF, пересекающему Авачинскую группу вулканов (АГВ) и выходящему в Авачинский залив (рис. 3). Земная кора здесь содержит аномалию пониженной скорости в интервале глубин 15-50 км. В общих чертах она согласуется с аномалией повышенной электропроводности. Природу выявленных аномалий, так же как и в районе КГВ, можно увязать с повышенной проницаемостью коры, ее расслоенностью и, возможно, насыщенностью жидкими флюидами. Характерно то, что над СФЗ в верхней мантии выделяются аномалии пониженной скорости, которые могут быть обусловлены магматическими расплавами. В пользу этого свидетельствует проводящий слой верхней мантии, к которому приурочены скоростные аномалии. Общее представление по распределению скоростных неоднородностей в литосфере Восточной Камчатки дает сейсмотомографический разрез АВ, ориентированный вдоль Восточной Камчатки. На разрезе проявились аномалии повышенной и пониженной скорости  $V_{\rm P}$  и  $V_{\rm S}$ , которые отражают латеральную расслоенность, включающую земную кору, жесткую часть верхней мантии, астеносферный слой в интервале глубин ~70–100 км и высокоскоростной слой, к которому приурочена СФЗ. В аномалиях  $V_{\rm S}$  астеносферный слой на этих глубинах выражен до широты Кроноцкого полуострова. Вдоль разреза выявлены субвертикальные зоны пониженных скоростей под активными вулканами. Астеносферная низкоростная зона находит отражение в поведении верхнемантийного проводящего слоя.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–05–00059) и Дальневосточного отделения РАН (проект № ДВО-15–1–2–008).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Глубинные проводящие зоны в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Физика Земли. 2006. № 6. С.60–68.

2. Мороз Ю.Ф., Лагута Н.А., Мороз Т.А. Магнитотеллурическое зондирование Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 83–93

3. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев В.А. и др. Результаты сейсмических наблюдений земной коры в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С. 3–18.

4. Гонтовая Л.И., Левина В.И., Санина И.А. и др. Скоростные неоднородности литосферы под Камчаткой // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 56–64.

5. Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В. Структура верхней мантии зоны перехода океан-континент в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 13–29.

6. Nizkous I., Kissling E., Gontovaya L. et. al. Correlation of Kamchatka lithosphere velocity anomalies with subduction processes // Volcanism and subduction. The Kamchatka region geophysical monograph series. 2007. V. 172. P. 97–106.

#### GEOPHYSICAL MODEL OF THE LITHOSPHERE OF EASTERN KAMCHATKA

#### Yu.F. Moroz, L.I. Gontovaya

Institute of Volcanology and Seismology, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

*Abstract.* Using the deep magnetotelluric sounding (MTS) and seismic tomography data as a base, consideration is being to the key features of the distribution of velocity and geoelectric heterogeneities in the crust and upper mantle of the Eastern Kamchatka. The geoelectric modeling involves the crustal conducting layer extending along the middle part of Kamchatka. The lithosphere of the Eastern Kamchastka exhibits transverse conductive zones about 50 km wide extending towards the Pacific Ocean. The transverse zones are confined to large sources of current volcanic activuty. The upper mantle of Kamchatka contains the asthenospheric conducting layer extending along Kamchatka and forming uplifts beneath the present-day volcanic belt. The 3-D  $V_P/V_S$  model displays vertical sections along the Eastern Kamchatka and longitudinal sections near the Klyuchevskay and Avachinskaya volcanic groups. The cross-correlation has been found between low  $V_P$  and  $V_S$  anomalies and high-conductivity anomalies. The paper discusses the probable nature of correspondence between the identified anomalies and their probable relationship with the lithosphere stratification and the presence of fluids and magmatic melts feeding active volcanoes. *Keywords:* magnetotelluric sounding, seismic tomography, velocity and geoelectric heterogeneity, asthenospheric layer, magmatic melts

\*\*\*

УДК 528.45

## ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНЕГОДОВЫХ СКОРОСТЕЙ СМЕЩЕНИЙ ГНСС-ПУНКТОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ, ИНИЦИИРОВАННЫЕ ГЛУБОКОФОКУСНЫМ ОХОТОМОРСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 24.05.2013 Г., M<sub>w</sub>=8.3

Г.В. Нечаев<sup>1,2</sup>, Н.В. Шестаков<sup>1,2</sup>, Н.Н. Титков<sup>3</sup>, Д.В. Сысоев<sup>1,2</sup>, М.Д. Герасименко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

<sup>2</sup> Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Россия

<sup>3</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Ключевые слова: Дальний Восток, Охотоморское землетрясение, современные движения, ГНСС-сеть

Глубокофокусное Охотоморское землетрясение, сильнейшее за всю историю инструментальных сейсмологических наблюдений (M<sub>W</sub>=8.3), произошло 24 мая 2013 г. в 05:45 UTC в Охотском море вблизи западного побережья полуострова Камчатка. Гипоцентр землетрясения по сейсмологическим данным располагался на глубине 609-630 км вблизи нижнего края северо-западной части погружающейся Тихоокеанской литосферной плиты, являющейся частью Курило-Южно-Камчатской сейсмофокальной зоны. Событие вызвало косейсмические смещения земной поверхности во всем Охотоморском регионе и на Камчатском полуострове с величиной до 15 мм по горизонтали, а также вертикальные движения примерно такой же максимальной амплитуды (опускание на полуострове Камчатка и поднятие Северного Сахалина и западного побережья Охотского моря).

Обработка данных непрерывно действующих ГНСС-сетей Камчатки, Сахалина, юга Хабаровского края и западного побережья Охотского моря показала изменение скорости и направления движения в их пределах, начавшееся непосредственно после Охотоморского землетрясения и продолжающееся до настоящего времени. Зарегистрированные изменения координатных рядов носят линейный характер, за исключением ряда ближайшего к эпицентру пункта АРСН (Апачи, п-в Камчатка), который демонстрирует характерное для постсейсмического периода нелинейное смещение станции в западном направлении. Необходимо отметить, что для глубокофокусных землетрясений данные постсейсмические эффекты, по-видимому, обнаружены впервые.

Наиболее вероятной причиной обнаруженного изменения среднегодовых скоростей современных движений земной коры на территории Дальневосточного региона представляется развитие постсейсмических процессов в верхней мантии (вязкоупругая релаксация), инициированных главным толчком Охотоморского землетрясения.

#### MEASUREMENTS OF THE AVERAGE ANNUAL RATES OF DISPLACEMENTS AT GNSS-SITES IN THE FAR EAST, RUSSIA, INITIATED BY THE MW 8.3 MAY 24, 2013 DEEP-FOCUS OXOTOMORSK EARTHQUAKE

G.V. Nechaev<sup>1, 2</sup>, N.V. Shestakov<sup>1, 2</sup>, N.N. Titkov<sup>3</sup>, D.V. Sysoev<sup>1, 2</sup>, M.D. Gerasimenko<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Far East Federal University, Vladivostok, Russia

<sup>2</sup> Institute of Applied Mathematics, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

<sup>3</sup> Kamchatka Branch of Geophysical Survey, the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

*Abstract.* The deep-focus Okhotomorsk earthquake, largest in the history of instrumental seismological observations ( $M_W$ =8.3), occurred on May 24, 2013 at 05:45 UTC in the Sea of Okhotsk near the western coast of the Kamchatka Peninsula. According to the seismological data, the earthquake hypocenter was located at a depth of 609–630 km near the lower boundary of the northwestern subsiding Pacific lithospheric plate, which is a part of the Kuril-South Kamchatka seismofocal zone. The event caused coseismic horizontal surface displacements amounting to 15 mm throughout the Okhotomorsk region and on the Kamchatka Peninsula and vertical motions of nearly the same maximal amplitude (subsidence on the Kamchatka Peninsula and uplift of the North Sakhalin and western coast of the Sea of Okhotsk). The processing of the data from permanently operating GNSS-stations of Kamchatka, Sakhalin, southern Khabarovsk Territory and western coast of the Sea of Okhotsk has shown the change in rate and direction of motion therein, which began immediately after the Okhotomorsk earthquake and has continued up until now. Recorded changes of the coordinates show linear character except for those at APCH station (Apachi, Kamchatka Peninsular) closest to the epicenter that demonstrates the nonlinear westward displacement typical of the post-seismic period. Note that these after-effects of deep-focus earthquakes have obviously been found for the first time.

The reason of the discovered change in the average annual rates of recent crustul movements in the Far East region most probably lies in the post-seismic process development in the upper mantle (viscoelastic relaxation), initiated by the main shock of the Okhotomorsk earthquake.

Keywords: Far East, Okhotomorsk earthquake, recent movement, GNSS-station

\*\*\*

УДК 551.24+550.34

## СОВРЕМЕННОЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗОН СУБДУКЦИИ И КОЛЛИЗИИ НА БАЙКАЛЬСКУЮ РИФТОВУЮ ЗОНУ

## В.В. Ружич, Е.А. Левина

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Представлены оценки геодинамического воздействия на Байкальскую рифтовую зону (БРЗ) со стороны коллизионной и субдукционной границ Евразийской плиты. Расчеты основаны на анализе сейсмомиграционных процессов с учетом распределения удельной плотности выделившейся сейсмической энергии в пределах двух выбранных профилей между БРЗ и областями коллизии и субдукции. Согласно полученным решениям, удельная плотность сейсмической энергии, выделившейся в литосфере на промежуточном участке литосферы между БРЗ и коллизионной границей, составляет порядка  $1.72 \times 10^{10}$  Дж/км<sup>2</sup>, а по профилю БРЗ – Нанкайский желоб – порядка  $1.02 \times 10^{10}$  Дж/км<sup>2</sup>. Наличие выявленной короткопериодной цикличности сейсмического процесса в БРЗ и смежных районах может быть объяснено модулирующим влиянием космических факторов в виде вариаций в режиме вращения Земли и ее гравитационного взаимодействия в системе Земля-Луна-Солнце. В заключение отмечено, что возникновение БРЗ как зарождающегося раскола континентальной плиты является следствием воздействия на литосферу местных мантийных процессов при участии космических факторов, что следует учитывать при разработке новой модели БРЗ.

*Ключевые слова:* сейсмомиграция, пространственно-временная диаграмма, космический фактор, геодинамическое влияние, межплитная граница, модель БРЗ

Решалась задача по оценке геодинамического влияния со стороны межплитных контактных зон Индоевразийской коллизии Западно-И Тихоокеанской субдукции на сейсмический режим и подготовку опасных землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. Для этого проводились расчеты, основанные на анализе сейсмомиграционных процессов и распределении удельной плотности выделившейся сейсмической энергии в пределах двух выбранных профилей между БРЗ и областями коллизии и субдукции (рис. 1). С применением ранее разработанного авторами статистического метода пространственно-временных диаграмм [1, 2] оценивались скорости и периодичность в процессах сейсмомиграции. На полученных диаграммах обнаруживаются проявления цикличности в сейсмическом режиме Тянь-Шаньского сегмента и в режиме перемещений сейсмической активности в виде деформационных фронтов с юго-запада на северо-восток со скоростями порядка 330 км/год. Установлено также, что сейсмомиграционный процесс имеет прерывисто-поступательный режим, обусловленный квазипериодическим продвижением в литосфере деформационных фронтов со стороны Индоевразийской коллизионной области.



Рис. 1. Эпицентральное поле землетрясений, возникших в период 1963–2015 гг. с *М*≥5.0 на пространствах литосферы между БРЗ и геодинамически активными границами юго-восточных окраин Евразийской плиты. Прямоугольниками показаны профили, в пределах которых учитывались параметры миграции и плотность энергии: *1* – Тянь-Шань – БРЗ; 2 – Япония – БРЗ.

В результате проведенных расчетов и было показано, что современное геодинамическое влияние на сейсмотектонический режим БРЗ со стороны зоны Индоевразийской коллизии распространяется преимущественно на юго-западный и отчасти на центральный район БРЗ в виде умеренного горизонтального сжатия литосферы. Удельная плотность выделившейся сейсмической энергии на промежуточной территории по этому профилю составляет порядка 1.72×10<sup>10</sup> Дж/км<sup>2</sup>.

По другому профилю влияние на сейсмичность БРЗ со стороны зоны тектонических событий в районе Нанкайского желоба проявляется с меньшими значениями плотности высвобожденной сейсмической энергии, равной  $1.02 \times 10^{10}$  Дж/км<sup>2</sup>. В литосфере северо-восточного фланга БРЗ это ослабленное геодинамическое влияние проявляется с запаздыванием и преимущественно в откликах на сильные сейсмические события в виде умеренного возрастания сейсмического фона, инициации значительных по энергии сейсмических толчков, а также в сейсмофокальных механизмах очагов землетрясений с выраженной сдвиговой компонентой в районах Чарской и Токкинской впадин [3, 4].

В таблице показано выявленное соотношение численности толчков и значений выделившейся сейсмической энергии в зоне коллизии, субдукции и в БРЗ. Здесь  $\varphi$  – диапазон широт;  $\lambda$  – диапазон долгот рассматриваемого района; N – количество землетрясений;  $\Sigma E$  – суммарная энергия; S – площадь района; РЕ – плотность сейсмической энергии. Для расчетов использовался каталог мировых сейсмических событий Northern California Earthquake Data Center [5] в диапазоне магнитуд 3.5–9.0 за 1963–2015 гг.

Видно, что уровни общего числа землетрясений указанного энергетического диапазона и их суммарной энергии в БРЗ и в межплитных областях различаются на 2 и 3 порядка. В последнем столбце видно, что самым мощным источником генерации землетрясений является Нанкайский сегмент зоны Западно-Тихоокеанской субдукции. В проекции на земную поверхность он несколько меньше по площади зоны Индоевразийской коллизии, но на порядок превосходит ее по плотности выделяющейся сейсмической энергии.

На рис. 2. приведен характерный тренд хорошо выраженного спадания плотности сейсмической энергии при удалении от зоны коллизии в северовосточном направлении. Для объяснения причин более ощутимого геодинамического влияния на БРЗ со стороны коллизионной межплитной границы, в сравнении с зоной субдукции, могут быть привлечены два тектонофизических условия: 1 - геомеханические и реологические различия в строении зон межплитного контактного взаимодействия при субдукции и коллизии; 2 – дополнительное увеличение усилий межплитного взаимодействия в приэкваториальной области коллизии за счет проявления тектонического эффекта полюсного сжатия Земли при ее вращении. Наблюдаемые через анализ процессов сеймомиграции признаки распространения фронтов

тектонических деформаций в литосфере можно рассматривать как показатели современного влияния на сейсмический режим в БРЗ со стороны межплитных границ. Они проявляются с задержкой в месяцыгоды как отклики на сейсмические события, произошедшие в районах субдукции и коллизии. Представляется, что механизм распространения подобного влияния на современный сейсмотектонический режим в пределах БРЗ осуществляется посредством инициации быстрых смещений в разломах, то есть через триггерный механизм [6]. В сегментах зон разломов, находящихся в состоянии деформационной мультинеустойчивости, даже слабыми воздействиями возможна инициация увеличения численности и энергии землетрясений, а в редких случаях и возникновения сильных землетрясений [7]. Учет закономерностей спадания на два порядка плотности энергии землетрясений с расстоянием означает, что удаленное влияние коллизионных и субдукционных процессов не способно кардинальным образом влиять на возникновение и длительное развитие БРЗ, как это было представлено в ранних работах [8]. Следовательно, причины возникновения и длительного развития зоны Байкальского рифта обусловлены действием других энергетических источников, вероятнее всего связанных с местными мантийными процессами, что обосновывается в многочисленных публикациях, например в работе [9].

К настоящему времени обнаруживаются значительные противоречия в геофизических материалах, касающихся строения верхней мантии. Наличие огромных плюмов и признаков конвекционных течений в аномальной части мантии под земной корой уже не представляется столь однозначным, если принимать во внимание новые данные, например по GPS, и общая картина происхождения БРЗ оказывается более сложной [10]. За длительную геологическую историю развития рифтогенеза в Прибайкалье, которая, судя по новым данным в частности в [3, 11], насчитывает порядка 60-70 млн лет, могло кардинальным образом измениться строение мантийной части литосферы в сравнении с первоначальным при первых признаках заложения Южнобайкальской впадины. Простые расчеты показывают, что при средних скоростях мантийных течений порядка 1-5 см/год деформационные изменения в структуре мантии за десятки миллионов лет составят сотни процентов по отношению к структурам верхних горизонтов земной коры. Таким образом, могло возникнуть несоответствие с глубинным строением, например, на месте краевого шва Сибирской платформы со складчатостью Саяно-Байкальского пояса, сохранившегося в верхнем горизонте земной коры со времен неопротерозоя. Такое несоответствие явным образом фиксируется в районе северовосточного фланга БРЗ, где рифтогенные структуры проникли в пределы Алданского щита Сибирской платформы [12, 13]. При построении более корректной модели БРЗ необходимо учитывать рассмотренное рассогласование мантийных и верхнекоровых структурных планов.

<sup>2</sup> аспределение плотности	сейсмической э	нергии в	рассмат	риваемых	районах
 P Contraction of the second se	••••••		P		

Регион	Координаты (град)	N	Σ <i>Е</i> (Дж)	S (км²)	РЕ (Дж/км²)
Зона коллизии	φ: 25–45, λ: 63–100	16835	$1.62 \times 10^{17}$	$7.5 \times 10^{6}$	$2.2 \times 10^{10}$
Зона субдукции	φ: 32–56, λ: 130–160	24393	$8.84 \times 10^{17}$	$3.5 \times 10^{6}$	$2.5 \times 10^{11}$
БРЗ	φ: 50–58, λ: 98–122	598	$9.87 \times 10^{14}$	$1.1 \times 10^{6}$	$1.0 \times 10^{9}$



Рис. 2. График зависимости логарифма плотности сейсмической энергии от расстояния от Индо-евразийской зоны коллизии до БРЗ показан ломаной линией, регрессия – прямой линией.

Многими исследователями в работах уже обсуждалось характерное проявление короткопериодной цикличности в сейсмическом, а следовательно, и в сейсмотектоническом режиме, установленном в БРЗ, где отмечены циклы с примерной длительностью 1, 5, 11, 44 года [14, 15]. Исходя из выявленной короткопериодной цикличности в сейсмическом режиме БРЗ и за ее пределами, а также в сейсмомиграционных процессах, обосновывается вывод о вероятном модулирующем влиянии космогенных факторов на сейсмотектонические процессы контактного межплитного взаимодействия [16, 17]. Как уже рассматривалось выше, к числу внеземных факторов отнесены короткопериодные вариации, наблюдаемые в режимах ротационного и орбитального вращения Земли, а также ее гравитационного взаимодействия с Солнцем, Луной и другими планетами Солнечной системы. Возникновение указанных короткопериодных циклов невозможно увязать с режимом медленных эндогенных процессов тепловой конвекции Земли. Проявление влияния космогенных факторов на режим перемещений и деструкции литосферных плит, в том числе и на сейсмотектонические рифтогенные процессы в Прибайкалье, может быть весьма полезным при разработке геодинамической модели БРЗ, а также при совершенствовании долгосрочного и среднесрочного видов прогноза землетрясений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Левина Е.А., Ружич В.В. Разномасштабная миграция землетрясений как проявление инициированного энергопотока при волновых деформациях литосферы Земли // Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Всероссийского семинара-совещания. М.: ГЕОС, 2010. С. 71–78.

2. Levina E.A., Ruzhich V.V. The seismicity migration study based on space-time diagrams // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6, № 2. P. 225–240.

3. Саньков В.А., Добрынина А.А. Современное разломообразование в земной коре БРС по данным о механизмах землетрясений // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465, № 3. С. 347–352.

4. Мельникова В.И. Напряженно-деформированное состояние Байкальской рифтовой зоны по данным о механизмах очагов землетрясений. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2001. 16 с.

5. Northern California Earthquake Data Center. Available from: http://www.ncedc.org.

6. Левина Е.А., Ружич В.В. Сейсмогеодинамическое взаимодействие Байкальского рифта с зонами коллизии и субдукции // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всероссийская научная конференция с международным участием, Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г.: сборник материалов. В 2-х томах. Владивосток: Дальнаука, 2015. Т. 2. С. 93–97.

7. Кочарян Г.Г., Остапчук А.А., Павлов Д.В., Ружич В.В., Батухтин И.В. Экспериментальное исследование различных режимов скольжения блоков по границе раздела. часть II: Полевые эксперименты и феноменологическая модель // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18, № 6. С. 75–85.

8. Molnar P., Tapponier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision // Science. 1975. V. 189, № 4201. P. 419–425.

9. Logatchev N.A. History and geodynamics of the Lake Baikal Rift in the context of the Eastern Siberia rift system: a review // Bull. Centres Rech. Explor. – Prod. Elf Aquitaine. 1993. V. 17, № 2. P. 353–370.

10. Мордвинова В.В., Кобелев М.М., Треусов А.В., Хритова М.А., Трынкова Д.С., Кобелева Е.А., Лухнева О.Ф. Глубинное строение переходной зоны: Сибирская платформа – Центрально-Азиатский подвижный пояс по телесейсмическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7, № 1. С. 85–103.

11. Мац В.Д. Байкальский рифт: плиоцен (миоцен) – четвертичный эпизод или продукт длительного развития с позднего мела под воздействием различных тектонических факторов. Обзор представлений // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 467–490. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0190 2015.

12. Ружич В.В. Влияние древних разрывов на развитие новейших структур Байкальского рифта // Геология и геофизика. 1975. Т. 1. С. 130–136.

13. Zamarayev S.M., Ruzitch V.V. On relationships between the Baikal rift and ancient structures // Tectonophysics. 1978. V. 45, № 1. P. 41–47.

14. Ружич В.В. Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.

15. Любушин А.А., Писаренко В.Ф., Ружич В.В., Буддо В.Ю. Выделение периодичностей в сейсмическом режиме // Вулканология и сейсмология. 1998. Т. 1. С. 62–76.

16. Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.

17. Агеев А.М. О влиянии космических факторов на геодинамику литосферы (на примере Калифорнии и Невады) // Поволжский экологический журнал. 2003. № 2. С. 178–183.

## THE PRESENT-DAY INFLUENCE OF GEODYNAMICS OF SUBDUCTION AND COLLISION ZONES ON THE BAIKAL RIFT ZONE

#### V.V. Ruzhich, Ye. A. Levina

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Assessments have been provided for geodynamic effects exerted by collision and subduction margins of the Eurasian plate on the Baikal rift zone (BRZ). The calculations are based on seismic migration analysis with regard to the distribution of density of released seismic energy within two selected profiles between the BRZ and the areas of collision and subduction. According to obtained solutions, the density of seismic energy released into the lithosphere on its intermediate segment between the BRZ and the collision boundary is  $1.72 \times 10^{10}$  J/km<sup>2</sup>, and on the BRZ–Nankai trough profile – approximately  $1.02 \times 10^{10}$  J/km<sup>2</sup>. Short recurrence intervals of earthquakes in the BRZ and adjacent areas can be explained by modulating influence of cosmic factors in the form of variations in rotational mode of the Earth and its gravitational interactions in the Earth-Moon-Sun system. In conclusion, it is noted that initiation of the BRZ as an incipient splitting of the continental plate is resulted from the influence of local mantle processes on the lithosphere that involves cosmic factors, which should be considered while designing a new model of the BRZ.

Keywords: seismic migration, space-time diagram, cosmic factor, geodynamic effect, interplate boundary, BRZ model

\*\*\*

УДК 551.24+550.34

## ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ МОНГОЛО-СИБИРСКОЙ ПОДВИЖНОЙ ОБЛАСТИ: ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ СООТНОШЕНИЯ

В.А. Саньков<sup>1, 2</sup>, А.А. Добрынина<sup>1, 3</sup>, А.В. Парфеевец<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Аннотация. По данным о механизмах очагов землетрясений рассчитаны пространственные характеристики сейсмотектонических деформаций на территории Монголо-Сибирской подвижной области (МСПО). Проведено их сопоставление с результатами GPS измерений и данными реконструкций позднекайнозойского палеостресса. Полученные пространственно-временные закономерности напряженно-деформированного состояния земной коры отражают динамическое взаимодействие разных по своему происхождению тектонических сил в механически неоднородной литосфере МСПО. Ключевые слова: современное и палеонапряженное состояние, Монголо-Сибирская подвижная область, источник тектонических сил

Исследования глубинного строения, позднекайнозойской тектоники и современных движений на территории Центральной Азии, проведенные в конце XX и в начале XXI века сформировали современное понимание условий образования неотектонических структур во внутренней части континента. Процессами конвергенции Индостана и Евразии объясняется происхождение большинства горных сооружений. Формирование серии линейных горных сооружений Тянь-Шаня и Алтая связывают со складкообразованием корового и литосферного уровня [1] при сжатии литосферы. В особый класс выделяются транспрессионные орогены [2], связанные со сдвиговыми зонами, образованными при косой конвергенции блоков корового и литосферного уровня. В южном обрамлении Сибирской платформы, структуры, связанные с процессами конвергенции плит, локализуются в Алтае-Саянской горной области, а южнее – в Монгольском и Гобийском Алтае. Как показано ранее [3 и ссылки в ней], структура и динамика развития Монголо-Сибирской подвижной области (МСПО), а особенно Байкальской рифтовой системы (БРС) как неотъемлемой ее части не могут быть объяснены с позиций воздействия сжатия литосферы в результате конвергенции Индостана и Евразии. В качестве основного механизма раскрытия БРС предложено рассматривать воздействие на подошву литосферы долгоживущего астеносферного потока в направлении СЗ-ЮВ, который вызывает дивергенцию Амурской и Евразийской плит. Взаимодействие этих сил со сжатием литосферы определяет формирование большей части неотектонических структур МСПО [3]. Одновременно локальное воздействие на литосферу аномалий верхней мантии приводит к образованию крупных сводовых поднятий - Хангайского и Хэнтейского. Сопоставление параметров позднекайнозойского и современного напряженно-деформированного состояния земной коры дает возможность исследовать более детально закономерности пространственновременных соотношений основных тектонических сил в пределах МСПО.

Исследования современного напряженного состояния земной коры по данным о механизмах очагов землетрясений и определение реализованных плоскостей разрывов в очагах землетрясений территории МСПО и окружающих территорий проведены с использованием метода катакластического анализа (МКА) [4]. Данные о механизмах очагов землетрясений заимствованы из различных опубликованных источников. Рассчитаны тензоры напряжений и приращений сейсмотектонической деформации (СТД), коэффициент Лоде-Надаи, коэффициент дилатансии, проведено районирование территории по типу напряженного состояния. С использованием этих данных построена схема траекторий осей максимального и минимального горизонтальных напряжений сжатия. Полученные результаты не противоречат результатам расчетов СТД разными методами для БРС [5], Алтае-Саянской горной области [6, 7 и др.] и территории Монголии [8]. Главной чертой поля траекторий является тенденция разворота оси максимального горизонтального сжатия от СВ и субмеридионального простирания на западе МСПО до ВСВ в ее северо-восточной части и субширотного в пределах Амурской плиты. В этом развороте можно усмотреть влияние дополнительного сжатия субширотного простирания со стороны зоны ЗападноТихоокеанской субдукции. В деталях интересен переход вдоль окраины Сибирской платформы от субмеридионального простирания S<sub>Hmax</sub> в Ceверной Монголии к северо-восточному в Восточном Саяне и в Тункинской ветви Байкальской рифтовой системы. Разворот оси максимального горизонтального сжатия на 40° от ССВ до СВ простирания обеспечивает взбросовые и левосторонние взбрососдвиговые движения по юго-восточному сегменту Главного Саянского разлома.

По типу напряженного состояния выделяются несколько крупных областей: область горизонтального растяжения (Байкальская впадина и большая часть северо-восточного фланга БРС), области преобладания горизонтального сдвига с включением участков растяжения со сдвигом и сжатия со сдвигом (юго-западный фланг БРС, часть поднятия Восточного Саяна и область перехода от структур севе-

ро-восточного фланга БРС к структурам Олекмо-Станового поднятия), области преобладания горизонтального сжатия (восточная часть Тувинского нагорья, зона Болнайского разлома и зона сочленения Монгольского и Русского Алтая, Монгольский Алтай), области сжатия со сдвигом и горизонтального сдвига (Орхон-Тольское междуречье, Гобийский Алтай). Переход от областей сжатия к областям растяжения обнаруживает хорошо проявленную зональность. Дополнительные данные о характере деформировании получены из результатов расчетов коэффициента Лоде-Надаи, на основе которых в пределах указанных областей выделяются районы с различным типом деформирования. В целом преобладают участки, с условиями чистого сдвига (более половины расчетных ячеек) и переходными условиями деформаций от чистого сдвига к одноосному сжатию или одноосному растяжению.

Сопоставление реализованных плоскостей в очагах землетрясений с системами закартированных разломов исследуемой территории показывает, что наилучшее совпадение с главными структурами наблюдается для областей с преобладающим растяжением земной коры (центральная часть и северовосточный фланг БРС). Для зон сдвига и сжатия в очагах землетрясений наблюдаются подвижки по разным системам разрывов, включая и главные. В БРС наблюдается очень хорошее согласие простираний разрывов в очагах землетрясений с простиранием палеосейсмодислокаций, данные по которым суммированы в работе [9].

Результаты сопоставлены с полями скоростей относительных горизонтальных деформаций укорочения и удлинения, полученными по данным GPS геодезии [10]. В целом, направления принципиальных осей сейсмотектонических деформаций согласуются с направлениями осей горизонтального укорочения и удлинения земной поверхности. Исключение составляют эпицентральные зоны сильнейших для территории землетрясений XX века -Болнайского 23.07.1905 г. (Ms=8.3), Могодского 05.01.1967 г. (*M*<sub>w</sub>=7.8) и Мондинского 05.04.1950 г.  $(M_w=7.0)$ , что связано, по-видимому, с продолжающимися в этих районах релаксационными процессами. Как показали результаты расчетов [11], постсейсмические движения, возникшие в результате Болнайского землетрясения, до настоящего времени вносят свой вклад в поле деформаций МСПО. Более того, согласно данным GPS измерений, удаленные воздействия катастрофических сейсмических событий могут явиться отдельным фактором, влияющим на характер и уровень деформаций во внутренней части континентального массива. Так, в результате упругой реакции литосферы Азии на землетрясение Тохоку 11.03.2011 г. ( $M_W = 9.0$ ) значительные смещения в направлении эпицентра испытали пункты, расположенные в пределах Северного и Северо-Восточного Китая, что привело к локальному изменению сейсмического режима и напряженного состояния земной коры [12, 13]. Пункт ULAZ (г. Улан-Батор) сдвинулся в восточном направлении на 3 мм, а пункт IRKT (г. Иркутск) – на 1 мм. В пределах МСПО это не привело к существенным изменениям напряженного состояния коры, или об этом пока не известно, однако, по оценкам из работы [13], постсейсмические движения и упруговязкая релаксация за 10 лет вызовут деформации, сопоставимые по значению с косейсмической.

Обобщение данных многолетних исследований полей позднекайнозойских напряжений земной коры с использованием данных о тектонической трещиноватости и кинематике разломов исследуемой территории позволило провести районирование территории по типу палеонапряженного состояния, в том числе для асейсмичных районов. Для многих сейсмоактивных районов основные параметры современного поля напряжений хорошо согласуются с реконструированным постмиоценовым [14]. Вместе с тем, в БРС выявлены тенденции изменения условий деформирования во времени. На северовосточном фланге и в центральной части БРС для начальной стадии неотектонической активизации характерны условия сдвига и транстенсии, а для поздней (включая современный период) - чистого растяжения [15, 16]. Нельзя не заметить, что оси напряжений минимального сжатия в обеих частях БРЗ направлены почти строго поперек рифтоконтролирующих разломов, несмотря на изменение простирания последних. Имеющиеся данные о сдвиговой компоненте смещений по этим разломам позволяют сделать заключение о ее сугубо подчиненном значении по отношению к вертикальной. Эта тенденция изменяется только для широтных разломов, где горизонтальная компонента иногда проявлена более ярко. Можно привести пример редкой совокупности разломов СВ простирания, для которых левосторонняя сдвиговая компонента превышает вертикальную - это разломы пологого восточного борта Баргузинской впадины в бассейне рек Аргада и Гарга, формирование которых происходило, по-видимому, во второй половине антропогена. Вполне вероятно, что

такие соотношения были характерны для большинства разломов БРС на начальной стадии рифтогенеза. Вертикальная составляющая движений по разломам с погружением фундамента впадин увеличивалась с увеличением степени растяжения коры. Одновременно с этим возникло поднятие плеч рифтов, как упругая реакция на разгрузку и проявление изостатических движений [17]. Эти направленные вертикально силы дополнительно увеличивались за счет разгрузки плеч рифтов в результате эрозии. Проявлениями подобных процессов объясняют поднятия плеч также и для разломов сдвиговой природы [18]. В БРС, по грубой оценке, эти поднятия могут достигать от 30 до 50 % от общей амплитуды вертикальных движений по отдельным разломам. Не удивительно, что сбросы превалируют в БРС вне зависимости от простирания рифтовых структур.

Несогласованность по направлениям главных осей и режиму деформирования наблюдается в пределах ЮЗ фланга БРС. Процессы транспрессии проявились здесь в плиоцене и наложены на рифтовые [19]. Они обусловили эволюцию напряженного состояния, вызывали инверсию впадин в этой части рифтовой системы и даже привели к формированию складчатости в осадках Южно-Байкальской впадины.

В целом, механически неоднородная литосфера МСПО явилась объектом динамического взаимодействия различных по происхождению тектонических сил, что привело к многообразию кинематических типов разломов, проявлению пространственной зональности поля напряжений, его эволюции во времени. Знание закономерностей этих взаимодействий позволит выделить области аномального проявления деформаций, с которыми могут быть связаны зоны подготовки сильных землетрясений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Delvaux D., Cloetingh S., Beekman F., Sokoutis D., Burov E., Buslov M.M., Abdrakhmatov K.E. Basin evolution in a folding lithosphere: Altai– Sayan and Tien Shan belts in Central Asia // Tectonophysics. 2013. V. 602. P. 194–222.

2. Cunningham, D. Active intracontinental transpressional mountain building in the Mongolian Altai: defining a new class of orogen // Earth and Planetary Sciences Letters. 2005. V. 240. P. 436–444.

4. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 406 с.

5. Complex geophysical and seismological investigations in Mongolia / Editors-in-chief V.I. Dzhurik, T. Dudarmaa. Ulaanbaatar–Irkutsk, 2004. 315 p.

6. Гольдин С.В., Кучай О.А. Сейсмотектонические деформации Алтае-Саянской сейсмоактивной области и элементы коллизионно-блочной геодинамики // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 7. С. 692–723.

7. Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Marinin A.V. Stress state and deformation of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region // Russ. Geol. Geophys. 2013. V. 54. P. 206–222.

8. Радзиминович Н.А., Баяр Г., Мирошниченко А.И., Дэмбэрэл С., Ульзибат М., Ганзориг Д., Лухнев А.В. Механизмы очагов землетрясений и поле напряжений Монголии и прилегающих территорий // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7(1). С. 23–38.

9. Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Семенов Р.М., Имаев В.С. Палеосейсмичность Прибайкалья // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36, № 1. С. 7–22.

10. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Кале Э. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, №7. С. 1006–1017.

11. Calais E., Vergnolle M., Deverchere J., Lukhnev A., San'kov V., Amarjargal S. Are post-seismic effects of the M=8.4 Bolnay earthquake (July 12, 1905) still influencing GPS velocities in the Mongolia-Baikal area? // Geophys. J. Int. 2002. V. 149. P. 157–168.

12. Wang M., Li Q., Wang F., Zhang R., Wang Y.Z., Shi H.B., Zhang P.Z., Shen Z.K. Far-field coseismic displacements associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake in Japan observed by Global Positioning System // Chinese Science Bulletin. 2011 V. 56, № 23. P. 2419–2424.

13. Shao Z.,1 Zhan W., Zhang L., Xu J. Analysis of the far-field co-seismic and post-seismic responses caused by the 2011 MW 9.0 Tohoku-Oki earthquake // Pure Appl. Geophys. 2016. V.173. P. 411–424.

14. Parfeevets A.V., Sankov V.A. Late Cenozoic tectonic stress fields of the Mongolian microplate // Comptes Rendus Geosciences. 2012. V. 344. P. 227-238.

15. Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnitchenko A., Ruzhich V., Sankov V. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II: Cenozoic rifting // Tectonophysics. 1997. V.282. P. 1-38.

16. Парфеевец А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В. Эволюция напряженного состояния земной коры Монголо-Байкальского подвижного пояса // Тихоокеанская геология. 2002. Т. 21, № 1. С. 14–28.

17. Poort J., Van der Beek P., Ter Voorde M. An integrated modelling study of the central and northern Baikal rift: evidence for non-uniform lithospheric thinning? // Tectonophysics. 1998. V. 291 (1). P. 101-122.

18. Basil C., Allemand P. Erosion and flexural uplift along transform faults // Geophys. J. Int. 2002. V. 151. P. 646-653.

19. Парфеевец А.В., Саньков В.А. Геодинамические условия развития Тункинской ветви Байкальской рифтовой системы // Геотектоника. 2006. № 5. С. 61-84.

#### TECTONIC FACTORS OF RECENT GEODYNAMICS OF MONGOLIA-SIBERIA MOBILE AREA: SPACE-TIME RELATIONSHEEPS

V.A. Sankov<sup>1, 2</sup>, A.A. Dobrynina<sup>1, 3</sup>, A.V. Parfeevets<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Geological iInstitute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

Abstract. Using the data on earthquake focal mechanisms the spatial characteristics of seismotectonic deformation in the territory of Mongolia-Siberia mobile area (MSMA) were calculated. A comparison of the results of GPS measurements and data reconstruction of the Late Cenozoic paleostress were performed. These spatio-temporal patterns of stress-strain state of the crust reflect the dynamic interaction of different origin of tectonic forces in the mechanically inhomogeneous lithosphere MSMA.

Keywords: modern and paleostress state, Mongolia-Siberia mobile area, the source of tectonic forces

\*\*\*

УДК 551.243+550.34

## УЛАН-БАТОРСКИЙ И МОГОДСКИЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОЛИГОНЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ МОНГОЛИИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И АКТИВНОСТИ ЗОННО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ ТЕКТОГЕНЕЗА

К.Ж. Семинский<sup>1</sup>, С. Дэмбэрэл<sup>2</sup>, М.А. Тугарина<sup>3</sup>, Д. Мунгунсурен<sup>2</sup>, А.А. Бобров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт астрономии и геофизики FVY, Улан-Батор, Монголия

<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Для Улан-Баторского и Могодского геодинамических полигонов в Центральной Монголии проведены комплексные исследования и выделены широкие зоны деструкции, активные на новейшем и современном этапах тектогенеза. Зоны отличаются от смежных блоков сгущением субпараллельных и кулисообразных разломов. В новейшее время обстановки формирования зонно-блоковой структуры коры в изученных регионах были различны. На современном этапе тектогенеза деструкция осуществляется в едином поле напряжений, которое является отдаленным результатом Индо-Азиатской коллизии. Стиль активного разрывообразования определяется обстановкой сдвига с ориентацией оси сжатия в направлении ЮЗ-СВ, а оси растяжения – ЮВ-СЗ. При этом развиваются сопряженные системы субмеридиональных и субширотных сдвигов, которые в целом характеризуются более высокой радоновой и сейсмической активностью по сравнению с зонами других ориентировок. Общее подобие стиля современной деструкции в пределах полигонов осложняется различием в деталях. Они являются следствием ослабления тектонической активности в направлении с запада на восток, а также отличий в распределении древних структурно-вещественных неоднородностей, свойственных каждому из изученных регионов.

Ключевые слова: зонно-блоковая структура, деструктивная зона, разлом, поле напряжений, сейсмичность, радоновая активность, геодинамический полигон, Монголия

Улан-Баторский И Могодский геодинаполигоны располагаются, соответмические ственно, к востоку и западу от меридиана 105 (рис. 1, верхняя врезка), который, по представлениям многих исследователей, является неявно выраженной границей блоков литосферы, отличающихся серией геологических и геофизических свойств. В плане современной геодинамики это, прежде всего, проявляется в различиях сейсмической активности и направленности движений коры, свойственных западной и восточной частям Монголии. Как следствие, анализ и сопоставление стилей деструкции в

пределах полигонов имеют принципиальное значение для решения ключевых вопросов современной геодинамики Центральной Азии. Кроме того, это важно и в плане обеспечения сейсмобезопасности, так как вблизи с. Могод 50 лет назад (05.01.1967 г.) произошло сильное землетрясение с М=7.4, а для окрестностей г. Улан-Батор, где проживает более третьей части населения страны, фиксируется увеличение числа слабых землетрясений (М=0.5-4.5), концентрирующихся в пределах линейно вытянутых (очевидно, разломных) зон [1].

В связи с отмеченной теоретической и прикладной значимостью специалисты разных стран мира проводят в пределах Улан-Баторского и Могодского полигонов палеосейсмологические, геодезические, эманационные, структурно-геологические, инженерно-геологические и другие виды работ, направленные на определение характера современной активности и оценку степени опасности территорий со стороны разнотипных геологических процессов и явлений. Целью наших исследований было дополнить данные предшественников результатами собственных тектонофизических, структурногеологических, эманационных, неотектонических, сейсмологических исследований и проанализировать их в рамках концепции о зонно-блоковой структуре литосферы [2, 3].

Данная концепция базируется на работах М.А. Садовского и его коллег [4] и исходит из представлений о литосфере как иерархически организованной структурированной среде, состоящей из сравнительно стабильных блоков, которые взаимодействуют по широким зонам деструкции, отличающимся пониженной (вследствие раздробленности) квазивязкостью субстрата. Этот подход позволяет поновому подойти к оценке стиля разломообразования в Центральной Монголии, т.е. определить главные черты делимости земной коры, степень их унаследованности от новейшего этапа структурообразования, тип современного поля напряжений и кинематику отдельных разломных систем. Решение подобных вопросов особенно актуально для Улан-Баторского полигона, в пределах которого наблюдения проводятся сравнительно недавно, а проявления современной активности не так ярко выражены и благоприятны для изучения, как в эпицентре Могодского землетрясения.

Для выполнения цели исследования была проанализирована серия схем зонно-блоковой структуры, составленных в четырех масштабах: для Центральной Азии в целом [2], Монголии и юга Восточной Сибири, а также отдельно для каждого из двух геодинамических полигонов. Построения проводились по отработанной ранее методике [2, 3] и заключались в выделении деструктивных зон как участков повышенной плотности новейших разломов и/или линеаментов, выделенных на базе анализа цифровой модели рельефа (рис. 2, А, Б). Кроме этих схем, относящихся по возрасту к новейшему времени, на территории Улан-Баторского полигона были выделены участки сгущения эпицентров землетрясений (см. рис. 1), которые представляют собой зоны деструкции, соответствующие современному этапу тектогенеза [5].



Рис. 1. Деструктивные зоны Улан-Баторского геодинамического полигона, выделенные на схеме распределения плотности эпицентров землетрясений с M=0.5–4.5 (в изолиниях). На нижней врезке представлена роза-диаграмма простираниz деструктивных зон и кинематика их систем в сдвиговом поле напряжений 1-го порядка. 1 – изолинии плотности эпицентров землетрясений; 2 – максимумы, в пределах которых плотность эпицентров на единицу площади (25 км<sup>2</sup>) больше 25; 3 – центр максимума; 4 – деструктивные зоны (и их порядковые номера), достоверно (а) и менее достоверно (б) выделяющиеся в поле эпицентров землетрясений; 5 – системы зон, развивающиеся в обстановках правого сдвига (а), левого сдвига (б), растяжения (в) и сжатия (г); 6 – ориентация субгоризонтальных осей главных нормальных напряжений растяжения (а) и сжатия (б) для регионального поля напряжений; 7 – новейшие разломы, выявленные на базе линеаментного анализа трехмерной модели рельефа [8] (пунктир – предполагаемое положение); 8 – местоположение и номера участков, в пределах которых была проведена профильная эманационная съемка для оценки радоновой активности разлома, отчетливо выраженного в рельефе.



Рис. 2. Деструктивные зоны и разломы Могодского геодинамического полигона. A -схема зонно-блоковой структуры; B -схема разломов, представленная на трехмерной модели рельефа; B -схема разрывов, вскрывшихся при Могодском землетрясении (05.01.1967 г.);  $\Gamma -$ диаграмма трещиноватости (I) и решения о полях напряжений (2-3) для участка исследований, располагающегося у взбросового сегмента Могодской палеосейсмодислокации. I -зоны деструкции; 2 -крупные разломы, отчетливо (a) и менее отчетливо (b) выраженные в рельефе на рис. A и B; 3 -мелкие разломы, отчетливо (a) и менее отчетливо (b) выраженные в рельефе на рис. A и B; 3 -мелкие разломы, отчетливо (a) и менее отчетливо (b) выраженные в рельефе; 4 -контуры Хулджийнголской впадины; 5 -разрывы сдвигового (a) и взбросового (b) типа, вскрывшиеся при Могодском землетрясении (05.01.1967г.); 6 -участки структурных и эманационных измерений; 7 -главная из двух сопряженных систем трещин, участвующих в решении о поле напряжений; 8 - второстепенная из двух сопряженных систем трещин, участвующих в решении о поле напряжений; 9 -оси напряжений (1 -сжатие, 2 -промежуточное напряжение, 3 -растяжение); 10 -направление скольжения висячего крыла по плоскости разрыва; 11 -диаграмма трещиноватости (верхняя полусфера; 100 замеров).

Для определения основных характеристик зон деструкции, отчетливо выделяющихся на каждом из полигонов, крупные разломы в их пределах изучались полевыми геолого-структурным и эманационным методами. Так, на Могодском полигоне меридиональный сдвиговый и северо-западный взбросовый сегменты сейсмодислокации, образовавшейся в 1967 г. при землетрясении (рис. 2, В), были пересечены профилями с пунктами массового замера трещиноватости (рис. 2, Г) и измерениями концентрации радона в почве. На Улан-Баторском полигоне подобные профили были пройдены вкрест простирания представителей каждой из четырех основных систем разломов. Общий объем профильных работ составил более 80 км. При этом геологоструктурные наблюдения в скальных породах характеризовали главным образом новейший и более древние этапы развития структуры земной коры, а аналогичные измерения в голоценовых отложениях в совокупности с эманационными и сейсмологическими данными - современную тектоническую обстановку. Все полученные материалы анализировались с позиций тектонофизики, что позволило реконструировать поля напряжений и особенности формирования зонно-блоковой структуры.

На основе сопоставления результатов анализа, проведенного для Улан-Баторского и Могодского полигонов, получены следующие основные выводы.

1. Центральная Монголия характеризуется зонно-блоковой структурой коры, которая является составной частью подобного строения литосферы, установленного ранее на более низких уровнях организации вещества при исследованиях территории юга Восточной Сибири и Монголии, а также Центральной Азии в целом. Общим для Улан-Баторского и Могодского полигонов является существование широких деструктивных зон, ограничивающих менее нарушенные блоки. В то же время состояние и активность зонно-блоковой структуры различаются как в пределах полигонов, так и для новейшего и современного этапов развития каждого из изученных регионов.

2. В новейшее время, согласно данным линеаментного анализа рельефа и геолого-структурным наблюдениям в скальных породах, в коре Могодского полигона сформировалась зонно-блоковая структура с доминированием северо-западных зон деструкции (рис. 2, А), развивающихся в условиях растяжения (рис. 2, Г-3). В пределах Улан-Баторского полигона имела место сложная система северозападных, северо-восточных, субмеридиональных и широтных зон (см. сгущения разломов на рис. 1), пространственные взаимоотношения которых, наряду с геолого-структурными данными, свидетельствуют о деструкции коры в обстановке меридионального сжатия. Как следствие, северо-восточные левые сдвиги на западе полигона (в т.ч. Хустай), простираясь на восток, переходят в широтные взбросы и, наконец, в северо-западные правые сдвиги, составляя фрагменты почти правильной в плане дугообразной взбросовой структуры, выпуклой к северу в районе г. Улан-Батор (см. рис. 1).

3. На современном этапе тектогенеза, в соответствии с сейсмологическими, эманационными и геолого-структурными данными, деструкция земной коры в пределах обоих полигонов происходит в региональном поле напряжений, которое является отдаленным результатом Индо-Азиатской коллизии и имеет место в некоторых смежных юго-западных регионах [6, 7 и мн. др.]. Стиль активного разрывообразования в изученных регионах Центральной Монголии определяется обстановкой сдвига с ориентацией оси сжатия в направлении ЮЗ-СВ, а оси растяжения - ЮВ-СЗ. При этом наиболее активно развиваются сопряженные системы правых субмеридиональных и левых субширотных сдвигов, интенсивность подвижек вдоль которых существенно отличается для Могодского и Улан-Баторского полигонов.

4. Характерной особенностью современной деструкции в пределах Могодского полигона является активизация древней структуры, проявившаяся в интенсивной сейсмичности, включая сильное землетрясение 1967 г. (М=7.4), которое сопровождалось образованием меридиональной правосдвиговой дислокации со взбросовым ответвлением в юговосточном направлении (рис. 2, *Б*, *В*, *Г*-2). На Улан-Баторском полигоне в современном поле сдвига формируется сеть деструктивных зон, которые выделяются цепочками максимумов плотности слабых землетрясений (см. рис. 1). Наиболее крупные сдвиги субширотной и субмеридиональной систем пересекают древние тектонические нарушения, вызывая их фрагментарную активизацию, что характерно, например, для разлома Хустай (см. рис. 1). Деструктивные зоны северо-западной и северо-восточной систем, напротив, наследуют сеть разломов новейшего возраста и интенсивно развиваются в обстановках сжатия или растяжения, создающихся в областях сочленения сдвигов у вершин двугранных углов. Такова активизация в условиях сжатия (возможно, со сдвигом) древнего разлома Эмээлт, который в настоящее время контролирует самый интенсивный на полигоне рой слабых землетрясений.

5. Процесс деструкции, охвативший в настоящее время земную кору изученных полигонов, подобен по стилю, но отличается существенными деталями. Они являются следствием ослабления тектонической активности в направлении с запада на восток, а также различий в характере древних структурно-вещественных неоднородностей, свойственных каждому из изученных регионов.

Авторы благодарны сотрудникам лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН Ю.П. Бурзуновой, А.А. Тарасовой, А.К. Семинскому и сотрудникам Института астрономии и геофизики МАН М. Оюун-Эрдэнэ и М. Билгууну за помощь в сборе и обработке первичной информации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–55–44017).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ulziibat M., Ichihashi Y., Demberel S. Earthquake hazard in Ulaanbaatar city and its surrounding areas // Proceedings of USMCA-2011. Thailand, 2011.

2. Семинский К.Ж. Тектонофизические закономерности деструкции литосферы на примере Гималайской зоны сжатия // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 20, № 6. С. 17–30.

3. Семинский К.Ж. Иерархия зонно-блоковой структуры литосферы Центральной и Восточной Азии // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 10. С. 1018–1030.

4. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.

5. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Черемных А.В. Деструктивные зоны и разломно-блоковые структуры Центральной Азии // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18. № 2. С. 41–53.

6. Саньков В.А., Парфеевец А.В., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В. Позднекайнозойская геодинамика и механическая сопряженность деформаций земной коры и верхней мантии Монголо-Сибирской подвижной области // Геотектоника. 2011. № 5. С. 52–70.

7. Radziminovich N.A., Bayar G., Miroshnichenko A.I., Demberel S., Ulziibat M., Ganzorig D., Lukhnev A.V. Focal mechanisms of earthquakes and stress field of the crust in Mongolia and its surroundings // Geodynamics & Tectonophysics. 2016. 7 (1). P. 23–38.

8. Seminsky K. Zh., Demberel S. The first estimations of soil-radon activity near faults in Central Mongolia // Radiation measurements. 2013. V. 49. P. 19–34.

#### ULAANBAATAR AND MOGOD GEODYNAMIC POLYGONS IN CENTRAL MONGOLIA: COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STATE AND ACTIVITY OF ZONE-BLOCK STRUCTURE OF THE EARTH'S CRUST AT THE MODERN TECTOGENESIS STAGE

K.Zh. Seminsky<sup>1</sup>, C. Demberel<sup>2</sup>, M.A. Tugarina<sup>3</sup>, D. Mungunsuren<sup>2</sup>, A.A. Bobrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Astronomy and Geophysics of the Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Integrated studies have been conducted in the Ulaanbaatar and Mogod geodynamic polygons in Central Mongolia, which have found wide destruction zones active at neo- and modern tectogenesis stages. The zones differ from adjacent blocks in concentration of subparallel and en echelon faults. Neoformation conditions of zone-block structure of the Earth's crust in the studied regions were different. At the modern tectogenesis stage, destruction occurs in the uniform stress field, which is the remote effect of the Indo-Asian collision. The mode of active faulting is closely related to a state of pure shear with compressional axis directed NW-SV and SV-NW directed tensional axis. There occur conjugate strike-slip fault systems running in the sub-

meridian and sub-latitudinal directions where radon and seismic activities are higher than in zones of other orientations. The general similarity of modern destruction mode within the field test sites is violated by difference in details. This is due to a west-east decrease in the intensity of tectonic activity and differences in the distribution of the ancient structural and compositional heterogeneities typical of each studied region.

Keywords: zone-block structure, destruction zone, fault, stress field, seismicity, radon activity, geodynamic polygon, Mongolia

\*\*\*

УДК 550.34

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ВЕРХНЕГО ПРИАМУРЬЯ

## М.А. Серов

Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, Россия

Аннотация. На основе результатов многолетних наблюдений за современными движениями земной коры исследуемого региона, морфологических и тектонических данных была построена математическая модель блоковой структуры. Начальными условиями для данной модели, помимо геологических данных, являются также сейсмические, геофизические данные и данные космической геодезии. На примере Верхнего Приамурья рассмотрены возможные механизмы дальнейшего развития блоковой структуры северо-восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса, описываемой взаимодействием трех тектонических структур: Монголо-Охотского складчатого пояса, Евразийской и Амурской литосферных плит. Количественная оценка современных движений и деформаций земной коры необходима для безопасного ведения хозяйственно-экономической деятельности. В фундаментальном плане полученные результаты позволят углубить научные представления о механизмах коллизионного взаимодействия литосферных плит, а также уточнить границы Евразийской и Амурской плит в пределах изучаемой территории.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, земная кора, Верхнее Приамурье

Геодезические наблюдения за современными движениями тектонических блоков земной коры на территории Верхнего и Среднего Приамурья были начаты совместно с ИЗК СО РАН в 2001 г. [1, 2]. Первые наблюдения были проведены по профилю от г. Благовещенска до ст. Известковой, Еврейская АО, включающему пять реперных и один стационарный пункт наблюдений [3]. В 2007 г. сотрудниками ИГиП ДВО РАН организован северный геодинамический полигон, который проходит от п. Ерофей-Павлович до г. Зея, от п. Магдагачи до п. Нагорный и насчитывает двадцать реперных и три стационарных пункта наблюдений [4].

В результате измерений с использованием GPSтехнологий были получены новые данные о геодинамической активности разломно-блоковых структур Верхнего Приамурья и о скоростях их смещений. Установлено, что блоковые структуры имеют тенденцию к смещению преимущественно в ЮВВ направлении.

Левостороннее направление движения совпадает с типом основных разломных нарушений региона и может свидетельствовать о продолжающихся горизонтальных перемещениях вдоль западного фланга Южно-Тукурингрского разлома.

настоящее время имеются достаточно подробные карты разломной тектоники юга Дальнего Востока России и в целом понятные механизмы дробления литосферы на блоки. Когда плановая конфигурация блоков и механизмы очагов землетрясений определены, имеется возможность численного моделирования дальнейшего развития блоковой делимости территории. В работе на примере Верхнего Приамурья рассмотрены возможные механизмы дальнейшего развития блоковой структуры юга Лальнего Востока России.

описываемой взаимодействием трех тектонических структур: Монголо-Охотского складчатого пояса, Евразийской и Амурской литосферных плит, разделенных на восемь блоков (восточная и западная часть Становой подвижной зоны (ПЗ), Сутамский, Тынденско-Зейский, Ларбинский. Селенга-Становой, Монголо-Охотский складчатый пояс, Аргуно-Мамын-ский). Показано, что при сохранении имеющих-ся напряжений развитие системы пойдет по пути частичного разрушения юго-восточной части Селенга-Станового блока и юго-западной части ПЗ. При реконструкции Становой полей перемещений правдоподобной оказалась модель с наличием генеральных разломов, совпадающих с Джелтулакским и Тукурингрским разломами, разделяющих три тектонические структуры с Таким разными реологическими свойст-вами. образом, достоверность модели, учитывающей границу раздела более пластич-ных Монголо-Охотского складчатого пояса, Тынденско-Зейского блока и более жестких блоков Сутамского, Ларбинского, Селенга-Станового, Аргуно-Мамынского, Становой ПЗ, подтверждается GPS-наблюдениями. Помимо научного значения подобные модельные пос-троения имеют и прямой выход на практику, поскольку позволяют выявить участки струк-туры, где происходит концентрация напряже-ний, которые при разрядке могут вызвать катастрофические сейсмические события.

Для выяснения механизмов современных деформаций земной коры Верхнего Приамурья было проведено численное моделирование тектонических движений этого региона, в результате которого определено напряженно-деформированное состояние литосферы региона (рисунок).



Схема напряженно-деформированного состояния разломно-блоковых структур Верхнего Приамурья на основе схемы разломной тектоники, масштаб 1:2500000 (Государственная геологическая карта РФ N51, ВСЕГЕИ, 2012 г.).

На выбор места проведения исследований повлияло наличие большого объема геоморфологической, геологической и геофизической информации, полученной в ходе работ по изучению сейсмической активизации, и GPS-исследования на протяжении последних шести лет, а также крупнейшее для данной территории землетрясение 14.10.2011 г., М=6.0-6.5, в районе Сковородино [5] и оказавшее свое влияние катастрофическое землетрясение Тохоку (М=9.0) 11.03.2011 г., косейсмические сдвиги которого распространились на расстояние более 2300 км [6]. Наибольшие ко- и постсейсмические сдвиги, превышающие 40 и 18 мм соответственно, обнаружены к западу от эпицентра землетрясения на полуострове Корея и в южной части Приморского края. Максимальные смещения, зарегистрированные в г. Благовещенск и г. Зея, не превысили 5 и 4 мм соответственно.

Моделируемая область представляет собой чередование зон поднятий и депрессий, которое выражается в сочетании более пластичных Монголо-Охотского складчатого пояса, Тынденско-Зейского блока и более жестких блоков Сутамского, Ларбинского, Селенга-Станового, Аргуно-Мамынского, Становой ПЗ, в связи с чем в расчетной модели использовались два разных предела текучести материала. Предел текучести aj=51 МПа соответствовал более пластичным, а aj=78 МПа – более жестким материалам. Такой выбор реологических параметров объясняется разным составом пород.

В процессе исследования были решены две задачи: смоделировано поле напряжений, которое соответствует наблюдаемому полю сейсмичности, по данным сейсмологических служб России и КНР, а также смоделирован характер смещений по межблоковым границам, не противоречащий данным, полученным по GPS-измерениям.

Первоначально было опробовано множество расчетных схем деформирования блоков и выделен один вариант с наличием генеральных разломов, проходящих по Джелтулакскому и Тукурингрскому разломам, разделяющим три тектонические структуры с разными реологи-ческими свойствами. В данной модели межблоковые взаимодействия задавались как отсутствие проскальзывания между всеми блоками, за исключением «генеральных разломов», где задавалось трение по закону Кулона-Мора с коэффициентом к=0.7. Другой независимой характеристикой модели является величина толщины земной коры. В рамках приближения плоского напряженного состояния толщина элементов, моделирующих кору, задавалась для всего региона равной 40 км.

Как показывает моделирование, в пределах рассматриваемой системы блоков Верхнего Приамурья [7] современные напряжения концентрируются в двух зонах (рисунок):

1) в юго-восточной части Селенга-Станового блока вдоль Северо-Турингрского разлома;

2) в Становой ПЗ с переходом в Тынденско-Зейский блок вдоль Джелтулакского разлома.

Зоны с максимальными напряжениями пространственно совмещены с зонами «сейсмических брешей», а их минимальные значения характеризуются достаточно большим числом сейсмических событий.

Проведенное моделирование убедительно показывает, что, зная конфигурацию блоков мобильной 30ны, параметры современных движений, механизмы очагов землятрясений варьируя И можно адекватно граничными условиями, спрогнозировать области концентрации напряжений.

Полученные результаты измерений современных движений позволяют заключить, что районы максимальной дисперсии векторного поля скоростей пространственно совмещены с зонами повышенной сейсмичности, что говорит о современной активности существующих блоковых структур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мирошниченко А.И., Сорокин А.П., Саньков В.А., Лухнев А.В., Ашурков С.В., Сорокина А.Т., Серов М.А., Панфилов Н.И. Космическая геодезия в задачах геодинамики: современные движения в Зейско-Буреинском бассейне // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 73–81.

2. Сорокина А.Т., Сорокин А.П., Серов М.А. Отражение неотектонических процессов в подземной гидросфере Верхнего Приамурья // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 6. С. 43–56.

3. Ашурков С.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В., Сорокин А.П., Серов М.А., Бызов Л.М. Кинематика Амурской плиты по данным GPS-геодезии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 2. С. 299–311.

4. Быков В.Г., Бормотов В.А., Коковкин А.А., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Герасименко М.Д., Шестаков Н.В., Коломиец А.Г., Сорокин А.П., Сорокина А.Т., Серов М.А., Селиверстов Н.И., Магуськин М.А., Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф., Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Дучков А.Д., Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Адрюков Д.Г. Начало формирования единой сети геодинамических наблюдений ДВО РАН // Вестник ДВО РАН. 2009. № 4. С. 83–93.

5. Ханчук А.И., Сафонов Д.А., Коновалов А.В., Шестаков Н.В., Быков В.Г., Серов М.А., Сорокин А.А. Сильнейшее современное землетрясение в Верхнем Приамурье 14 октября 2011 г.: первые результаты исследования // Доклады Академии наук. 2012. Т. 445, № 3. С. 338–341.

6. Shestakov N.V., Takahashi H., Ohzono M., Prytkov A.S., Vasilenko N.F., Bykov V.G., Luneva M.N., Bormotov V.A., Gerasimenko M.D., Gerasimov G.N., Kolomiets A.G., Baek J., Park P.-H., Serov M.A. Analysis of the far-feld crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations // Tectonophysics. 2012. T. 524–525. C. 76–86.

7. Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. Масштаб 1:2500000. Объяснительная записка / Под ред. Л.И. Красного. Спб.–Благовещенск–Харбин, 1999. 135 с.

## SIMULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF THE CRUST IN UPPER PRIAMURYE

#### M.A. Serov

Institute of Geology and Natural Management, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russia

*Abstract.* Estimates of long-term crustal movements in the investigated region, and morphological and tectonic data provided the basis for making a mathematical model of block structure. Besides the geological data, the initial conditions for the start of the simulation involve seismic, geophysical and space geodesy data. Using the Upper Amur Region as an example, this work deals with possible mechanisms of development of block structure of the northeastern Central Asian folded belt described as an interaction between three tectonic structures: the Mongol–Okhotsk fold belt, and Eurasian and Amur lithospheric plates. Quantitative assessment of contemporary crustal movements and deformations is necessary for ensuring environmental safety of industrial and economic activities. The results obtained will provide a better understanding of the mechanisms of collisional interactions of lithospheric plates and the possibility to re-determine the location of the Eurasian and Amur plate boundaries within the studied area. *Keywords:* mathematical modeling, stress-strain state, crust, Upper Priamurye

\*\*\*

УДК 551.24

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКИХ ЗОН ДЕСТРУКЦИИ, ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МАГМАТИЗМА НА ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЕ ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА

## *А.П. Сорокин<sup>1</sup>*, С.И. Шерман<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, Россия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Рассмотрены геодинамический режим, магматическая и сейсмическая активность в позднем кайнозое на территории восточной окраины Центрально-Азиатского подвижного пояса. Эти явления обусловлены глубинными процессами, происходившими в межблоковых транзитных зонах по системам трансрегиональных и региональных разломов вдоль обрамления литосферных плит. В пределах динамического влияния сейсмогенных разломов (*M*≥3.7) рассмотрены условия формирования зон деструкции литосферы, активных в границах реального времени (в течение последних 50 лет), их положение и связь с очагами и групповыми концентрациями землетрясений.

Ключевые слова: геодинамический режим, зона деструкции, магматизм, сейсмическая активность, литосферная плита, разломно-блоковая структура

Рассматриваемая территория расположена в северо-восточной части Амурской литосферной плиты. К началу мезозоя она представляла собой континентальную окраину Азии, выделяемую по названию Амурского геоблока, состоящего из Суннэнь-Туранского и Буреинско-Цзямусы-Ханкайского композитных массивов [1].

В дальнейшем этот регион, подобно другим в зонах перехода от Тихого океана к континенту, прошел путь разноплановых геодинамических преобразований с разновозрастным магматизмом, повышенной сейсмичностью и локальными экзогенными процессами. Наиболее масштабно эти события проявились в два этапа: в среднеюрскораннемеловой и в эоцен-голоценовый. Первый из них связан с раздвиговыми движениями на юговосточной окраине Центрально-Азиатского подвижного пояса, в пределах Амурского геоблока, с образованием Восточно-Азиатского внутриконтинентального рифтогенного пояса, основу которого составляют Зейско-Буреинский бассейн и впадина Сунляо, преобразованные в позднем мезозое в молодые платформы. Процесс рифтогенеза сопровождался образованием систем Нэньцзян-Селемджинской, Муданьцзянской, Дэду-Даань-Белогорской, Намурхэ, Тан Лу и других трансформных и региональных разломов северо-восточного простирания, контролировавших Ичунь-Юйцюань-Нижнезейскую вулканоплутоническую ассоциацию, связанную с субдукцией литосферных плит (Изанаги и Тихоокеанской) [2].

Современный импульс активизации геодинамической и магматической активности в регионе связан с неотектоническим этапом. Его отличительная особенность – смена этапа растяжения земной коры периода рифтогенеза на одностороннее сжатие с юго-востока на северо-запад [3], обусловившее смещение литосферных плит: Амурской – в северовосточном, Евразийской – в восточном, а Охотоморской – в юго-западном направлении [4]. Геодинамические подвижки, происходившие на границе Амурской и Охотской литосферных плит, обусловили формирование разломно-блоковых структур более высоких порядков, взаимодействие которых осуществлялось преимущественно на контактах между блоками. В этих зонах наблюдается высокая концентрация напряжений земной коры, приводящая к нарушению устойчивости геологической среды и межблоковым деформациям, что нередко служило спусковым механизмом для формирования очагов землетрясений с различной магнитудой.

В это время произошла повторная деструкция северо-восточных систем рифтогенных разломов с образованием раздвиго-сдвиговых и сдвиговых зон, осложненных вновь сформированными молодыми позднекайнозойскими секущими нарушениями северо-западного направления, в узлах пересечения которых формировались узлы высокой степени проницаемости, сопровождаемые отдельными очагами и групповыми концентрациями землетрясений.

Участки современной деструкции выделены с помощью методики сейсмического мониторинга в пределах систем динамического влияния разломов (с  $M \ge 3.7$ ) [5]. Установлены зоны деструкции литосферы активных в границах реального времени (в течение последних 50 лет) тектонических нарушений. Основные из них: на севере – Монголо-Охотская, на западе – Нэньцзян-Селемджинская, в центре – Дэду-Даань-Белогорская, на востоке – Западно-Туранская, а на юге – Тан Лу [6]. С юга они ограничены широтными системами разломов Намурхэ и Сюньхэ-Бирской (рисунок).

Учитывая невысокий уровень сейсмичности зон современной деструкции литосферы Амурского геоблока, можно полагать, что они отражают начальную стадию развития сейсмической активности. Этим, видимо, объясняется и очаговый тип магматизма. В северо-западной части Нижнезейского бассейна, в системе Нэньцзян-Селемджинского разлома, магматиты представлены пироксеновыми базальтами и андезибазальтами палеоценового возраста, сходными по составу с позднемиоценовыми вулканитами, развитыми вдоль Западно-Туранского тектонического нарушения. Южнее, на правобережье Амура (КНР), широко известны поля эффузивов Жингпоху, Ноуминхэ, Келуо, Удалянчи, Ерекшан [7], контролируемые тектоническими нарушениями Намурхэ, Дэду-Даань-Белогорским и другими разломами, в которых К-Аг-датировками установлена наиболее детальная последовательность позднекайнозойского вулканизма. В частности, в поле Келуо начало извержений датируется миоценом (9.6 млн лет) [8, 9], затем плиоцен–голоценом (2.98–0.98 млн лет), с наиболее частыми событиями в интервалах 0.43–0.11 и 0.06–0.011 млн лет [10].

Формирование вышеприведенных кайнозойских магматических систем в пределах зон современной деструкции литосферы в Северо-Восточном Китае, по мнению С.В. Рассказова с соавторами [7], обусловлено смешением компонентов литосферных и подлитосферных источников, что позволило авторам рассматривать центральную часть провинции Хэйлунцзян с позиции «пассивного рифтогенеза», т.е. в условиях слабого растяжения литосферы.

Вместе с тем основные черты современной активизации региона вполне очевидны и во многом сходны с таковыми в Центральной Азии и на восточной окраине России. Это чередование стадий входящих и нисходящих движений разломноблоковых структур, а на участках их сопряжения, вдоль разновозрастных разломов, формирование зон высокой проницаемости с пульсационным проявлением магматической и сейсмической деятельности. Но в то же время различия в регматическом рисунке и геодинамическом режиме региона с возникновением вектора сжатия с юго-востока на северозапад обусловили образование крупных, преимущественно близширотных и северо-восточных Амуро-Мамынского, Суньу-Хинганского, Умлеканского и других поднятий, поперечных к мезозойским структурам [11]. Первые из них разделяют Амуро-Зейский и Нижнезейский, второй – Зейско-Буреинский и Сунляо, третий – Амуро-Зейский и Среднезейский бассейны.

Указанные события существенно изменили палеогеографическую обстановку Приамурья. Наряду с ранее существовавшим позднемезозойским южным перекосом поверхности массива (свода), возник новый – кайнозойский, с обратным, северным, падением. Первый из них по-прежнему определял существующий ранее сток поверхностных вод к югу, а второй на южной окраине Зейско-Буреинского бассейна изменил направление течения Амура с близмеридионального на широтное и юго-восточное. Началось затопление бассейна с интенсивным развитием эндогенных процессов вдоль его южного обрамления.



Эпицентральное поле землетрясений Приамурья и оси зон современной деструкции литосферы. 1-4 – землетрясения с магнитудами:  $1 - M \ge 5.4$ , 2 - M = 4.8 - 5.3, 3 - M = 4.3 - 4.7, 4 - M = 3.7 - 4.2; 5 -оси зон современной деструкции литосферы и их порядковые номера; 6 – трансрегиональные и региональные разрывные нарушения сложного строения по [1]; 7 – прочие разрывные нарушения по [1].

Таким образом, изменчивость указанных процессов свидетельствует о том, что резкоамплитудные геодинамические эффекты являются следствием глубинных процессов и в большинстве случаев интерпретируются как изменения напряженнодеформированного состояния блоков и межблоковых границ в транзитных зонах, вдоль обрамления вышеприведенных литосферных плит. Область динамического влияния их конвергентной границы проникает далеко в глубь Амурской плиты вдоль сейсмогенных разломов северо-восточного, близмеридионального и северо-западного направлений, контролируя участки повышенной проницаемости с каналами вулканизма и очагами землетрясений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15–55–53023–ГФЕН\_а).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. 1:2 500 000: Объяснит. зап. / Под ред. Л.И. Красного. СПб. – Благовещенск – Харбин, 1999. 135 с.

2. Лю Цзяци. Относительно формирования и эволюции континентальной рифтовой системы в Северо-Восточном Китае // Scientia Geologica Sinica. 1989. С. 210–216 (Пер. с кит.).

3. Goo Y.F., Wang P.J., Wang G.D. et al. Potential K/T boundary in Songliao Basin evolution // Proceedings of 2009 International Symposium on Geosciences in Northeast Asia / Ed. G. Sun, Y. Zhang. Changchun, 2009. P. 55–56.

4. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмогеодинамика Алдано-Станового блока // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 5–17.

5. Шерман С.И., Сорокин А.П., Савитский В.А. Новые методы классификации сейсмоактивных разломов литосферы по индексу сейсмичности // Доклады РАН. 2005. Т. 401. № 3. С. 395–398.

6. Шерман С.И., Сорокин А.П., Сорокина А.Т., Горбунова Е.А., Бормотов В.А. Новые данные об активных разломах и зонах современной деструкции литосферы Приамурья // Доклады РАН. 2011. Т. 439, № 5. С. 685–691.

7. Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В. Калиевая и калинатровая вулканические серии в кайнозое Азии. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2012. 351 с.

8. Zhang M., Suddaby P., Thompson R.N. et al. Potassic rocks in NE China: geochemical constraints on mantle / source and magma genesis // J. Petrol. 1995. V. 36, N 5. P. 1275–1303.

9. Zhang M., Suddaby P., O'Reilly S.Y. Nature of the lithospheric mantle beneath the eastern part of the Central Asian fold belt: mantle xenolith evidence // Tectonophysics. 2000. V. 328. P. 131–156.

10. Wang Y., Chen H. Tectonic controls on the Pleistocene–Holocene Wudalianchi volcanic field (northeastern China) // J. Asian Earth Sci. 2005. V. 24. P. 419–431.

11. Сорокин А.П., Махинов А.Н., Воронов Б.А., Сорокина А.Т., Артеменко Т.В. Эволюция бассейна Амура в мезозое-кайнозое и ее отражение в современной динамике рельефа // Вестник ДВО РАН, 2010. № 3. С. 72–80.

# FORMATION OF THE LATE CENOZOIC ZONES OF DESTRUCTION, EARTHQUAKE SOURCES AND MAGMATISM IN THE EASTERN MARGIN OF THE CENTRAL ASIAN MOBILE BELT

## A.P. Sorokin<sup>1</sup>, S.I. Sherman<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geology and Nature Management, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, Russia

<sup>2</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. Consideration is being given to the late Cenozoic geodynamic regime and magmatic and seismic events in the eastern margin of the Central Asian mobile belt. These phenomena are associated with deep processes occurring in the interblock transititional zones within transregional and regional fault systems along the margins of the lithospheric plates. Formation conditions of the real-time active lithosphere destruction zones (over the past 50 years), their location and relationships with earth-quake sources and clusters have been considered within the range of dynamic influence of seismogenic faults ( $M \ge 3.7$ ). *Keywords:* geodynamic regime, destruction zone, magmatism, seismic activity, lithospheric plate, fault-block structure

\*\*\*

УДК 528.45

## СОВРЕМЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ПРИМОРСКОГО КРАЯ

Д.В. Сысоев<sup>1,2</sup>, Н.В. Шестаков<sup>1,2</sup>, М.Д. Герасименко<sup>1,2</sup>, Г.В. Нечаев<sup>1,2</sup>,  $A.\Gamma.$  Коломиец<sup>1,2</sup>, Г.Н. Герасимов<sup>1,2</sup>, Н.А. Гагарский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия,

<sup>2</sup> Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, Россия

Ключевые слова: современные движения, Приморский край, GPS-геодезия

Современные движения и деформации земной коры Приморского края до сих пор изучены недостаточно, несмотря на то, что данный регион находится в зоне высокой глубокофокусной сейсмической активности и характеризуется большим количеством разрывных геологических структур, современная геодинамическая активность которых практически не исследована. Также на территории края неоднократно фиксировались мелкофокусные коровые землетрясения с магнитудой до 4–5. Наиболее сейсмоактивны в этом отношении южные и югозападные районы Приморья.

В середине 90-х годов прошлого столетия в Приморском крае начались периодические и непрерывные ГНСС наблюдения, выполняемые научными и производственными организациями. С начала XXI в. начала развиваться Приморская геодинамическая GPS-сеть, развернутая Институтом прикладной математики ДВО РАН совместно с Дальневосточным государственным университетом (ныне ДВФУ). В конце прошлого десятилетия ее пункты вошли в состав региональной геодинамической ГНСС сети ДВО РАН. Также на территории края непрерывно функционирует ГНСС пункт фундаментальной астрономо-геодезической сети России, а также периодически наблюдаются ГНСС пункты высокоточной геодезической сети РФ.

В настоящей работе собраны, обработаны и проанализированы данные периодических и непрерывных ГНСС наблюдений за период 1996–2015 гг. на 31 пункте, большинство из которых расположено на юго-западе Приморского края. Математическая обработка измерений выполнена в программном пакете BERNESEVer. 5.0.

В результате анализа полученных координатных рядов получены характеристики вековых движений и деформаций земной коры исследуемого региона в различных системах координат. Выявлены, оценены и промоделированы пространственные кои постсейсмические смещения земной коры, инициированные мегаземлетрясением Тохоку 11 марта 2011 года.

Abstract. Recent crustal movements and deformations in the Primorye Territory are still poorly understood. This region is situated in a high-level deep-focus seismic activity zone and characterized by a large number of geological faults whose recent geodynamic activity remains, however, almost unstudied. Besides, the territory repeatedly experienced shallow crustal earthquakes with magnitude of about 4-5. The most seismically active areas therein are located in the southern and southwestern Primorye. In the middle 1990s, the Primorsky Territory was covered by periodic and permanent GNSS-measurements made by industrial research teams. The early XXI century was marked by the beginning development of the Primorsky Geodynamic GPS Network deployed by the Institute of Applied Mathematics FEB RAS together with the Far East State University (now FEFU). By the end of the last decade, its sites became a part of the regional geodynamic GNSS network FEB RAS. In the territory there are also the GNSS permanent station form the Russian Fundamental Astro-Geodetic Network (FAGS) and the GNSS periodic stations from High-Precision Geodetic Network (HPGN) of the Russian Federation. The present work deals with collection, processing and analysis of the periodic and permanent GNSS measurement data 1996-2015 from 31 stations, with most of them located in the southwestern Primorsky Territory. The mathematical processing of measurements has been performed by BERNESE Software Ver. 5.0. The analysis of coordinates has yielded the characteristics of secular crustal movements and deformations in the investigated region in different coordinate systems. Identification, assessment and modeling have been made for crustal spatial co- and post-seismic displacements initiated by the March 11, 2011 Tohoku mega-earthquake. Keywords: recent movement, Primorye Territory, GPS-geodesy

\*\*\*

УДК 550.34

## КОРА И ВЕРХНЯЯ МАНТИЯ ПО ДАННЫМ ОБЪЕМНЫХ ВОЛН ДАЛЕКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПОД СТАНЦИЕЙ МАКСИМИХА

Л.Р. Цыдыпова<sup>1</sup>, С.И. Орешин<sup>2</sup>, Ц.А. Тубанов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Бурятский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Улан-Удэ, Россия

Аннотация. Совместной инверсией приемных функций, выделенных для направлений азимутов в пределах от 30 до 300° относительно широкополосной станции «Максимиха», расположенной в Байкальской рифтовой зоне, получены *P*- и *S*-скоростные модели коры и верхней мантии до глубины 300 км.

Ключевые слова: Мохо, скорость продольных и поперечных волн, Байкальская рифтовая зона, метод приемных функций

Изучение глубинного скоростного строения земной коры и верхней мантии, корово-мантийного перехода, прослеживание аномальных высоко-, низкоскоростных слоев дают ту необходимую для геологов и геодинамистов информацию, которая нужна им для реконструкции процессов, происходящих в земных недрах и находящих свое отражение в приповерхностных структурах. Одними из наиболее простых и недорогостоящих методов изучения глубинного строения Земли являются методы, в которых используются естественные источники – землетрясения, а в качестве приемников – стационарные сейсмостанции. В данной работе мы использовали метод приемных функций, состоящий в выделении обменных волн, образующихся на границах в недрах Земли при прохождении через них объемных продольных и поперечных волн от далеких землетрясений [1]. Метод является эффективным при исследовании скоростной структуры коры и мантии Земли под станцией в районе приема сейсмических волн.

Накопление цифровых записей далеких землетрясений велось на широкополосных стационарных сейсмостанциях Селенгинской локальной сети. Коллекции телесейсмических записей одной из таких сейсмических станций – сейсмостанции «Максимиха» – позволили выделить приемные функции *P*- и *S*-волн. В зависимости от типа падающей на границу волны существуют два способа выделения обменных волн – метод приемных функций *P* и метод приемных функций *S*.

В методе приемных функций Р [1, 2] интересующие нас волны распространяются от источника как продольные, а на границах в области сейсмической станции преобразуются в поперечные. Проходя путь от границы обмена к поверхности с меньшей скоростью по сравнению с рефрагированной продольной волной *P* обменные волны *Ps* вступают на записи с некоторым запаздыванием по отношению к волне Р. Для оптимального выделения Ps волн исходная трехкомпонентная запись ZNE преобразуется в запись на компонентах LQT, где ось L соответствует главному направлению поляризации в P, ось Q перпендикулярна ей, совпадает с SV, ось Т перпендикулярна плоскости LQ. Амплитуды обменных волн Ps, входящих в коду P-волны, малы и составляют несколько процентов от амплитуды падающей волны P, поэтому амплитуду Ps волны, связанную с некоторой конкретной глубиной, можно усилить, просуммировав колебания на Q компонентах, полученных описанным выше способом, от множества источников, расположенных на телесейсмических расстояниях. Записи от таких источников отбираются на эпицентральных расстояниях от 35 до 90° с различными азимутами, с четким вступлением Р волны и магнитудой ( $M_b$ ) не менее 5.5. В результате было отобрано 110 трехкомпонентных сейсмограмм, отфильтро-ванных в диапазоне периодов от 3 до 30 с и стандартизированных деконволюционным фильтром.

В методе приемных функций S [3] интересующие нас волны распространяются от источника как поперечные, а на границах в области сейсмической станции преобразуются в продольные. Проходя путь от границы обмена к поверхности с большей скоростью по сравнению с родительской, поперечной волной S, обменные волны Sp вступают на записи с некоторым опережением по отношению к волне S. Отбор S-волн выполнялся для расстояний от 65 до 90°. Из всего набора имеющихся данных удалось отобрать 16 сейсмограмм с удовлетворительными записями S-волн. Для выявления Sp фаз исходная трехкомпонентная сейсмограмма с компонентами Z, N, E преобразуется в компоненты L, Q, B, A. Ось Qсоответствует направлению поляризации S-волны в плоскости ее распространения, т.е. в плоскости, содержащей источник-приемник. Ось L, перпендикулярная оси Q, расположена в той же плоскости и является оптимальной компонентой для обнаружения Sp-фаз. Ось A соответствует главному направлению движения частиц в волне S в горизонтальной плоскости. Ось В перпендикулярна оси А в горизонтальной плоскости. Аналогично процедуре *Р* приемных функций колебание на L-компоненте стандартизуется деконволюционным фильтром для устранения различий в магнитуде и функций в очаге.

Полученные стандартизованные суммарные наблюденные колебания на *Q*-компоненте на интервале времени от 0 до 35 с и на *L*-компоненте на интервале времени от -45 до 0 с используются для совместного обращения функций приемника. Принятые временные интервалы позволяют вычислить скоростной разрез до глубины 300 км. Входными данными являются также средние кажущиеся скорости и углы падения P- и S-волн. Предполагается, что среда в окрестности сейсмической станции является изотропной горизонтально-слоистой. Пробная модель описывается девятью слоями и параметрами: скоростями P- и S-волн  $V_P$  и  $V_S$ , плотностью и мощностью каждого плоского слоя. Для каждой пробной модели вычисляются синтетические Q и L составляющие для Ps- и Sp-волн соответственно.

Минимизация осуществляется методом «simulated annealing» [4]. Метод предполагает построение последовательности моделей, сходящейся в среднем к минимуму целевой функции. Стартовая модель выбирается случайно в пределах предполагаемой области решений. Каждая последующая модель вычисляется как слабое возмущение предшествующей. Таким образом, часть вычисленных моделей копируется в последовательность, ведущую к решению задачи, а другая часть отбрасывается. Результат совместного обращения данных *P*- и *S*приемных функций представлен на рисунке.



Скорости продольных и поперечных волн и отношение скоростей в коре и верхах мантии по результатам совместной инверсии приемных функций в районе сейсмостанции МХМ.

Толстые линии определяют интервалы, в которых варьируются скорости в соответствующих интервалах изменения глубин. Распределение цветов в области допустимых значений изменения параметров отражает гистограмму распределения скоростей в процессе поиска оптимального решения. Сплошными черными линиями представлены скорости *P*и *S*-волн, соответствующие стандартной модели Земли [5]. В правой части рисунка черная линия представляет априорное распределение отношения  $V_{\rm P}/V_{\rm S}$  с глубиной.

Полученные результаты показывают перспективность глубинных исследований с помощью широкополосных станций и возможность развития стационарной сети таких станций в регионах со сложной тектоникой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Vinnik L.P. Detection of P to SV in the mantle // Phys. Earth planet. Inter. 1977. V. 15. P. 39-45.

2. Бурмаков Ю.А., Винник Л.П., Косарев Г.Л. и др. Структура и динамика литосферы по сейсмическим данным. М.: Наука, 1988. 221 с.

3. Farra V., Vinnik L.P. Upper mantle stratification by P and S receiver functions // Geophys. J. Int. 2000. V. 141. P. 699–712.

4. Vosegaard K., Vestergaard P.D. A simulated annealing approach to seismic model optimization with sparse prior information // Gephys. Prospect. 1991. V. 39. P. 599–611.

5. Kennett B.L.N. IASPEI91 Seismological Tables. Canberra: Australian National University, 1991. 167 p.

#### THE CRUST AND UPPER MANTLE FROM THE DATA ON BODY WAVES FROM DISTANT EARTHQUAKES BENEATH THE MAKSIMIKHA STATION

L.R. Tsydypova<sup>1</sup>, S.I.Oreshin<sup>2</sup>, Ts.A. Tubanov<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup> Geological Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

<sup>2</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Buryat Branch of the Geophysical Survey, the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

*Abstract. P-* and *S-*velocities in the crust and upper mantle have been determined for 300 km depth using joint inversion of receiver functions with directions of azimuths ranging from 30° to 300° relative to the «Maksimikha» broadband station located in the Baikal rift zone.

Keywords: Moho, P- and S- wave velocity, Baikal rift zone, receiver function method

\*\*\*

УДК 550.34+551.24(571.53/55)

## К «ЗАКРЫТИЮ» БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

## А.В. Чипизубов

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Сейсмотектонические деформации в зонах основных активных разломов Прибайкалья при палеоземлетрясениях и Муйском землетрясении 1957 г. характеризуются разрывными структурами сжатия. Наличие складчатости и взбросовых разрывов в отложениях Байкальской и Баргузинской впадин подтверждает существование геодинамического режима сжатия. Косвенные данные по механизму очагов землетрясений и по GPS-геодезии сомнительны или малодостоверны, поэтому ни о каком рифте в Прибайкалье не может быть и речи.

*Ключевые слова:* кинематика сейсмотектонического разрыва и активного разлома, механизм очага землетрясения, геодинамический режим

За последние 25 лет палеосейсмологическими вскрытием исследованиями co палеосейсмодислокаций (ПСД) горными выработками было установлено, что основной структурный линеамент (разлом Обручева) Байкальской рифтовой зоны для всех его составляющих систем (кулис) от Тункинского до Кичерского разлома характеризуется сейсмогенными разрывами, формировавшимися в условиях сжатия (надвиги, взбросы сдвиго-взбросы и взбросо-сдвиги) [1]. Сейсмогенные деформации такого же типа установлены в зоне Баргузинского разлома, в карьере близ селения Сухая. Надвигание коренных пород (видимая амплитуда до 30 м) на рыхлые четвертичные отложения по зоне Обручевского разлома прослеживается в карьере на территории бывшей автобазы в пос. Култук. Прекрасно выражены взбросовые и надвиговые разрывы (рис. 1) в зоне Приморского разлома в 20-30-метровом эрозионном уступе по правому борту р. Сарма. Надвиговые структуры, как уступообразующие, так и погребенные (слепые), отлично проявляются на георадиолокационных разрезах по зоне этого разлома в пределах Сарминской ПСД (рис. 1). О взбросовой и взбросо-надвиговой природе палеосейсмодислокаций и активных разломов свидетельствует их дугообразность в плане в соответствии с рельефом на различных масштабных уровнях.

Наличие складчатости в отложениях впадины Байкала, установленной сейсмическим профилированием, и взбросов, выделенных при интерпретации сейсмопрофилей, может свидетельствовать только о режиме сжатия с сокращением отложений до нижнего плиоцена (5.3 млн лет) на 10 % и более. Моноклинальное залегание отложений Танхойского третичного поля под углами до 30° свидетельствует о таком же сокращении. Учитывая, что эти отложения находятся и в самой впадине Байкала, сокращение пространства, занимаемого ими, составит 4.0-4.5 км, а скорость сокращения - 1.6-1.8 мм/год. В отложениях Баргузинской впадины, по данным сейсморазведки на основе отраженных волн (ОГТ), помимо сбросовых разрывов проявляются и взбросовые с амплитудой до 100 м. При другой интерпретации временных разрезов некоторые из сбросов могут перейти даже во взбросы, как самый СЗ разрыв вблизи Шаманского отрога. Более того, могут быть выделены и надвиги.



Рис. 1. Строение Приморского разлома в разрезе (правый борт долины Сармы). Внизу три фрагмента георадарных разрезов с надвиговыми смещениями в других местах Сарминской ПСД. Врезка над траншеей (Т-9) – интерпретация верхней части георадарного разреза, пройденного в этом месте. *1* – обнажения коренных пород в субвертикальной стенке обрыва; *2* – коренные породы на крутом склоне, слегка перекрытые склоновыми образованиями; *3* – рыхлые делювиально-пролювиальные отложения; *4* – сейсмотектонический уступ Сарминской ПСД; *5* – сместители разрывов, выделенные уверенно (а) и предполагаемые (б); *6* – верхняя граница крутой стенки обрыва (а) и задранная древняя терраса Сармы (б).

При Муйском разрывообразующем событии 1957 г. сформировались сейсмотектонические дислокации, которые интерпретируются левыми и взбросо-сдвигами, и сдвиго-сбросами, хотя имеются неопровержимые доказательства правосдвиговых смещений и возникновения самостоятельных валов сжатия и складок [2]. При первоначальном обследовании Р.А. Курушин [3] выделил только взбросовые деформации с поперечными сколами (сдвигами). По мнению В.П. Солоненко [2], хребет Удокан надвинулся под углом 70° на Намаракитскую впадину и сдвинулся к северо-востоку, что свидетельствует о левом взбросо-сдвиге и предполагает рамповую природу Намаракитской впадины. Р.А. Курушин и др. [4] считают, что осредненным результатом сейсмотектонических движений при Муйском землетрясении был левосторонний сдвиго-сброс, отмечая при этом такое объяснение непростым.

На схемах сейсмодислокаций [2] имеется пять мест с указанием направления и амплитуды сдвига, причем в трех случаях указаны реперы, из которых только два представляются надежными. В одном из них правым сдвигом смещен на 1.05 м корень дерева по основному субширотному разрыву (левая врезка на рис. 1), а в другом левым сдвигом смещена тропа на 1 м по поперечному оперяющему разрыву (правая врезка на рис. 2). Разорванное дерево с амплитудой левого сдвига в 1.0–1.2 м (врезка *а* на рис. 2.1) не может являться репером, так как под водой на глубине в 1 м такой сдвиг совсем исчезнет, если не станет правым. Поскольку при обследова-

нии эпицентральной области сейсмотектонические уступы не вскрывались, сейчас уже трудно отдать предпочтение сбросовому или взбросовому их генезису. Однако на схемах сейсмодислокаций даже уступы, показанные как сбросовые, на самом деле являются взбросовыми (обратные уступы с опущенным нагорным крылом, асимметричные валы, осложненные разрывами, и уступы в комбинации с трещиной сжатия, как показано на врезке 2.1.б). Даже уступ в комбинации с трещиной растяжения (правая врезка на рис. 2) может быть только взбросовым. Один из асимметричных валов, обусловленный взбросо-надвигом, блокировал ручей с образованием озерка (см. врезку а на рис. 2.1). Наиболее достоверные данные и их объективная интерпретация указывают на то, что сейсмотектонические движения по основным разрывам обусловлены правым сдвиго-взбросом.

В настоящее время прямым данным о наличии геодинамического режима сжатия в Прибайкалье противоречат только косвенные данные по механизму очагов землетрясений и по GPS-геодезии. Остановимся на основных слабых положениях и допущениях этих косвенных данных.

Противоречивость данных GPS-геодезии у различных исследователей, а также по сетям наблюдений с короткой и длинной базой делает получаемые результаты сомнительными. Например, данные GPS-наблюдений указывают на сближение Туранской и Иранской плит со скоростью 30 мм/год, тогда как высокоточные геодезические измерения (нивелировка I класса и светодальномерные) на Копетдагском полигоне за 30-40 лет показали полное отсутствие систематического тренда горизонтальных и вертикальных смещений [5]. По В.Ю. Тимофееву [6], измеряемые скорости движения (10<sup>-8</sup> в год) в Прибайкалье на порядок меньше (0.5-1.0 мм/год) даже точности определения координат пунктов GPS-наблюдений. Еще больше увеличивает сомнения регистрация суперинтенсивных (до 50-70 мм/год) движений, особенно в асейсмичных областях, зачастую превосходящих таковые в сейсмоактивных зонах [7]. Данное обстоятельство может указывать на то, что измеряются не тектонические движения, а, как считает Ю.О. Кузьмин [7], движения земной поверхности, вызванные крайне малыми воздействиями природного или техногенного генезиса.

Изучение очага землетрясения представляет собой значительно более трудную (обратную) задачу по сравнению с изучением строения Земли. В настоящее время считается, что информация о смещениях и условиях вспарывания в очаговой зоне заключена в динамических характеристиках сейсмических волн, т.е. в формах записи колебаний. Однако эти формы сильно искажаются как регистрирующей аппаратурой, так и условиями распространения волн в неоднородной и малоизвестной среде в дальней зоне и наложением волн различных типов (суперпозицией) в ближней зоне. При постановке обратной задачи рассматривается упругая однородная (изотропная) среда с допущением, что известны точные характеристики плотности, упругости, скоростей различных сейсмических волн и других параметров, поэтому решение обратной задачи некорректно и динамическая задача теории очага в общем виде не разрешима [8].

На начальных этапах определения механизмов очагов исследователи опирались на характер вступления продольных сейсмических волн. При этом допускалось, что разнополярность первых вступлений *P*-волны соответствует сжатию и разряжению, не говоря уже о *S*-волнах, вступления которых еще труднее выделить, и тем более о поверхностных, которые не являются очаговыми. Обычно знаки (уверенно определяемые) первых вступлений *P*-волн имеются на ограниченном числе станций и на некоторых из них могут быть ложными [9]. Надежное выделение первого вступления даже в *P*-волне требует корреляции записей на многих станциях [10].

Следует отметить, что возникновение сбросовых разрывов при режиме сжатия – абсолютно нормальное явление. В одних случаях они являются локальными элементами структур сжатия, а в других – действительными сбросами, но гравитационными. В таком типе они могут формироваться на отдельных фрагментах сдвигов с соответствующей ориентировкой (структуры типа pull-apart) как компенсационные (листрические) смещения взброшенного крыла или как отражение вторичных напряжений растяжения поперек основных структур в виде широких и переуглубленных долин-трещин (оз. Гарда и др. в Альпах, долина р. Холодной и др. в Прибайкалье.)



Рис. 2. Сейсмодислокации Муйского землетрясения 1957 г. по В.П. Солоненко [2] с небольшими изменениями и добавлениями на врезках. *I* – коренные образования (а) и рыхлые четвертичные отложения (б); 2 – взбросовые уступы и их высота, м; *3* – трещины сжатия; *4* – валы и складки; *5* – сбросовые уступы и их высота, м; *6* – трещины растяжения: *7* – рвы и их ширина, м; *8* – сколы и сдвиги с направлением и амплитудой смещения, м.

Невозможно даже представить, что при субвертикальном сжатии, направленном снизу вверх и превышающем тангенциальные напряжения и тем более литостатическое давление, какой-либо тектонический блок проникнет в недоступные для него глубины. Такое возможно только при заталкивании блока (поддвиг или надвиг) при режиме субгоризонтального сжатия. По этой причине ранее сбросы рассматривались как гравитационные разрывы. Исходя из вышеприведенного, разрывы из комбинации сдвига (структура сжатия) и сброса (структура растяжения) в природе не существуют. При появлении сдвигового напряжения (≠90° по горизонтали к ослабленной зоне) и уже вне зависимости от угла по вертикали проявится сдвиго-взброс. Сбросовый тип механизма очагов может наблюдаться у слабых ( $M \le 5.5$ ) событий в узкой зоне растяжения срединноокеанических хребтов, занимающей, по П.Н. Кропоткину [11], только 5 % земной поверхности, или у некоторых афтершоков с  $M \le 7$  от сильнейших ( $M \ge 8$ ) землетрясений.

Прямые данные по палеосейсмологии и третично-четвертичной геологии свидетельст-вуют, что впадины байкальского типа формировались и продолжают формироваться сейчас в условиях сжатия и, соответственно, не являются рифтовыми.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чипизубов А.В. Современная геодинамика Прибайкалья // Материалы Международной конференции «Геологогеофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности». Нерюнгри: Изд-во Технического института (ф) ВСФУ, 2015. С. 259–266.

2. Солоненко В.П. Живая тектоника в плейстосейстовой области Муйского землетрясения // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1965. № 4. С. 58–70.

3. Курушин Р.А. Плейстосейстовая область Муйского землетрясения // Геология и геофизика. 1963. № 5. С. 122–126.

4. Курушин Р.А., Мельникова В.И., Гилева Н.А. Муйское землетрясение 27 июня 1957 г. (Сейсмологические и сейсмологические данные) // Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии: Материалы Всероссийского совещания с международным участием. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. Т. 1. С. 193–202.

5. Гаипов Б.Н., Изюмов С.Ф., Кузьмин Ю.О. Результаты многолетних геодеформационных наблюдений в Копетдагском сейсмоактивном регионе // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. Т. 2. С. 14–16.

6. Тимофеев В.Ю. Скорости деформаций и сильные землетрясения Северного Тянь-Шаня и Байкальского региона // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. Т. 1. С. 118–121.

 Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломов: активность, опасность, механизм формирования // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. Т.1. С. 66–68.

8. Воронина Е.В. Механика очага землетрясения. М.: Физический факультет МГУ, 2004. 92 с.

9. Захарова А.И., Чепкунас Л.С. Массовое определение механизмов очагов землетрясений // Современная динамика литосферы континентов. М.: Недра, 1989. С. 174–182.

10. Балакина Л.М. Механизм очагов землетрясений // Современная динамика литосферы континентов. М.: Недра, 1989. С. 169–174.

11. Кропоткин П.Н. Тектонические напряжения в земной коре // Геотектоника. 1996. № 2. С. 3–15.

#### TO THE «CLOSURE» OF THE BAIKAL RIFT ZONE

#### A.V. Chipizubov

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Seismotectonic deformations in the major active fault zones of the Baikal region, related to palaeoearthquakes and the Muya earthquake of 1957, are characterized by faulting in areas of compression. The presence of folding and reverse-slip faults in the sediments of the Baikal and Barguzin basins confirms the existence of geodynamic compression mode. However, indirect evidence such as earthquake focal mechanisms and GPS geodetic data are uncertain or unreliable. Therefore, any rift in the Baikal region is out of the question.

Keywords: kinematic, seismotectonic rupture and active fault, earthquake focal mechanism, geodynamic regime

\*\*\*

УДК 550.42:551.14+551.21+552.333(51)

## КОНТРОЛЬ ВУЛКАНИЗМА В ЗОНАХ ТРАНСТЕНСИИ АЗИИ: СМЕНА ИСТОЧНИКОВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ЛИТОСФЕРЫ–АСТЕНОСФЕРЫ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИЯХ 1720–1721 гг. НА ПОЛЕ УДАЛЯНЬЧИ (КИТАЙ)

И.С. Чувашова<sup>1, 2</sup>, С.В. Рассказов<sup>1, 2</sup>, Йи-минь Сунь<sup>3</sup>, Чэнь Янг<sup>3</sup>, Чжэньхуа Сие<sup>3</sup>, Чжэньсин Фэн<sup>3</sup>, Дзингхуа Ван<sup>3</sup>, Т.А. Ясныгина<sup>1</sup>, Е.В. Саранина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Институт вулканов и минеральных источников Хэйлунцзянской академии наук, Удаляньчи, Хэйлунцзян, Китай

*Аннотация.* Геохимические исследования вулканических пород поля Удаляньчи свидетельствуют о пространственновременной смене компонентов, обусловленной непосредственным контролем выплавок эволюционирующей транстенсионной структуры литосферы.

Ключевые слова: Китай, калиевая порода, активный вулкан, транстенсия

Транстенсия представляет собой результат косого растяжения литосферы – сочетание ее растяжения со сдвигом [1]. Синвулканические транстенсионные деформации литосферы могут отражать два возможных варианта контроля магматических процессов. Один предполагает поднятие выплавок из подлитосферной мантии, которые маркируют проницаемые участки литосферы в зоне транстенсии без вовлечения в плавление литосферного материала. В продуктах вулканических извержений такой зоны различается только материал источников подлитосферной мантии. Структура литосферы не влияет на компонентный состав излившегося магматического материала. Другой вариант обозначает непосредственный контроль плавления литосферных источников эволюционирующей транстенсионной структуры. В этом случае пространственновременная смена литосферных и подлитосферных компонентов служит прямым отражением характера эволюции зоны транстенсии.

Активность эшелонированных вулканических построек, контролирующихся субширотными или субмеридиональными транстенсионными структурами, показательна лишь для особых тектонически активных территорий Азии. Так, вулканизм характерен для транстенсионных сегментов Байкальской рифтовой зоны. В субмеридиональном Камарском сегменте вулканизм ограничен временным интервалом 18-12 млн лет назад, в субширотном Муя-Удоканском проявился на Удоканском вулканическом поле в последние 14 млн лет, а в субмеридиональном Ципа-Муяканском – на Витимском поле в интервале 16.0-0.6 млн лет назад [2, 3]. Другая территория с ярко выраженной транстенсией литосферы – район хребта Восточный Хангай. Южнее этого хребта, в Долине Озер, кулисообразный характер субширотных вулканоконтролирующих структур проявился 32-31 млн лет назад. В осевой части хребта и севернее его вулканизм получил развитие в субширотных левосторонних транстенсионных сегментах в интервале 17.0-8.0 млн лет назад. Между Восточным и Центральным Хангаем активизировался субмеридиональный правосторонний Чулутынский транстенсионный сегмент, в целом позже, в интервале

9.6–2.1 млн лет назад [4]. Имеются авулканичные транстенсионные сегменты (например, Рель-

Верхнеангарский Байкальской рифтовой зоны). Часть известных сейсмоактивных сдвиговых разломов (например, Болнайский) не оказывала влияния на конфигурацию вулканических полей и отражала малоглубинные смещения тектонических блоков коры.

Сдвиговые движения получили широкое развитие по субмеридиональным разломам в Восточной Азии (например, разломы Танлу-Курский, Цусимский, Центрально-Сихотэ-Алинский). Оценки временных интервалов левосторонних и правосторонних движений по этим разломам, однако, противоречивы [5–7]. В настоящей работе мы приводим прямые аргументы в пользу единой транстенсионной природы литосферной расплавной аномалии вулканической зоны Удаляньчи, простирающейся в субмеридиональном направлении на 230 км в районе северного замыкания бассейна Сунляо [8, 9].

Бассейн образовался в средней юре – палеогене. Породы зоны Удаляньчи датированы временным интервалом последних 4.6 млн лет [10]. Содержания К<sub>2</sub>О в вулканических породах последовательно расширяются от южного поля Еркешан (5.6-5.8 мас.%), через поля Удаляньчи (3.2-6.0 мас.%), Келуо (4.0-7.0 мас.%) к северному полю Сяогулихе (2.0-9.5 мас.%). В четвертичных породах вулканического поля Удаляньчи определен диапазон концентраций K<sub>2</sub>O 4.8-6.0 мас. Ус относительным снижением содержаний этого оксида в породах начала и конца вулканической эволюции. В начальных лавовых потоках, излившихся в субмеридиональной полосе Лаошантоу – Древний Гелакюшан в интервале 2.5-2.0 млн лет назад, содержания K<sub>2</sub>O составляли 3.9-5.2 мас.%, на финальном конусе вулкана Хуошаошан, образовавшемся в 1721 г., снижались до 3.2 мас.%.

На вулканическом поле различается фоновая активность, не упорядоченная во времени и пространстве, и направленная активность, характеризующаяся последовательным смещением вулканических построек. Фоновая активность проявилась на вулкане Южный Гелакюшан и вулканах субширотной полосы Лианхуашан, Йаокуаншан, Западный Дзяодебушан, Западный Лонгменшан во временном интервале 1.3–0.8 млн лет назад. В последние 0.6 млн лет извергались вулканы трех групп: западной (Северный Гелакюшан, Лианхуашан, ДзианшанДзиамшанзи), центральной (Уохушан, Бидзиашан, Лаохейшан, Хуошаошан) и восточной (Уэйшан, Восточный Дзяодебушан, Сяогошан, Западный и Восточный Лонгменшан, Молабушан). В западной и восточной группах фоновая активность продолжалась, в то время как в центральной группе активность вулканов последовательно смещалась с югозапада на северо-восток. Именно такая упорядоченная вулканическая эволюция привела к относительному снижению содержаний К<sub>2</sub>О в продуктах финальных извержений вулкана Хуошаошан.

Из анализа содержаний K<sub>2</sub>O, других петрогенных оксидов и микроэлементов в породах ранних и поздних фаз извержений центральной группы вулканов следует, что составы построек первого вулкана (Уохушан) почти не отличались от фоновых, второго и третьего вулканов (Бидзиашан и Лаохейшан) были частично близки к фоновым и частично отличались от них, а четвертого (Хуошаошан) существенно отличались от фоновых.

Предполагается, что генерация магм под вулканическим полем Удаляньчи контролировалась развитием субмеридиональной правосторонней зоны транстенсии в граничном слое основания литосферы, разделявшем и экранировавшем источники подстилающей гомогенной подлитосферной конвектирующей мантии и перекрывающей гетерогенной обогащенной литосферы. Подлитосферный источник магм обладал отношением <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=0.7052, источники экранирующего слоя – таким же и более низкими отношениями, источники вышележащей литосферы – таким же и более высокими отношениями. Развитие транстенсии определяло время и место локального поступления компонента конвектирующей мантии из-под граничного экранирующего слоя на фоне плавления обогащенного материала над ним.

Локальные извержения подлитосферных выплавок из осевой части субмеридиональной магистральной зоны транстенсии интервала 2.5–2.0 млн лет назад сменились в интервале 1.3–0.8 млн лет назад извержениями фоновых выплавок из более широкого транстенсионного сегмента обогащенной области литосферы. В последние 0.6 млн лет фоновые выплавки из обогащенной литосферы резче обозначили краевые части транстенсионного сегмента, а локальные подлитосферные выплавки распространились вдоль разрыва, образовавшегося в граничном экранирующем слое благодаря концентрации тектонических усилий в центральной части транстенсионного сегмента.

Работа выполнена в Китайско-Российском исследовательском центре Удаляньчи–Байкал по новейшему вулканизму и окружающей среде.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Neuendorf K.K.E., Mehl J.P., Jr., Jackson J.A. Glossary of geology. Fifth edition, revised. American Geosciences Institute, Alexandria, Virginia, 2011. 783 p.

2. Рассказов С.В. Вулканизм и структура северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 4. С. 60–70.

3. Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В. Калиевая и калинатровая вулканические серии в кайнозое Азии. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО», 2012. 351 с.

4. Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Михеева Е.А., Снопков С.В. Култукский вулкан: пространственно-временная смена магматических источников на западном окончании Южно-Байкальской впадины в интервале 18– 12 млн лет назад // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. V. 4, № 2. P. 135–168. doi:10.5800/GT2013420095.

5. Рассказов С.В., Логачев Н.А., Иванов А.В. Корреляция позднекайнозойских тектонических и магматических событий Байкальской рифтовой системы с событиями на юго-востоке Евразиатской плиты // Геотектоника. 1998. № 4. С. 25–40.

6. Halim N., Cogne J.-P., Chen Y., Atasiei R., Courtillot V., Gilder S., Marcoux J., Zhao R. New Cretaceous and Early Tertiary paleomagnetic results from Xining-Lanzhou basin, Kunlun and Quigtang blocks, China: implications on the geodynamic evolution of Asia // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103 (B9). P. 21025–21045.

7. Jolivet L., Tamaki K., Fournier M. Japan Sea opening history and mechanism: A synthesis // Journal of Geophysical Research. 1994. V. 99(22). P. 237–259.

8. Чувашова И.С., Рассказов С.В., Лиу Я., Менг Ф., Ясныгина Т.А., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В. Изотопнообогащенные компоненты в эволюции позднекайнозойского калиевого магматизма провинции Хейлонгджанг, Северо-Восточный Китай // Известия Иркутского государственного университета. Серия наук о Земле. 2009. Т. 2, № 2. С. 181– 198.

9. Чувашова И.С., Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Саранина Е.В., Фефелов Н.Н. Голоценовый вулканизм в Центральной Монголии и Северо-Восточном Китае: асинхронное декомпрессионное и флюидное плавление мантии // Вулканология и сейсмология. 2007. № 6. С. 19–45.

Zhao Y-W., Li Ni., Fan Q-C., Zou H., Xu Y-G. Two episodes of volcanism in the Wudalianchi volcanic belt, NE China: Evidence for tectonic controls on volcanic activities // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2014. V. 285. P. 170–179. dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.016.

#### CONTROL OF VOLCANISM IN TRANSTENSIONAL ZONES OF ASIA: CHANGE OF SOURCES AT A LITHOSPHERE–ASTHENOSPHERE BOUNDARY LAYER DURING THE 1720–1721 ERUPTIONS IN THE WUDALIANCHI FIELD, CHINA

# I.S. Chuvashova<sup>1, 2</sup>, S.V. Rasskazov<sup>1,</sup> 2, Yi-min Sun<sup>3</sup>, Chen Yang<sup>3</sup>, Zhenhua Xie<sup>3</sup>, Zhenxing Fang<sup>3</sup>, Jinghua Wang<sup>3</sup>, T.A. Yasnygina<sup>1</sup>, E.V. Saranina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Volcano and Mineral Spring, Heilongjiang Academy of Science, Wudalianchi, Heilongjiang, China

*Abstract.* Geochemical study of volcanic rocks from the Wudalianchi field demonstrates spatial-temporal change of components due to the direct control of melting by evolving transtensional structure of the lithosphere. *Keywords*: China, potassic rock, active volcano, transtension

\*\*\*

УДК 551.24+550.34

## СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ КАК ВЕДУЩИЙ ФАКТОР ЛОКАЛИЗАЦИИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

## С.И. Шерман

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Сильные землетрясения ( $M \ge 8$ ) последнего столетия в Центральной Азии концентрируются в специфической геодинамической зоне, характеризующейся высокими напряжениями, утолщенной земной корой и пониженной вязкостью горной массы. Необходимые высокие напряжения генерируются индентором (Индостанская плита), их накопление обеспечивается специфическим геодинамическим окружением, а нужная высокоамплитудная реализация по разрывам облегчается относительно пониженной вязкостью среды.

*Ключевые слова:* вязкость, геодинамическая зональность, геодинамика, земная кора, литосфера, напряжение, разлом, реология, сейсмичность, сильное землетрясение, Центральная Азия

Сильные землетрясения (М≥8) в континентальной литосфере Центральной Азии в течение последнего столетия зафиксированы на относительно ограниченной территории, образующей треугольную или трапецивидную структуру [1-3 и мн. др.], пространственно не совпадающую с соизмеримыми по площади известными геоморфологическими или тектоническими формированиями. Генетическая связь локализации очагов сильных землетрясений однозначно и, безусловно, справедливо рассматривается с зонами крупных разломов. Трансрегиональным энергетическим источником высоких напряжений, обеспечивающим сейсмогенерирующие подвижки по разломам и их разрядку в форме сильных землетрясений, общепринято считать континентальную коллизию Индостанской и Евроазиатской плит. К настоящему времени остаются недостаточно изученными вопросы формирования контуров и геодинамической специфики территории с локализацией сильных землетрясений [4]. Затрудняются разработки моделей среднесрочного прогноза сильных событий. Отсюда понимание геодинамической ситуации, обеспечивающей локализацию сильных землетрясений в континентальной литосфере Центральной Азии, приобретает научное и сугубо социальное значение.

Для понимания локализации сильных землетрясений изучена геодинамическая зональность огромной территории Центральной Азии, в которой район их фиксирования занимает центральное место. В основу систематизации геодинамической зональности положены геодинамические параметры литосферы и/или земной коры, характеризующие как исследуемую территорию, так и ее окружение (рисунок).

Основная, центральная геодинамическая зона – регион сильнейших континентальных землетрясений (территория Гималаев, Памира, Тянь-Шаня и Тибета) – сфера максимального влияния континентальной коллизии, активнейшая часть громадного Альпийско-Гималайского коллизионного пояса, ослабленное влияние которого достигает Южного Прибайкалья [4]. Территория характеризуется последовательным с юга на север изменением геологогеофизических параметров литосферы. Видоизменяются формы и размеры блоковых структур, уменьшается толщина земной коры с>74 в Тибете до ~42 км в Тариме и Джунгаре, последовательно меняются региональные векторы напряжений в земной коре от превалирования сжатия на юге и в центре до их трансформации в сдвиго-надвиговые и сдвиговые поля напряжений в Саянах и Южном Прибайкалье - на севере. Вместе с модификацией напряжений меняются векторы горизонтальных скоростей современных движений земной коры [5, 6]. Они максимальны и субмеридиональны на юге и в центре, к востоку от которого разворачиваются в широтном направлении с вектором на восток, а ближе к 105 °в.д. (восточная граница центральной геодинамической зоны) векторы направлены на юг. Для южной и центральной части центральной зоны характерно течение земной коры в сочетании со смещениями по межблоковым разломам. Течение сопровождается значительными смещениями по разломам. о чем аргументированно пишет В.С. Буртман [7]. Именно течение вещества горных масс в сочетании с высокими напряжениями способствовали генерации сильных землетрясений. Накоплению напряжений, их высоким значениям с последующей трансформацией в сейсмическое течение способствовало геодинамическое окружение.

Южная граница территории локализации сильных землетрясений – Индостанская плита, – коллизионная геодинамическая зона, генерирующая напряжения благодаря длительному движению на север-северо-восток и оказывающая давление на центральную геодинамическую зону. Давление на эту зону Индостанской плиты обеспечивает высокое напряженное состояние территории, способствует формированию тектонического (сейсмотектонического) течения горных масс и генерации сильных землетрясений.



Геодинамическая зональность Центральной Азии. 1 – меридиональная пограничная зона Центральной Азии – восточная граница зоны высокой геодинамической активности; 2 – границы между геодинамическими зонами; 3 – зоны высокой геодинамической активности: I – центральная зона интенсивного сжатия литосферы и локализации сильных землетрясений; II – зона Индостанской плиты – индентора напряжений сжатия; III – зона схождения блоковых структур Памира, Тянь-Шаня и Казахской глыбы, затрудняющая разрядку напряжений сжатия и течения вещества на запад; 4 – зоны относительно слабой тектонической активности и стабильные: IV – зона Амурской плиты и крупных блоковых структур Юго-Восточного Китая; V – стабильная зона Сибирской платформы.

Восточная граница центральной геодинамической зоны представляет собой субмеридиональную шириной в первую сотню километров полосу, ограничивающую распространение сильных землетрясений. В тектоническом отношении она многоплановая [1, 8–10]. Во-первых, фиксирует полное ослабление влияния западно-тихоокеанской субдукции. Во-вторых, отражает полосу изменения толщины земной коры: западнее граничной полосы толщина коры достигает 70 км, восточнее – не превышает 42 км; собственно пограничная полоса характеризуется толщиной коры около 42 км [11]. В-третьих, отображает резкое изменение векторов современных движений земной коры [5, 12]. В-четвертых, по глубинным разрезам фиксирует различия в физических полях от поверхности до глубин в 600 км [13, 14]. Геодинамическая суть границы субмеридионального раздела западной и восточной части Центральной Азии – оградить континентальную Азию от динамического влияния западно-тихоокеанской субдукции на современные эндогенные процессы, в том числе на генерацию сильных землетрясений.

Северная граница центральной геодинамической зоны – протяженная на сотни километров многоплановая пограничная территория пассивной Сибирской платформы с типичным платформенным геодинамическим режимом. Она создает мощнейший упор, реакцию сопротивления, равную силе давления на нее. Без участия крупного блока литосферы – Сибирской платформы и восточной пограничной зоны по 105 °в.д. – не было бы и значительной по эффекту сжатия континентальной коллизии в проявленном виде в западной части территории Центральной Азии [4].

Западная граница центральной геодинамической зоны – стержневая часть Центральной Азии. Она выступает своеобразным упором и оказывает большое препятствие процессу «выдавливания», квазивязкому течению горных масс из центральной зоны. Препятствие течению вызвано сужением потока течения вещества из-за территориального сближения Памира, Тянь-Шаня и Казахской плиты [14]. Западная граница не выражена конкретной структурой, поскольку сформирована сближающимися блоками, затрудняющими квазипластическое истечение материала.

Геодинамическая зона проявления наиболее сильных землетрясений в Центральной Азии отличается от окружающих районов интенсивным сжатием литосферы, увеличенной мощностью коры, специфической линзовидной формой ее крупных блоков, значительными смещениями по ограничивающим блоки разломам и течением (квазитечением) материала. Названные геодинамические параметры и выделяемые геодинамические зоны, в том числе зона с превалированием сильных землетрясений, не затрагивают базовые теоретические исследования генерации сейсмических очагов, но хорошо согласуются с принципиальной концепцией Ю.В. Ризниченко [15, 16] о сейсмическом течении горных масс в верхней части литосферы. Факторы локализации сильных землетрясений в сейсмоактивной зоне акцентируют наше внимание, прежде всего, на окружающих геодинамических зонах, способствующих накоплению высоких напряжений, генерируемых внешним индентором, а также на реологической среде, способствующей высокоамплитудным подвижкам по активизирующимся крупным разломам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15–55–53023–ГФЕН а).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гатинский Ю.Г., Владова Г.Л., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В. Геодинамика Центральной Азии и прогноз катастрофических землетрясений // Пространство и время. 2011. Т. 3, № 5. С. 124–134.

2. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В. Геодинамика Евразии – тектоника плит и блоков // Геотектоника. 2004. № 1. С. 3–20.

3. Zhang Jiasheng Aeromagnetic anomalies in Central Asia and their tectonic implication // Atlas of seismotectonics in Central Asia. Beijing, 2013. P. 25–27.

4. Sherman S.I., Ma Jin, Gorbunova E.A. Recent strong earthquakes in Central Asia: regular tectonophysical features of locations in the structure and geodynamics of the lithosphere. Part 1. Main geodynamic factors predetermining locations of strong earthquakes in the structure of the lithosphere // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6(4). P. 409–436. doi:10.5800/gt-2015-6-4-0188.

5. Gan Weijun, Xiao Genru Present-day crustal motion GPS velocity fields of Central Asia // Atlas of seismotectonics in Central Asia. Beijing, 2013. P. 41-42.

6. Li Yanxing, Hu Xikang, Shui Ping, Ge Liangquan, Hudng Cheng, Zhu Wenyao, Hu Xiaogong, 2001. The current strain fields in the continent of China and its adjacent areas from GPS measurement results // Proc. of Fourth Workshop. Beijing, 2001. P. 113–123.

7. Burtman V.S. Geodymanics of Tibet, Tarim, and the Tien Shan in the Late Cenozoic // Geotectonics. 2012. V. 46, № 3. P. 185–211.

8. Иогансон Л.И. Зона 105° в.д. – новый тип геодинамических границ? // Система планета Земля. Альманах Пространство и время. 2012. Т. 1, вып. 1. С. 1–6.

9. Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 297 с.

10. Ma Xingyuan et al. 1:1 000 000 scale Lithospheric dynamics map of China and adjacent seas and explanatory notes to supplement map. Beijing: Geological Publishing House, 1987.

11. Li S., Mooney W.D., Fan J. Crustal structure of mainland China from deep seismic souding data // Tectonophysics. 2006. V. 420, № 1–2. P. 239–252.

12. Gao Xianglin Plate dynamics context of seismotectonics in Central Asia // Atlas of seismotectonics in Central Asia. Beijing, 2013. P. 29–31.

13. Кожевников В.М., Середкина А.И., Соловей О.А. Дисперсия групповых скоростей волн Рэлея и трехмерная модель строения мантии Центральной Азии // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 10. С. 1564–1575.

14. Koulakov I.Y. High-frequency P and S velocity anomalies in the upper mantle beneath Asia from inversion of worldwide travel time data // Journal of Geophysical Research. 2011. V. 116, b04301. P. 1–22. doi:10.1029/2010jb007938.

15. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии: Избранные труды. М.: Наука, 1985. 408 с.

16. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2014. 359 с.

#### MODERN GEODYNAMIC ZONING OF CENTRAL ASIA AS A LEADING FACTOR OF STRONG EARTHQUAKE LOCALIZATIONS

#### S.I. Sherman

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. Strong earthquakes ( $M \ge 8$ ) of the last century in Central Asia are concentrated in specific geodynamic zone, characterized by high stresses, thickened crust and lower-viscosity rock mass. Adequately high stresses are generated by the indenter (Indian plate), their accumulation is ensured by a specific geodynamic environment, and the proper high-amplitude realization along the faults is favored by relatively low viscosity of the medium.

Keywords: viscosity, geodynamic zoning, geodynamics, crust, lithosphere, stress, fault, rheology, seismicity, large earthquake, Central Asia

## РАЗДЕЛ ІІ

# ДЕСТРУКТИВНЫЕ ЗОНЫ ЛИТОСФЕРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ: РАЗЛОМНОЕ СТРОЕНИЕ, НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, УНАСЛЕДОВАННОСТЬ РАЗВИТИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

УДК 550.835.24+551.24

## РАДОНОВАЯ АКТИВНОСТЬ РАЗЛОМОВ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИБАЙКАЛЬЯ: К ПРОБЛЕМЕ ВЫБОРА ПУНКТОВ ЭМАНАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

А.А. Бобров<sup>1</sup>, К.Ж. Семинский<sup>2</sup>

1 Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский научный центр СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Эманационные радоновые исследования проводились при помощи радиометра PPA-01М-03 в центральной части тектонически активного (сейсмичность, разломообразование) Байкальского рифта (Западное Прибайкалье). Для анализа сейсмичности использована информация о землетрясениях по данным Байкальского филиала геофизической службы СО РАН. Комплексный анализ графиков распределения амплитуд вариаций объемной активности радона и логарифма суммарной сейсмической энергии показал, что по характеру реакции поля радона на сейсмичность «чувствительные» в эманационном плане точки в разломных зонах можно разделить на три группы. Первая группа включает «чувствительные» в эманационном плане точки в разломных зонах можно разделить на три группы. Первая группа включает «чувствительные» точки, в которых характер вариаций графика поля радона из года в год практически идентичен графику логарифма суммарной сейсмической энергии. Во вторую группу вошли точки, в которых характер поля радона с сейсмичностью. Благоприятным местом для радона являются участки разломных зон с высокой степенью нарушенности горных порадона которых которых которых которых которых станций радона являются участки разломных зон с высокой степенью нарушенности горных пород, которые находятся вблизи наиболее крупных дизъюнктивов региона.

Ключевые слова: эманационная съемка, радон, разломная зона, сейсмичность

Системные исследования радоновой активности разломных зон Прибайкалья начались в 2008 г. Были получены геолого-структурные и радоновые данные об особенностях строения разломов, оперяющих такие крупные дизъюнктивы, как Обручевский сброс и Ангарский разлом. Выделено четыре типа ситуаций, которые отличаются, с одной стороны, по структурной разновидности разлома (сосредоточенный/рассредоточенный) и напичию/отсутствию тонкодисперсного заполнителя, а с другой - по форме аномалии в поле объемной активности радона (ОАР) [1]. Задача данного исследования заключалась в мониторинге приразломных аномалий радона, изменения которых во времени связаны с вариациями сейсмической активности в регионе.

В качестве объекта исследований были выбраны дизъюнктивы, расположенные в центральной части тектонически активного (сейсмичность, разломообразование) Байкальского рифта (Приольхонье). В течение семи лет над четырьмя разломными зонами на участках «Куркут 1», «Куркут 2», «МРС (Тутайский)» и «Онтхой» проводились измерения ОАР. Объекты исследования были выбраны так, чтобы охватить все типы структурных ситуаций, о которых говорилось выше. На участке «Куркут 1» и «Куркут 2» разломная зона состоит из одного сместителя, а на «МРС (Тутайский)» и «Онтхой» - из нескольких отдельных близкорасположенных сместителей. На трех изученных участках («Куркут 2», «МРС (Тутайский)» и «Онтхой») дизъюнктивы представлены зоной повышенной трещиноватости и дробления; на четвертом участке («Куркут 1») глинкой трения, которая является экраном для газов, в том числе радона [2, 3].

Эманационные исследования проводились при помощи радиометра PPA-01М-03 по методике, адаптированной под условия резко континентального климата Восточной Сибири [2]. Измерения ОАР осуществлялись в летние месяцы с 2008 по 2014 г. в точках, образующих профили, поперечные по отношению к изучаемому разрывному нарушению. Расстояние между пикетами (ПК) составляло 10 м. Ежегодно замер повторялся несколько раз для каждой точки профиля.

Для решения главной задачи исследования полученные радоновые данные сопоставлялись с сейсмической активностью региона (данные БФ ГС РАН: http://seis-bykl.ru). Следует отметить, что аномалии в поле радона, связанные с землетрясениями, характеризуются продолжительностью от нескольких дней до нескольких месяцев [4, 5]. Наши мониторинговые исследования поля радона показали, что аномалии могут наблюдаться не только до сейсмического события, но и в течение нескольких дней после него. В связи с этим было принято для каждого года вычислять логарифм суммарной энергии землетрясений не за весь год, а за три месяца. К месяцу, в течение которого были сделаны замеры радона, добавлялся один месяц до измерений и один после. Для сравнения с сейсмичностью на каждом участке исследований были выбраны «чувствительные» в плане эманаций радона точки, в которых зафиксированы наибольшие амплитуды вариаций ОАР. Амплитуда вариаций ОАР определялась как разность между максимальным и минимальным значением, зафиксированным в течение года на одном и том же пикете. По геолого-структурным данным таким точкам соответствуют блоки с дроблением пород и высокой плотностью трещин. В результате были получены графики распределения логарифма суммарной сейсмической энергии, а также амплитуд вариаций ОАР в «чувствительных» точках разломных зон (рисунок).

Согласно рисунку, на всех графиках имеет место тенденция понижения амплитуд вариаций ОАР с 2008 по 2014 г. При этом присутствуют три отдельных пика, которые в большинстве случаев совпадают с повышением на графике  $lg\Sigma E$ . В 2008 г. такое повышение 1gΣE вызвано землетрясением, произошедшим 27 августа и характеризующимся энергетическим классом К=15.9. Его эпицентр располагался в южной части акватории оз. Байкал, примерно в 25 км от г. Слюдянка и в 247 км от участков наших исследований в Приольхонье. Повышение параметра lgΣE в 2011 г. вызвано землетрясением, произошедшим 16 июля в центральной части Байкальского рифта. Его эпицентр располагался вблизи (~20 км) пос. Турка в Бурятии и в 111 км от Приольхонья. Третий максимум (2014 г.) на графике lgΣE обусловлен двумя крупными сейсмическими событиями, произошедшими на северо-восточном фланге Байкальского рифта 23 мая (К=14.3) и 21 июня (К=13.1). Расстояние до участков эманационных исследований составило 566 и 1028 км, соответственно.

Комплексный анализ графиков распределения амплитуд вариаций объемной активности радона и логарифма суммарной сейсмической энергии показал, что по характеру реакции поля радона на сейсмичность «чувствительные» точки в разломных зонах можно разделить на три группы (рисунок). К первой группе относится ПК5 на участке «МРС (Тутайский)». В этой точке вариации поля радона из года в год повторяют график логарифма суммарной сейсмической энергии. Исключением является 2014 г., где значения разнятся: увеличению параметра lgΣE соответствует уменьшение амплитуды вариаций ОАР. Как отмечалось выше, максимум lgΣE в 2014 г. вызван двумя землетрясениями с К=14.3 и К=13.1. При этом расстояние до участков наших работ составило 566 и 1028 км, соответственно. Как показывают наши предшествующие исследования, а также работы В.И. Уткина с соавторами [5 и др.], это слишком большие дистанции для мониторинговых исследований радона. Именно эти два крупных сейсмических события дают значительный вклад в параметр  $lg\Sigma E$  за 2014 г. При их исключении из выборки землетрясений значение  $lg\Sigma E$  уменьшается с 14.3 до 12.1. Следовательно, целесообразно исключить из рассмотрения сейсмические события, произошедшие на расстояниях более 566 км, так как их вклад в вариации поля радона на участках наших исследований незначителен.

Как видно из графика  $lg\Sigma E$ , в остальные годы (кроме 2014 г.) значения практически не изменились (рисунок, пунктирная линия для графика  $lg\Sigma E$ ). При этом характер вариаций графика поля радона для ПК5 участка «МРС (Тутайский)» из года в год практически идентичен графику lgΣE. Это может служить доказательством того, что для территории Байкальского рифта на поле радона не влияют сейсмические события с К≤14.3 на расстояниях более 566 км от места мониторинга. Полученная величина, по-видимому, может быть уменьшена при использовании большего количества данных. При этом стоит также учитывать взаимное пространственное положение точки измерения и землетрясения. Сейсмическое событие, произошедшее по простиранию разлома, в зоне которого находится мониторинговая точка, будет влиять на вариации радона на большем расстоянии, чем землетрясение, произошедшее в стороне от дизъюнктива.

Ко второй группе относятся ПК 9 на «Куркуте 2» и ПК 3 на участке «Онтхой». Они имеют подобный характер распределения параметра ОАР с графиком  $lg\Sigma E$ , но различаются в некоторые годы. Например, у графиков на участке «Куркут 2» (ПК 9) и «Онтхой» (ПК 3) отсутствуют пики ОАР в 2011 г. Таким образом, данная группа в целом подвержена влиянию сейсмических событий в регионе, но в отдельные годы имеют место расхождения параметров. Это может быть обусловлено тем, что в каталог БФ ГС СО РАН не включены более мелкие сейсмические события (K<8.6), которые произошли в непосредственной близости от участков исследования и могут влиять на ОАР.



Графики распределения амплитуд вариаций объемной активности радона в «чувствительных» точках разломных зон и логарифма суммарной сейсмической энергии (Lg ΣE) в течение семи лет (2008–2014 гг.).

К третьей группе относится «чувствительная» точка на ПК2 участка «Куркут 1». Она характеризуется отсутствием реакции на изменение сейсмической обстановки в регионе. Это, вероятно, связано с тем, что ПК2 в разломной зоне расположен на удалении от главного сместителя, который заполнен слабопроницаемой для газа глинкой трения. Таким образом, вследствие геолого-структурных особенностей строения разломной зоны на участке «Куркут 1», мониторинг радона, осуществляемый с целью поисков предвестников землетрясений, в подобных точках земной коры не приведет к удовлетворительным результатам.

Из трех групп наибольший интерес в плане мониторинга представляет лишь первая. К ней относится «чувствительная» точка на участке «МРС (Тутайский)». Отчетливая взаимосвязь поля радона с землетрясениями в данном случае обусловлена несколькими факторами. Сместитель разлома на участке «МРС (Тутайский)» представлен зоной повышенной трещиноватости и дробления, которая благоприятна для миграции газов, в том числе радона. Немаловажную роль играет местоположение участка исследований. Изучаемый дизъюнктив расположен вблизи сместителя Морского разлома, который является одним из самых крупных тектонических нарушений, образующих Байкальский рифт. В отличие от этого остальные участки находятся в блоке между Приморским и Морским разломами. Таким образом, благоприятным местом для расположения станций мониторинга радона являются участки разломных зон с высокой степенью нарушенности, находящиеся в тектонически активном регионе вблизи наиболее крупных дизъюнктивов.

Авторы благодарны сотрудникам лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН к.г.-м.н. А.В. Черемных, А.С. Черемных, Е.И. Когуту, Р.М. Зарипову и А.А. Тарасовой за помощь в сборе фактического материала.

Исследования проводились в рамках интеграционной программы ИНЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей (0341–2015–0001)».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Семинский К.Ж., Бобров А.А., Дэмбэрэл С. Вариации объемной активности радона в разломных зонах земной коры: пространственные особенности // Физика Земли. 2014. № 6. С. 80–98.

2. Семинский К.Ж., Бобров А.А. Радоновая активность разнотипных разломов земной коры (на примере Западного Прибайкалья и Южного Приангарья) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 8. С. 881–896.

3. Черемных А.В. Внутренняя структура разломных зон Приольхонья и эволюция напряженного состояния верхней коры Байкальского рифта // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1, № 3. С. 273–284. URL: http://gt.crust.irk.ru/jour/article/view/112 (дата обращения: 24.04.2016).

4. Зубков С.И. Радоновые предвестники землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1981. № 6. С. 74–105.

5. Уткин В.И., Юрков А.К. Радон как индикатор геодинамических процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 2. С. 277–286.

#### RADON ACTIVITY OF FAULTS AND SEISMICITY OF THE BAIKAL REGION: THE PROBLEM OF EMANATION MONITORING SITE SELECTION

## A.A. Bobrov<sup>1</sup>, K.Z. Seminsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia <sup>2</sup> Irkutsk Scientific Center, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. Radon emanation studies were conducted using a radiometer RRA-01M-03 in the central part of the tectonically active (seismicity, faulting) Baikal Rift (Western Baikal region). Seismic analysis involves the information on earthquakes from the Baikal Branch of Geophysical Survey SB RAS. Comprehensive analysis of distribution of amplitude variations in radon volume activity and logarithmic plots of total seismic energy has shown that the places where fault zones are sensitive to emanation can be divided into 3 groups according to the nature of radon field response to seismicity. The first group includes "sensitive" places in which the year-to-year variations of the radon distribution pattern are almost identical to logarithmic plots of the total seismic energy. The second group includes the places in which similar radon distribution patterns differ from logarithmic plot of the total seismic energy in some of the years. The third group shows no relationship between radon and seismic activity. Radon monitoring is better provided in fault zones with a high degree of rock disturbance, which occurs near the largest disjunctive faults in the region.

Keywords: emanation survey, radon, fault zone, seismicity

\*\*\*

УДК 551.24.01

## ДИНАМИКА ДЕФОРМАЦИЙ В СДВИГОВОЙ ЗОНЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.А. Борняков<sup>1,2</sup>, И.А. Пантелеев<sup>3</sup>, А.А. Тарасова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Институт механики сплошных сред УРО РАН, Пермь, Россия

Аннотация. Проведено моделирование процесса формирования крупной сдвиговой зоны в упруговязкопластичной модели литосферы, и выполнена компьютерная обработка полученных фотоматериалов методом корреляции цифровых изображений. Установлено, что развивающийся в сдвиговой зоне деформационный процесс обусловлен двумя составляющими – общим перемещением ее активного крыла под действием приложенной к модели нагрузки и периодическим прохождением по зоне локализованных фронтов деформаций. Оценены скорость пространственного перемещения и амплитуды деформационных волн. Показано, что их пространственно-временная динамика зависит от степени развития внутренней разрывно-блоковой структуры сдвиговой зоны и уровня накопленных в ней напряжений.

Ключевые слова: физическое моделирование, сдвиговая зона, разрывно-блоковая структура, деформационная волна

Проведено физическое моделирование процесса формирования крупной сдвиговой зоны в упруговязкопластичной модели литосферы. На рисунке 1, *A*, представлена схема эксперимента. Модельный материал ровным слоем размещался на двух штампах экспериментальной установки, затем активный штамп 1 смещался относительно неподвижного, пассивного штампа 2 (рис. 1, *A*). Для получения высококонтрастного изображения свободной поверхности модели на нее насыпался мелкий песок. Развивающийся в модели процесс формирования сдвиговой зоны фотографировался цифровой фотокамерой Basler асА2000-50gm с частотой 1fp/s (1 кадр в секунду). На рисунке 1, *Б*, приведен пример оптического изображения фрагмента сдвиговой зоны. За время эксперимента было сделано более 10000 фотографий. Для уменьшения объема обработки для анализа было взято 350 фотографий, отражающих процесс развития разрывов в сдвиговой зоне в конце первой стадии перед межстадийной структурной перестройкой [1]. Для обработки фотографий был использован метод корреляции цифровых изображений, основанный на анализе последовательности оптических изображений деформируемой поверхности модельного материала [2] (на базе программного обеспечения Strain Master). Данный метод позволяет рассчитывать распределения компонент вектора перемещений, тензора деформации на поверхности испытываемого материала и их эволюцию во времени [3, 4].



Рис. 1. Схема эксперимента (*A*), оптическое изображения фрагмента сдвиговой зоны в модели с реперными точками на выделенной площадке (*Б*) и ее увеличенное изображение (*B*). *1* – активный (1) и пассивный (2) штампы установки; *2* – разрывная структура сдвиговой зоны; *3* – тестовый разрыв с реперными точками; *4* – порядковый номер реперной точки.

Результаты обработки полученных с модели фотографий показывают, что деформационный процесс, развивающийся в крупной сдвиговой зоне, обусловлен двумя составляющими – общим перемещением ее активного крыла под действием приложенной к модели нагрузки и периодическим прохождением по зоне деформационных волн (рис. 2, *A–B*).





B T = 340 cAKTИВНОЕ КРЫЛО Пассивное крыло 5 см

Рис. 2. Пространственная динамика деформационных волн в формирующейся сдвиговой зоне. *1* – разрывы; 2 – локализованный фронт деформации сдвига; *3* – направление смещения активного крыла сдвиговой зоны. Белым штрих-пунктиром показана осевая линия сдвиговой зоны. Т – время в секундах для выбранного расчетного временного интервала.

Первая составляющая является главной и вносит основной вклад в накопление деформаций, тогда как вторая составляющая является второстепенной и оказывает осложняющее влияние на протекание деформационного процесса. Деформационные волны заходят в сдвиговую зону со стороны активного штампа. Они свободно проходят через нее транзитом, не меняя свои размеры и форму, пока ее внутренняя структура представлена мелкими разрывами (рис. 2, А). Зарождающиеся впоследствии крупные разрывы, как структурные неоднородности, препятствуют прохождению через них деформационных волн. Вошедшая в сдвиговую зону единая протяженная деформационная волна, встречая на своем пути такие разрывы, разделяется ими на серию частных волновых фрагментов. Новообра-зованные фрагменты волн меняют направление движения и перемещаются по простиранию блоков (рис. 2, Б). Таким образом, если в первом случае единым волноводом являлась вся сдвиговая зона, то во втором случае роль волноводов выполняют вычленяемые крупными разрывами протяженные узкие блоки. По мере дальнейшей эволюции внутренней разрывной структуры сдвиговой зоны и приближения к межстадийной структурной перестройке, в условиях существенного роста уровня напряжений, направленная миграция фрагментов деформационных волн по блокам ослабевает и дополняется формированием неподвижных замкнутых округлых и эллипсовидных фронтов локализованной деформации (рис. 2, В). Последние, вероятно, оконтуривают локальные объемы модельного материала, испытывающие вращение. Схожие волновые эффекты, именуемые трансляционно-ротационными вихрями, изучены при пластической деформации образцов металлов под нагрузкой в критическом состоянии перед их разрушением [5].

Расчеты, выполненные для оценки отклика блоков на движение по ним деформационных волн показали, что они с некоторой дискретностью последовательно проходят через реперные точки 1.1, 1.2, 1.3 и 1.4 от последней (1.4) к первой (1.1), инициируя возникновение в каждой из них короткопериодных деформационных аномалий (рис. 3). За выбранный контрольный временной интервал с 55 по 108 секунду зафиксировано прохождение трех деформационных волн с периодичностью 17–18 секунд (рис. 3).

Прохождение деформационной волны через реперную точку сопровождается резким увеличением продольной деформации. Видно, что, несмотря на близкое расположение реперных точек друг от друга, реализующиеся в их пределах деформации отличаются по величине. Это связано с тем, что величина трения на межблоковом разрыве и уровень накопленных напряжений меняются как по его простиранию, так и во времени, что приводит к его сегментации. Степень сдвиговой активности даже у близко распложенных сегментов, а также у одного сегмента, но в разные моменты времени может отличаться [1]. При этом, чем ниже степень активности сегмента, то есть чем выше прочность контакта между блоками в пределах сегмента, тем реже реализуются сдвиговые смещения по нему и тем бо́льшую деформационную аномалию создает проходящая деформационная волна в реперной точке в его окрестностях


Рис. 3. Зависимость модуля продольной деформации  $e_{xx}$  от времени для четырех реперных точек за расчетный интервал 350 секунд (*A*) и ее детализация на временном отрезке с 55 по 108-ю секунду (*Б*).



Рис. 4. Зависимость продольной деформации е<sub>xx</sub> от времени в краевых частях смежных блоков для четырех пар точек за 350-секундный интервал: 1.1–2.1. (*A*), 1.2–2.2 (*B*), 1.3–2.3 (*B*), 1.4–2.4 (*Г*).

Выше отмечено, что вошедшая в сдвиговую зону единая протяженная деформационная волна разделяется крупными разрывами на серию частных волновых фрагментов, перемещающихся по простиранию блоков (см. рис. 2, Б). Сопоставление пространственно-временной динамики поперечной деформации в смежных блоках 1 и 2 в пределах четырех пар точек 1.1-1.4, 2.1-2.2, 3.1-3.2 и 4.1-4.2 показывает, что два фрагмента некогда единой волны перемещаются по этим блокам с разной периодичностью и, следовательно, с разной скоростью. Временное смещение пиков поперечной деформации у смежных точек позволяет констатировать, что скорость движения таких фрагментов в верхнем блоке, расположенном ближе к активному штампу экспериментальной установки (блок 1), всегда выше, чем в нижнем блоке (блок 2) (рис. 4). Если для первого из них период прохождения волновых фронтов, как уже отмечалось выше, составляет 17-18 секунд, то для второго он возрастает до 23-24 секунд, что влияет на общее количество за контрольный интервал времени. Так, за 350 секунд по первому блоку прошло 19 фрагментов деформационных волн, тогда

как во втором блоке их зафиксировано на 2-3 фрагмента меньше (рис. 4).Проведенное экспериментальное иссле-дование позволило выявить дискретно-волновую динамику деформаций в формирующейся сдвиговой зоне. Установлено, что пространственно-временная динамика деформационных волн в сдвиговой зоне зависит от степени развития ее внутренней разрывно-блоковой структуры и уровня накопленных в ней напряжений. Показано, что деформационные волны, зарождающиеся за пределами сдвиговой зоны в виде локализованных фронтов, входят в нее и по мере движения по ней трансформируются в серию фрагментов, перемещающихся по блокам с разной скоростью. Рассогласованность по времени перемещений фрагментов деформационной волны в смежных блоках порождает сложную динамику разнонаправленных смещений на межблоковом разрыве.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 15–55–53023–ГФЕН\_а, 16–35–00349– Мол\_а).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Борняков С.А., Семинский К.Ж., Буддо В.Ю., Мирошниченко А.И., Черемных А.В., Черемных А.С., Тарасова А.А. Основные закономерности разломообразования в литосфере (по результатам физического моделирования) // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 4. С. 823–861. http://dx.doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0159.

2. Panteleev I., Plekhov O., Pankov I., Evseev A., Naimark O., Asanov V. Experimental investigation of the spatiotemporal localization of deformation and damage in sylvinite specimens under uniaxial tension // Engineering Fracture Mechanics. 2014. V. 129. P. 38–44. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.08.004.

3. Пантелеев И.А., Плехов О.А., Наймарк О.Б., Евсеев А.В., Паньков И.Л., Асанов В.А. Особенности локализации деформации при растяжении сильвинита // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2015. № 2. С. 127–138.

4. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Макаров П.В., Гриняев Ю.В., Зуев Л.Б., Сырямкин В.И., Колобов Ю.Р. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. 297 с.

5. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2008. 327 с.

## DYNAMICS OF DEFORMATIONS IN SHEAR ZONE: PHYSICAL MODELING RESULTS

S.A. Bornyakov<sup>1,2</sup>, I.A. Panteleev<sup>3</sup>, A.A. Tarasova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Continuous Media Mechanics, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

*Abstract.* Modeling has been performed for the process of a large shear zone formation using elasto-viscous-plastic model of the lithosphere, with electronic photo-materials processing performed by applying the digital image correlation method. It has been found that deformation process occurring in shear zone involves two components: a general motion of its active part under applied load and deformation fronts periodically propagating therein. Estimations have been made of the velocity of propagation and amplitude of deformation waves. It has been shown that their space-time dynamics depends on the degree of development of the internal fault-block structure of shear zone and the level of accumulated stresses there. *Keywords:* physical modeling, shear zone, fault-block structure, deformation wave

\*\*\*

УДК 551.243

## НОВЫЙ ПОДХОД К ПАРАГЕНЕТИЧЕСКОМУ АНАЛИЗУ ТРЕЩИН: ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

## Ю.П. Бурзунова

## Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы практического применения нового подхода к парагенетическому анализу приразломных трещин, касающиеся этапа подготовки и сбора фактического материала. Кратко описаны основные принципы метода, исходные данные, результаты анализа – тип и строение разломной зоны и поле напряжений. Охарактеризованы эталонные трещинные сети и тройственный парагенезис систем трещин, применяющиеся в методике. Рассмотрены генетические типы трещиноватости относительно возможности использования данного анализа, а также критерии идентификации тектонических трещинных сетей, являющихся основным предметом исследований. Приведены некоторые особенности полевых геолого-структурных наблюдений и массового замера трещин применительно к парагенетическому методу.

Ключевые слова: трещинная сеть, парагенезис разрыва, разломная зона, поле напряжений

Трещины горных пород изучают при исследовании разломного строения верхней части земной коры. В тектонофизическом понимании разлом представлен магистральным сместителем и областью его динамического влияния. На земной поверхности для изучения доступен плоский срез этой области – разломная зона, в которой наблюдаются связанные с развитием сместителя пластические и разрывные деформации, возникшие в едином поле тектонических напряжений и образующие структурные парагенезисы. Определение условий их формирования лежит в основе структурнопарагенетических методов, одним из которых является новый подход к парагенетическому анализу приразломных трещин [1]. Его главное отличие в виде используемого парагенезиса - тройка примерно перпендикулярных систем трещин, которая наиболее часто встречается в зоне тектонического разлома и имеет устойчивые пространственные взаимоотношения с плоскостью сместителя [1, 2]. Исходным материалом для анализа служат статистические массовые замеры элементов залегания повсеместно распространенных «немых» трещин в горных породах. Методика заключается в сравнении природных и идеализированных (эталоны) трещинных сетей, что позволяет на локальном уровне конкретного коренного выхода установить поле напряжений и морфогенетический тип разломной зоны (зоны скалывания), в которой происходило формирование трещин. Используя сеть пунктов наблюдения, можно перейти на региональный уровень. Новый подход является основой для спецкартирования [1] разломных зон земной коры и полей напряжений с целью расшифровки разломно-блоковой структуры природных регионов.

В рамках метода эталоны – это идеализированные парагенезисы трещинной сети (в виде круговой диаграммы-трафарета в проекции верхней полусферы) в зонах скалывания разломного типа, построенные в результате обобщения теоретических, экспериментальных и природных закономерностей разрывообразования для основных типов динамических обстановок (сжатие, сдвиг, растяжение) [1]. Поскольку эталон является усредненной моделью сети трещин, его можно использовать в различных регионах. Эталон состоит из нескольких троек тре-

щинных систем, которые соответствуют главному сместителю и опережающим [3] второстепенным мелким разломам. Тройки взаимно ортогональных систем трещин возникают при вариациях напряженного состояния горного массива в процессе разломообразования под однонаправленно действующей внешней нагрузкой в условиях хрупкого транспрессивного (в обстановке трехосного сжатия) скалывания на глубине примерно от 2-3 до 10 км. Большинство изучаемых в современном эрозионном срезе трещинных сетей в скальных породах вблизи разломов соответствуют этим условиям формирования. Сравнение приразломных сетей трещин, образованных в близповерхностном слое (с участием растягивающих напряжений), с эталонами может быть менее точным, так как в этом случае из трех систем тройственного парагенезиса присутствуют только две сопряженные системы сколов, угол между которыми значительно меньше среднего (80°) в тройке, что необходимо учитывать при анализе.

Рассмотрим генетические типы трещин с точки зрения возможности использования нового подхода. Метод разработан для изучения сложных приразломных трещинных сетей, состоящих в основном из тектонических трещин. Наиболее эффективно его применение в тектонически активных (или бывших ранее активными) регионах, где доминирующими силами, влияющими на формирование трещин, были тектонические, а другие силы и напряжения стяжения (первичные трещины) или ротационные -(планетарные трещины) - имели подчиненное значение. Такими регионами являются складчатые пояса, где вследствие высокой плотности разломов, зоны влияния которых занимают фактически всю площадь, широко развита тектоническая трещиноватость, поэтому метод можно использовать почти повсеместно. В платформенных районах, где наблюдается меньшее количество разломов, следует тщательнее подбирать участки работ. Трещиноватость тектонического происхождения имеет характерные признаки, по которым ее несложно идентифицировать в обнажении горных пород на стадии сбора исходного материала. Прежде всего, определяется в целом геометрическое строение трещинной сети [3]: системная и хаотическая (множество систем трещин) сети относятся к тектоническим, в отличие от полигональной и сфероидальной первичных сетей с определенной узнаваемой структурой. При этом в тектонической сети, как правило, имеется не менее трех систем трещин [2, 3 и др.]. Далее оцениваются следующие известные признаки тектонических трещин: сколовый тип, прямолинейность, протяженность, пересечение структурных и вещественных границ, закономерная ориентировка в зоне разлома, наличие следов скольжения. Мелкие трещины хаотической сети вблизи сместителя могут не иметь значительной протяженности или следов смещений, тогда основным критерием является сколовый тип трещин, однозначно свидетельствующий о их тектонической природе. Что касается трещин отрыва, они могут быть обусловлены и тектоническими, и нетектоническими силами. В первом случае доля их в трещинной сети небольшая (по подсчетам В.А. Невского - 0-15 %), во втором - нетектоническая сеть может полностью состоять из отры-BOB.

На первичное формирование трещин в интрузивных и осадочных породах (особенно в тектонически активных регионах) существенное влияние оказывают тектонические напряжения («тектоническая рама»). Это отмечено в работах А.А. Полканова, Г.Д. Ажгирея, С.Н. Чернышева, Ю.Г. Леонова, Т.П. Белоусо-ва, об этом также свидетельствуют исследования трещин в керне осадков озера Байкал, в породах интрузивного сиенитового массива в Приольхонье и осадочного чехла Сибирской платформы, проведенные сотрудниками ИЗК СО РАН. Наличие соответствующих признаков позволяет отнести эту трещиноватость к тектонической и допускает применение парагенетического метода. Планетарные трещины имеют двойственную природу – внутренние силы стяжения при литификации пород или остывании расплава являются причиной образования трещин, а внешние – ротационные напряжения - задают их закономерную ориентировку. Ротационные напряжения значительно слабее тектонических, поэтому в складчатых поясах планетарная трещиноватость не проявлена. Методом парагенетического анализа она не изучалась. В зоне гипергенеза большая часть трещин наследуется от тектонических или первичных трещин, которые можно различить в обнажении горных пород. При выходе в зону выветривания древние скрытые тектонические трещины открываются, увеличивается общая плотность трещин, а их основные ориентировки сохраняются [3], что позволяет применять метод. Исключением являются участки с интенсивным выветриванием, где преобладают истинно гипергенные трещины отрыва. При наличии трещин разного происхождения используется комплексный подход с разделением трещин по генезису. Смешанная трещинная сеть анализируется, если в ней имеются тектонические трещины (чем больше их доля, тем достовернее результаты). Трещинные сети явно нетектонического происхождения (полностью отрывного типа) - первичные трещины столбчатой отдельности, послойные и внутрислойные трещины, трещины выветривания - исследовать новым методом, ориентированным на тектоническую трещиноватость, не имеет смысла. Несмотря на то, что метод разрабатывался для трещин в скальных породах, он был успешно опробован сотрудниками лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН для осадочных слабосцементированных кайнозойских пород в зоне Ангарского разлома и на территории Байкальского рифта, где проявлены отчетливые тектонические трещины скола и отрыва, смещения слоев и сколы гальки. Значимость таких исследований заключается в характеристике последних этапов тектонического развития районов.

Таким образом, парагенетический анализ трещин можно использовать во многих случаях. Ограничения по его применению есть, но метод определенно работает там, где развита преимущественно тектоническая трещино-ватость. Приемы сбора и первичной обработки (построение круговых диаграмм) исходных геолого-структурных данных определяются общими рекомендациями (Г.Д. Ажгирей, А.Е. Михайлов, В.А. Невский, С.Н. Чернышев и др.), а также полученным практическим опытом работы новым методом. Эффективность метода повышается при увеличении количества пунктов наблюдения, их число зависит также от сложности геологического строения. Площадка для массового замера элементов залегания трещин должна быть однородной по структурно-вещественным свойствам. Следует выбирать обнажения горных пород с преобладанием тектонических трещин. Для решения вопросов происхождения большинства трещин в коренном выходе важно получить информативную диаграмму, для чего на выбранной площадке следует измерять все трещины подряд без пропусков. Кроме элементов залегания отмечаются вспомогательные для анализа данные: тип трещин (скол или отрыв), ранг, при наличии - признаки сопряженности (по М.В. Гзовскому), вторичная минерализация на стенках, следы смещений. Оптимальное количество трещин для одного замера в локальном объеме горных пород на уровне одного обнажения - 100 штук. При малом их количестве не фиксируются менее проявленные системы, а большое количество трещин приводит к перегруженности диаграммы и объединению максимумов, к увеличению площадки замера и вероятности «попасть» в другое локальное поле напряжений. По этой же причине не рекомендуется использовать сводные или синоптические диаграммы, применяемые в структурной геологии для выделения рангов разрывов или их доминирующих направлений на больших площадях. В тектонически активных регионах такие диаграммы представляют сплошное поле точек в результате объединения множества разнотипных и разноориентированных парагенезисов локальных полей напряжений, которые практически невозможно разделить. Размер площадки для массового замера зависит от плотности трещин (обычно до 10 м<sup>2</sup>). Если коренной выход небольшой, замер производится только при наличии четких сколовых трещин. Даже при малом их количестве (10-20 штук) эти направления могут служить дополнительным подтверждением для парагенезисов в соседних точках. Кроме массового замера, документируются структурные особенности коренного выхода – залегание пород, зоны проявления тектонитов, зоны повышенной трещиноватости и другие данные, которые учитываются при интерпретации результатов анализа. В случае недоступного для изучения сместителя разлома или его отсутствия на первой стадии развития разломной зоны, неимения признаков смещений структура трещинной сети служит единственным источником информации, что является одним из достоинств метода. Статистический характер исходных материалов увеличивает достоверность полученных решений по зонам скалывания и полям напряжений. Эффективность метода подтверждается совпадением результатов (например [4] и др.) с выводами предшественников.

Итак, рассмотрены особенности практического применения нового подхода к парагенетическому

анализу трещин относительно подготовки и сбора исходных данных. Использование метода в специфических тектонических условиях платформ и складчатых поясов, при различных формах залегания горных пород требует дополнительных исследований. По мере накопления подобного опыта будут разработаны соответствующие рекомендации по применению методики. В настоящее время определенно можно сказать, что метод успешно работает в районах с преобладанием тектонической трещиноватости.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–05–00154 а).

# ЛИТЕРАТУРА

1. Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 2. С. 445–467.

2. Семинский К.Ж., Гладков А.С. Новый подход к изучению тектонической трещиноватости в разрывных зонах // Геология и геофизика. 1991. № 5. С. 130–140.

3. Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983. 240 с.

4. Бурзунова Ю.П. Разломные зоны Тажеранского массива сиенитов (Западное Прибайкалье) по результатам структурно-парагенетического анализа трещиноватости // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2015. №1 (50). С. 58–67.

## A NEW APPROACH TO THE METHOD OF PARAGENETIC ANALYSIS OF JOINTING: PRACTICAL APPLICATION

## Yu.P. Burzunova

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The article deals with the practical application of a new approach to the method of paragenetic analysis of jointing near faults concerning the preparatory stage of collecting evidence. A brief description is given of the principles underlying the new method and of the initial data and obtained results – fault-zone types and structures and stress fields. An assessment has been made of the standard joint systems and triple paragenesis of joint sets used in the procedure. Consideration is being given to the genetic types of fractures with respect to the applicability of this analysis and to the criteria for identification of tectonic joint systems, which are the main research subjects. Presented here are some of the characteristics of field geological-structural observations and mass measurement of joints in relation to paragenetic method.

Keywords: joint system, fracture paragenesis, fault zone, stress field

\*\*\*

УДК 551.243.6/.24.035+550.348.436(517)

# СТРУКТУРА СЕЙСМОГЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗОНАХ СДВИГОВ (ЦЭЦЭРЛЕГСКИЙ И БОЛНАЙСКИЙ РАЗЛОМЫ, СЕВЕРНАЯ МОНГОЛИЯ)

*А.Г. Воскресенский*<sup>1</sup>, В.А. Саньков<sup>1, 2</sup>, А.В. Парфеевец<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Проведены исследования зон сейсмогенных Цэцэрлегского и Болнайского разломов, с подвижками по которым связаны сильнейшие в Северной Монголии Цэцэрлегское (09.07.1905 г.,  $M_W$ =8.0) и Болнайское (23.07.1905 г.,  $M_W$ =8.4) землетрясения. Дешифрирование детальных космических снимков и полевые исследования позволили выявить пространственные закономерности формирования сейсмогенных деформаций в рыхлых осадках, типичные для левосторонних сдвигов. Показаны сходство и различия парагенезов структур для двух разломов. Полученные закономерности могут быть использованы для диагностики условий формирования природных сейсмогенных разрывов в сейсмоактивных областях.

Ключевые слова: сейсмогенный разлом, структурный парагенезис, Северная Монголия

Наиболее масштабные сейсмогенные структуры в Монголо-Сибирском регионе связаны с так называемыми Таннуольскими землетрясениями 1905 года [1]. Произошедшее первым Цэцэрлегское землетрясение (09.07.1905 г.,  $M_W$ =8.0) явилось форшоком самого сильного исторического события этой территории – Болнайского землетрясения (23.07.1905 г., *M*<sub>W</sub>=8.4) [2, 3]. Оба они связаны с быстрыми подвижками по разломам в зоне крупнейшего в Северной Монголии Северо-Хангайского раз-

лома. В рамках нашего исследования ставилась задача провести дешифрирование детальных космических снимков, доступных на pecypce Google Earth, с целью выделения комплекса сейсмогенных разрывов, связанных с активизацией движений по сейсмогенным Болнайскому и Цэцэрлегскому разломам в период одноименных землетрясений, и оценки закономерностей современного разрывообразования на земной поверхности в зоне сейсмогенного сдвига. Детальные космоснимки QuickBird характеризуют отрезки центральной части зоны Цэцэрлегского и западной части зоны Болнайского разлома. Сбор информации о пространственном положении, простирании и длине сейсмогенных дислокаций и создание базы данных производились с использованием ArcGIS, вычисления сделаны с использованием OpenOffice Calc. Дополнительно использованы данные полевых наблюдений.

Цэцэрлегское землетрясение произошло при активизации одноименного разлома ЮЗ-СВ простирания, который прослеживается от верховьев р. Агарын-гол через базальтовое поле Алтын-Кулин-Нуру вдоль ЮВ склона поднятия Шавырын-Урд-Нуру, пересекает долину р. Тэсийн-Гол в районе устья р. Шаварын-Гол и в районе оз. Ойгон-Нур причленяется к зоне Болнайского разлома. Он представляет собой сегмент зоны более протяженного Цаганульского разлома. Зона дислокаций, связанных с Цэцэрлегским землетрясением, имеет протяженность 130 км [1, 2]. Землетрясение характеризуется левосторонними взбросо-сдвиговыми подвижками по разрывам в очаге [3], а также сдвиговыми и взбросо-сдвиговыми смещениями вдоль сейсмогенных разрывов на поверхности Земли [2]. Реконструкции палеонапряженного состояния по данным о тектонической трещиноватости указывают на формирование смещений в условиях сдвига с ССВ простиранием оси сжатия.

Накопленная амплитуда левосторонних горизонтальных смещений по Цэцэрлегскому разлому достигает 2 км. Она оценена по смещению правого борта долины реки Тэсийн-Гол. Ряд долин притоков этой реки испытали левосторонние смещения с амплитудой от первых десятков до первых сотен метров. Согласно нашим полевым наблюдениям на правобережье р. Тэсийн-Гол, в районе эпицентра Цэцэрлегского землетрясения, амплитуда левостороннего сдвига по зоне сейсмодислокаций составляет около 3.0 м при вертикальном смещении до 1.5 м. Дешифрирование снимков на этом сегменте разлома показывает, что в долинах Тесийн-Гол и ее крупного левого притока наблюдается целый комплекс сейсмогенных разломов СВ (65°), субширотного и субмеридионального простирания. Зона главного разлома выражена серией сближенных кулисных разрывов СВ и субмеридионального простирания, часто соединенных валами сжатия ЗСЗ простирания и левосторонними сдвигами СВ простирания. Ширина зоны дислокаций варьируется в зависимости от мощности деформируемых осадков от первых метров на коренных склонах с маломощным делювием до первых сотен метров в днищах долин крупных водотоков. Зоны оперяющих разломов, чаще всего сдвигов, выражены на поверхности эшелонированными трещинами скола и отрыва длиной десятки и первые сотни метров. Как правило, они не имеют единого сместителя на поверхности ввиду малой амплитуды смещения по этим разломам. Кроме того, в бортах долины р. Тэсийн-Гол и ее притоков наблюдаются сбросовые уступы и трещины отрыва, образованные в результате сотрясения при землетрясении в условиях гравитационной неустойчивости осадков на склонах. В отдельных случаях отмечаются две генерации трещин в бортах долин. Так, в левом борту долины субмеридионального левого крупного притока р. Тесийн-Гол в районе г. Сул-Ула отчетливо проявлена заполненная молодыми осадками трещина растяжения ССЗ простирания длиной более 3 км и шириной до 9 м, которую пересекают трещины, возникшие во время землетрясения 1905 г. На заболоченных участках в днищах широких долин притоков р. Тесийн-Гол выявлены расположенные поперек направления стока вторичные трещины отрыва, также связанные с гравитационной неустойчивостью обводненных осадков и интенсивным сейсмогенным «встряхиванием». На осушенных участках поймы и низких террасах отмечаются более древние генерации подобных разрывов, свидетельствующие о проявлении сильнейших сейсмогенных сотрясений в этом районе в голоцене.

Болнайский разлом субширотного простирания (270-280°) связан с активизацией главного сместителя Северо-Хангайского разлома. При общей длине активного разлома порядка 485 км, при Болнайском землетрясении был активизирован отрезок длиной 375 км [4]. Механизм очага главного толчка определен как сдвиговый с вертикальным положением субширотной плоскости в очаге, соответствующей простиранию сместителя разлома [3]. Реконструкции палеостресса показали, что на этом участке разлома преобладают сдвиговые и транспрессионные условия формирования позднекайнозойских деформаций с простиранием оси максимального сжатия в СВ направлении [5]. Согласно данным [4], максимальные левосторонние смещения позднекайнозойских речных долин в зоне Болнайского разлома достигают 2 и даже 4 км. Оценки амплитуды сейсмогенного левостороннего смещения 1905 г. разнятся, однако по уточненным современным данным ее максимальное значение составляет 8.9±0.6 м, а повторный период землетрясений в зоне Болнайского разлома составил ~2700-4000 лет [6].

Детальный снимок pecypca Google Earth характеризует исследованный западный сегмент разлома в районе озера Уртын-Нур, который по основным чертам типичен для зоны Болнайского разлома в целом. Здесь сейсмогенные деформации сконцентрированы в зоне шириной 20-50 м с расширениями до 300 м. Они представлены эшелонированными трещинами отрыва и валами сжатия. По результатам дешифрирования максимум простирания трещин отрыва имеет азимут 55-60°, а валов сжатия - 285° при общем простирании зоны разлома 270°. В работе [4] приведены несколько иные данные для зоны Болнайского разлома в целом – среднее простирание трещин растяжения 65°, а валов сжатия 300-305°. Характерной деталью строения зоны сейсмогенных разрывов является наличие сдвиговых дуплексов,

которые формируют структуры типа pull-apart и push-up в зависимости от положения кулис сдвига. Также встречаются структуры растяжения на свободных изгибах сдвига, представленные сериями кулисных трещин отрыва и небольшими впадинами.

В целом комплекс сейсмогенных структур в четвертичных осадках в зонах Болнайского и Цэцэрлегского разломов представлен типичным сдвиговым парагенезом опережающих [7] и оперяющих разрывных и пликативных структур. Простирание опережающих разрывов закономерно связано с простиранием главного сместителя сдвигов. Вместе с тем наблюдается различие в угловых соотношениях между простиранием валов сжатия и главного сместителя для двух исследованных структур. В случае Болнайского разлома валы сжатия располагаются ближе к направлению главного сместителя сдвига, что, возможно, связано с большей долей вращения по часовой стрелке в его зоне по отношению к Цэцэрлегскому разлому.

В коренных породах разломы представлены единым сместителем. Многометровые смещения геоморфологических маркеров по разломам свидетельствуют о неоднократном обновлении быстрых движений, сопровождавшихся сильными землетрясениями. На это также указывает наличие как минимум двух генераций вторичных сейсмогенных разрывов земной поверхности в днищах речных долин. Отличие рассматриваемых сейсмогенных разломов состоит в простирании сместителя, длине и реализованной амплитуде смещения. В обоих случаях наблюдается тенденция увеличения ширины зоны разлома с увеличением ширины долин пересекаемых им водотоков. Это грубо соответствует известной по результатам экспериментов зависимости ширины зоны сдвига от мощности разрушаемого слоя [8]. Вместе с тем ширина зоны сейсмогенных

деформаций Болнайского разлома имеет относительно небольшие значения, в отдельных случаях даже аномально низкие. Объяснение этому факту возможно с двух позиций. Троекратное превышение амплитуды смещения по Болнайскому разлому над Цэцэрлегским можно интерпретировать с точки зрения большей «зрелости» парагенеза разрывов в зоне первого разлома по отношению ко второму. При прочих равных условиях в его зоне мгновенно наступила так называемая «зрелая дизъюнктивная стадия» деформаций [7], когда на большей части зоны разлома произошло объединение опережающих разрывов в единый сместитель. Возможно, при этом опережающие разрывы не успели сформироваться в полной мере и образовать широкую зону деформаций. В то же время большое значение может иметь соотношение повторяемости разрывообразующих землетрясений со скоростью осадконакопления в предгорной части хребтов, где трассируются разломы. В экспериментах [9] показано, что при быстром повторении смещений ширина зоны деформаций не нарастает, а относительно уменьшается при одной скорости осадконакопления и других равных условиях. Происходит телескопирование разрывов, связанных с главным сместителем сейсмогенного разлома, и трещины вновь формируются только в тонком верхнем слое, сформированном за период между событиями. Как в моделях, так и в природном аналоге прекрасно выражен процесс формирования положительного рельефа над зоной разлома, связанный с процессами разуплотнения осадков в результате активных деформаций.

Полученные закономерности могут быть использованы для диагностики условий формирования природных сейсмогенных разрывов в сейсмоактивных областях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вознесенский А.В. Землетрясение 26 июня (9 июля) 1905 г. на Танну-Ола // Изв. Вост.-Сиб. отд. ИРГО, 1908. Т. 35, вып. 2. С. 1–10.

2. Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии / Отв. ред. В.П. Солоненко, Н.А. Флоренсов. М.: Наука, 1985. 224 с.

3. Schlupp A., Cisternas A. Source history of the 1905 great Mongolian earthquakes (Tsetserleg, Bolnay) // Geophysical Journal International. 2007. V. 169. P. 1115–1131. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03323.x.

4. Неотектоника и современная геодинамика подвижных поясов / В.Г. Трифонов, Г.А. Востриков, А.Н. Кожурин и др. М.: Наука, 1988. 364 с.

5. Parfeevets A.V., Sankov V.A. Late Cenozoic tectonic stress fields of the Mongolian microplate // Comptes rendus – Geoscience, 2012. V. 344. P. 227–238. doi: 10.1016/j.crte.2011.09.009

6. Rizza M., Ritz J.-F., Prentice C., Vassallo R., Braucher R., Larroque C., Arzhannikova A., Arzhannikov S., Mahan S., Massault M., Michelot J.-L., Todbileg M., ASTER Team Earthquake Geology of the Bulnay Fault (Mongolia) // Bulletin of the Seismological Society of America. 2015. V. 105, № 1. doi: 10.1785/0120140119.

7. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал "Гео", 2003. 244 с.

8. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.

9. Le Guerroue E., Cobbold P.R. Influence of erosion and sedimentation on strike-slip fault systems: insights from analogue models // Journal of Structural Geology. 2006. № 28. P. 421–430.

#### STRUCTURE OF SEISMOGENIC DEFORMATIONS IN SHEAR ZONES (TSETSERLEG AND BOLNAI FAULTS, NORTH MONGOLIA)

A.G. Voskresensky<sup>1</sup>, V.A. Sankov<sup>1, 2</sup>, A.V. Parfeevets<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. A study has been made of the zones of Tsetserleg and Bolnay seismogenic faults, the movements along which resulted in the strongest earthquakes in Northern Mongolia: Tsetserleg (09.07.1905,  $M_W$ =8.0) and Bolnai (23.07.1905,  $M_W$ =8.4). Interpretation of detailed satellite images and field investigations allowed identifying the spatial trends in seismogenic deformation occurrence in unconsolidated sediments, typical for the left lateral strike-slips. Shown here are the similarities and differences between structural parageneses of the two faults. The obtained trends can be used to diagnose formation conditions of seismogenic ruptures in seismically active areas.

Keywords: seismogenic strike-slip faults, structural paragenesis, Northern Mongolia

\*\*\*

УДК 550.8.05

# БЛОКОВО-СЛОИСТАЯ СТРУКТУРА ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО УЧАСТКА ОПОРНОГО ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ 3-ДВ (ПО ДАННЫМ НИГ) И ОТРАЖЕНИЕ ПЛОТНОСТНЫХ АНОМАЛИЙ В ЧАСТОТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ЛОКАЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ

#### Н.К. Гайдай

Северо-Восточный государственный университет, Магадан, Россия Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан, Россия

Аннотация. Блоково-слоистая структура земной коры осложняет интерпретацию результатов глубинного сейсмического зондирования. Привлечение к данному процессу комплекса геофизических методов позволяет уменьшить неоднозначность выводов. В работе приводятся результаты сопоставления проведенных независимо друг от друга исследований, использующих различные геофизические методы. Анализу были подвергнуты частотно-энергетический и плотностной разрезы земной коры, выполненные вдоль северо-восточного участка опорного геолого-геофизического профиля 3-ДВ (2350–2620 км). Установлено, что зоны «прозрачности» частотно-энергетических характеристик совпадают с областями разуплотнения в земной коре. Характер поведения отражающих площадок и соответствующее распределение плотностных характеристик позволяет выделить на рассматриваемой территории три области, представляющие различные блоки земной коры. В ряде случаев указанные на современных тектонических картах границы блоков не совпадают с границами, устанавливаемыми комплексным анализом имеющейся геофизической информации.

Ключевые слова: частотно-энергетический разрез, плотностной разрез, глубинное строение, плотностная граница расслоения, отражающая площадка, зона разуплотнения, опорный геолого-геофизический профиль 3-ДВ

Блоковая структура земной коры выступает осложняющим фактором при интерпретации результатов глубинного сейсмического зондирования. Условия однозначности требуют привлечения комплекса геолого-геофизических данных. В представленной работе такими составляющими выступили частотноэнерге-тические характеристики локальных волновых пакетов [1] и плотностная модель земной коры, построенная методами новой интерпретационной гравиметрии (НИГ) [2, 3]. Комплексная интерпретация геофизических данных выполнена для северовосточного участка опорного геологогеофизического профиля 3-ДВ (2350-2620 км).

Частотно-энергетический разрез построен коллегами из Новосибирска (Сибирский научноисследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья) с помощью математической модели, устанавливающей связь между сейсмическим полем и структурно-физическими параметрами крупных объектов земной коры, имеющей слоистоблоковую структуру (рис. 1) [1]. Частотноэнергетические характеристики локальных волновых пакетов фактически определяются физическим состоянием определенной области земной коры. Суммарная энергия полного диапазона частот пропорциональна акустической жесткости среды. Обработка гетерогенного волнового поля осуществлена в специальной компьютерной технологии «StreamSDS». По характеру энергетической дифференцированности, наличию «прозрачных» зон возможно определение положения глубинных разломов

в земной коре, разграничивающих основные ее блоки. Положение отражающих площадок при этом демонстрирует характер слоистости земной коры.

Трехмерная плотностная модель земной коры построена с использованием методов новой интерпретационной гравиметрии для площади, по которой проходит данный участок профиля (рис. 2) [2, 3]. Земная кора моделируется системой пятигранных многослойных треугольных призм, каждая из которых характеризуется набором геометрических и физических параметров – пространственными координатами узлов призмы  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$ , а также мощностью отдельных ее слоев (которые, в свою очередь, представляют геофизические слои земной коры в традиционном их понимании) и аномальным значением плотности (скачком плотности)  $\Delta \sigma$ .

Плотностное моделирование позволило оценить рельеф подошвы гравитационно-активного слоя – так называемой плотностной границы расслоения в земной коре. Эта граница разделяет две области пространства – верхнюю неоднородную (в плотностном смысле) часть земной коры и нижнюю – квазиоднородную. Именно плотностные неоднородности верхней части земной коры преимущественно формируют различные по своей площади и мощности аномалии гравитационного поля. В пределах гравитационно-активного слоя при переходе от одного блока земной коры к другому (по латерали) устанавливаются скачки плотности различной природы и величины.



Рис. 1. Энергетический и плотностной разрезы земной коры СВ участка профиля 3-ДВ (2350-2620 км).



Рис. 2. Тектоническая схема (на основании схемы тектонического районирования Колымо-Охотского водораздела В.М. Кузнецова). 1 – терригенный конденсированный комплекс чехла срединных массивов и прогибов Яно-Колымской системы; 2 – терригенные конденсированный комплекс антиклинориев и поднятий Яно-Колымской системы; 3 – верхнеюрские терригенные молассы краевых прогибов; 4 – тонкотерригенные формации прогибов Яно-Колымской системы; 5 – нижнемеловые, преимущественно терригенные молассы; 6 – молассы неотектонических впадин; 7 – морские терригенные и «отдаленно» кремнистые формации; 8 – позднеюрские гранитоиды орогенного (коллизионного) этапа; 9 – крупнейшие установленные разломы и тектонические нарушения; 10 – скрытые разломы фундамента; 11 – контуры зон тектоно-магматической активизации, магматогенные поднятия: Тл – Тыэллахское магматогенное поднятие, Ор – Оротуканское магматогенное поднятие, Дж – Джелгалинская тектономагматическая зона; 12 – схема профиля 3-дВ.

С использованием полученных модельных параметров элементарных ячеек построен плотностной разрез земной коры вдоль профиля 3-ДВ на рассматриваемом участке. Для представления о блоковой структуре земной коры целесообразно отображение разреза в значениях плотности, приведенных к поверхности (т.е. без учета ее изменения с глубиной) (см. рис.1).

В области земной коры, расположенной ниже плотностной границы расслоения, ее плотностная структура устанавливается квазиоднородной. Наиболее вероятной причиной образования данной плотностной границы расслоения следует считать длительное тепловое и физико-химическое воздействие мантии, отличающееся по интенсивности в различных областях пространства.

Сопоставление энергетического и плотностного разрезов показывает, что практически на всем протяжении разреза наблюдается совпадение подошвы гравитационно-активного слоя земной коры с положением энергетических отражающих площадок.

Результаты плотностного моделирования позволяют предположить, что рассматриваемая территория может быть разбита на три принципиально отличающиеся по характеру глубинного строения и поведению отражающих площадок области (рис. 3). Первая расположена преимущественно в западной части листа, представляет Иньяли-Дебинский синклинорий (в южной части листа – его Бохапчинскую ветвь). Вторая область – Среднеканская ветвь Иньяли-Дебинского синклинория. Третья – Балыгычанское поднятие (Оротуканский блок).

В первой области в районе г. Сусумана плотностным моделированием устанавливается зона разуплотнения земной коры (средняя плотность 2.58–2.66 г/см<sup>3</sup>). Четко выделяются границы гранитоидных массивов (Чьорго, Негояхский, Маяк, Трубный, Б.Пороги, Хапчагай, Уаза-Ина, Б.Анначаг). В целом, в данной области земная кора сильно гранитизирована. Можно предположить, что уже на глубине 2 км область пространства, расположенная левее Дебинского разлома, а также в северной части листа правее Дебинского разлома, представляет собой единый магматический очаг, выступавший в свое время резервуаром для объема магмы, внедрившейся в верхнюю часть земной коры. Данный резервуар и являлся источником вещества для образовавшихся позже батолитов.

Вторая область – собственно Паутовский горст (Оротуканское поднятие). Определяется как область разуплотнения. Четко выделяются границы невскрытых на поверхности Приискательского и Паутовского гранитоидных массивов (средняя плотность 2.61–2.67 г/см<sup>3</sup>), разделенных областью триасово-юрских отложений сравнительно небольшой мощности (7–8 км) со средней плотностью 2.70–2.72 г/см<sup>3</sup>. Западная граница области оконтуривается Умарским, Паутовским и Долинным разломами. Однако плотностная модель показывает необходимость смещения данной границы левее относительно Умарского разлома, либо здесь уместнее вести речь не о разломе как о линии на карте, а о зоне разрывных нарушений шириной порядка 7–16 км.

Третья область выделяется севернее Паутовского разлома (Среднеканская ветвь Иньяли-Дебинского синклинория) и устанавли-вается как область уплотнения земной коры (средняя плотность 2.72–2.74 г/см<sup>3</sup>) с точечным внедрением небольших по площади и мощности интрузивов. На южном контакте гранитоидного интрузива Маяк устанавливается аномальная зона уплотнения 2.72– 2.80 г/см<sup>3</sup>.



Рис. 3. Схема характерных блоков земной коры. *1* – область 1; *2* – область 2; *3* – область 3; *4* – крупнейшие установленные разломы и тектонические нарушения; *5* – скрытые разломы фундамента; *6* – схема профиля 3-ДВ.

На энергетическом разрезе в пределах вышеуказанных областей наблюдается различное поведение отражающих площадок. Первая область отличается повышенным количеством слоев отражающих площадок и практически горизонтальным характером их расположения. Во второй области наблюдается увеличение хаотичности в расположении отражающих площадок. Границы выделенных областей на энергетическом разрезе выделяются резким изменением пространственного расположения энергетических преград. Эти границы пространственно совпадают с положением Умарского и Паутовского разломов (2460 и 2600 км соответственно).

Замечено, что все зоны разуплотнения, установленные плотностным моделированием и прослеживающиеся на глубину (в районах 2350, 2440 и 2615 км профиля), на энергетических разрезах отражаются провалом (опусканием) ступеней отражающих площадок в верхней части земной коры (до 20 км), а в ряде случаев – их разрывом (на глубине 40 км на 2350 км, на глубине 28–30 км на 2440 км, на глубине 15 км на 2615 км) – областями прозрачности. Данные зоны можно интерпретировать как участки земной коры, подвергшиеся длительному и, вероятно, неоднократному воздействию повышенного теплового потока, вызвавшего метаморфизацию глубинного вещества и перевод его в квазигомогенное состояние.

Граница Балыгычанского поднятия на представленном рисунке (рис. 3) показана в нетрадиционном месте [4]. Анализ энергетического и плотностного разрезов позволяет высказать предположение о возможном смещении данной границы в южном направлении. Замечено, что для земной коры на участке профиля от 2500 до 2620 км характерен подъем отражающих площадок, угол подъема при этом практически одинаков на все протяжении данного участка и составляет порядка 30°. В плотностной модели земная кора здесь выделяется как «тяжелый» блок. Граница этого блока как на энергетическом разрезе (по характеру поведения отражающих площадок), так и на плотностном разрезе (по значению плотности отдельных блоков) устанавливается в области Паутовского разлома, а не в области Правооротуканского разлома, как это отображено на современных тектонических картах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гошко Е.Ю., Ефимов А.С., Сальников А.С. Современная структура и предполагаемая история формирования земной коры юго-востока Северо-Азиатского кратона вдоль опорного профиля 3-ДВ // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 3. С. 785–798.

2. Ващилов Ю.Я. Новая интерпретационная гравиметрия – вместо и вместе с глубинными сейсмическими исследованиями. Статья 1. Методические основы новой интерпретационной гравиметрии // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2005. № 3. С. 2–16.

 Гайдай Н.К. Новая интерпретационная гравиметрия. Понятия. Возможности. Перспективы использования // Вестник Северо-Восточного государственного университета. Спецвыпуск. Магадан: Изд-во СВГУ, 2010. № 13. С. 10–14.
Геологическая карта и карта полезных ископаемых Колымо-Омолонского региона. Масштаб 1:500000 / Под ред.

К.В. Симакова. Объяснительная записка. Магадан: ГП «Магадангеология», 1998. 207 с.

## BLOCK-LAYERED STRUCTURE OF THE CRUST ON THE NORTHEASTERN SEGMENT OF THE REFERENCE GEOLOGICAL-GEOPHYSICAL PROFILE 3-DV (ACCORDING TO THE RESEARCH GROUP DATA) AND DENSITY ANOMALIES REFLECTING THE FREQUENCY-ENERGETIC CHARACTERISTICS OF LOCAL WAVE PACKETS

## N.K. Gayday

North-East State University, Magadan, Russia

North-East Multidisciplinary Research Institute, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia

*Abstract.* Block-layered structure of the Earth's crust complicates the interpretation of the results of deep seismic sounding. The use of integrated geophysical methods herein reduces ambiguity in conclusions. Here are the results for comparison of studies done independently of each other using various geophysical methods. Analysis has been made on frequency-energetic parameters and density structure of the crust along the northeastern segment of the reference geological-geophysical profile 3-DV (2350–2620 km). It has been found that the frequency-energetic parameter observability zones coincide with the areas of low-density crust. The reflection-site patterns and corresponding distribution of density characteristics provide the possibility to distinguish three crustal blocks in the investigated area. The boundaries of the mapped blocks sometimes do not coincide with the boundaries derived from complex analysis of available geophysical data.

*Keywords:* frequency-energetic profile, density profile, deep structure, density separation boundary, reflection site, area of low density, a reference geological-geophysical profile 3-DV

\*\*\*

#### УДК 539.3+539.4

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТЯХ ВЫРАБОТКИ

#### М.О. Еремин, П.В. Макаров

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Аннотация. Кровля, почва, целики, штреки и т.д. находятся в существенно неравновесных состояниях из-за усложнившихся горнотехнических условий добычи, а также увеличения нагрузок на забои. В настоящей работе представлены результаты моделирования шагов генерального обрушения в модельном горном массиве при движении очистной выработки. При прочих равных условиях, в расчетах варьировалась мощность основной кровли угольного пласта. Получены оценки шагов генерального обрушения.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, горный массив с выработками, длинноочистный забой, генеральное обрушение, накопление повреждений

Наиболее распространенным способом добычи полезных ископаемых, в настоящее время, является добыча длинными очистными забоями (longwall mining) [1]. Данная технология широко применяется как на шахтах Российской Федерации, так и в других странах [2–4] и, благодаря использованию проходческих комбайнов, позволяет более бережно извлекать уголь или другие полезные ископаемые, по сравнению, например, с буровзрывным способом.

Наряду с геофизическими методами, такими как каротаж (электрометрия и радиометрия), ультразвуковое просвечивание, а также визуальный осмотр, позволяющими определять состояние горного массива in situ, приобретают популярность методы математического моделирования механического поведения горного массива при ведении горных работ, о чем свидетельствует увеличение числа публикаций [2–6] по этому направлению, а также методы физического моделирования [1, 7].

При ведении очистных горных работ, напряженное состояние нетронутого массива существенным образом нарушается за счет образования больших полостей – новых свободных поверхностей. Вентиляционные и конвейерные ходки, грудь забоя становятся областями концентрации горного давления. При этом элементы горного массива – почва, непосредственная и основная кровли в локальных областях – могут терять устойчивость и переходить в предельное напряженное состояние. В работе неупругое деформирование элементов горного массива описывалось в рамках модели Друккера– Прагера–Николаевского. Эта модель имеет известные недостатки [8], однако ее применимость к задачам неупругого деформирования и разрушения горных пород и геосред, в том числе элементов горного массива, показана в работах [9, 10]. В модели предельное состояние элементов горного массива удобно анализировать через обобщенное кулоновское напряжение:

$$\sigma_c = \tau / (C + \alpha P), \tag{1}$$

где  $\tau$  – интенсивность напряжений, C – когезия,  $\alpha$  – коэффициент внутреннего трения, P – давление В областях, в которых  $\sigma_c=1$ , напряженное состояние соответствует предельному. В этих областях реализуется локальная потеря устойчивости и развивается неупругое деформирование элементов горного массива. Идет накопление повреждений, деградация сцепления и наблюдается переход эволюции НДС к сверхбыстрому катастрофическому режиму.

Расчеты показывают (рис. 1, a-e), что с первых метров подвигания забоя от монтажной камеры породы непосредственной кровли теряют устойчивость и переходят в неупругое состояние.

По мере увеличения пролета (до 100 м и более), область, охваченная неупругой деформацией, возрастает. В кровле пласта формируется поврежденный свод, разбитый на блоки разного масштаба локализованными повреждениями (рис. 2, a-e). Рисунок 2,  $\delta$  и e, демонстрирует распределение накопленных повреждений в кровле и почве горного массива после генерального обрушения, когда забой уходит на расстояние 165 м и 178 м соответственно, генеральное обрушение при этом происходит при подвигании забоя на 154 м.



Рис. 1. Распределение обобщенных кулоновских напряжений в последовательные моменты времени при наращивании выработанного пространства. Белому цвету соответствует значение, равное 1, отвечающее предельному состоянию элементов горного массива в локальных областях.  $L_1$ =30 м (*a*),  $L_2$ =65 м (*б*),  $L_3$ =100 м (*в*).



Рис. 2. Распределение накопленных повреждений в кровле и почве горного массива при различных величинах выработанного пространства.  $L_1$ =133 м (*a*),  $L_2$ =165 м (*б*),  $L_3$ =178 м (*в*).

Приведенные выше результаты расчетов соответствуют структурной модели, в которой мощность основной кровли составляет 21 м. Варьирование мощности основной кровли в модели дало следующие результаты (рис. 3): *L*г – шаг генерального обрушения, *L*к – высота свода повреждений.



Рис. 3. Распределения накопленной неупругой деформации, а также величины шагов генерального обрушения  $L_r$  и высот сводов повреждений  $L_\kappa$  при различных мощностях основной кровли – 3 м (*a*), 6 м (*б*), 7.5 м (*в*).

Полученные в настоящей работе результаты отмечены звездочками на рисунке 4. Эти результаты указывают на то, что высота свода повреждений, формирующегося в кровле угольного пласта, приблизительно равняется половине длины шага генерального обрушения. Зависимость величины шага генерального обрушения кровли ( $L_{\Gamma}$ ) угольного пласта от мощности слоя основной кровли ( $H_{\text{ок}}$ ) с коэффициентом корреляции 98 % является линейной (рис. 4,  $\delta$ ) и для рассмотренной структурной модели описывается следующей формулой:

$$L_{\Gamma} = 97.25 + 2.91 H_{\rm ok}.$$
 (2)

Сравнение полученных результатов с данными натурных наблюдений, а также данными математического моделирования методом конечных элементов и моделирования на эквивалентных материалах свидетельствует о хорошем согласии результатов, полученных в данной работе, при мощности слоя основной кровли, не превышающей 16 м (невязка находится в пределах 5-7 %). При большей мощности слоя основной кровли разница между результатами моделирования разными методами возрастает до 10-15 %. По-видимому, условие идеального контакта между литологическими разностями (совместности перемещений) не является корректным при мощности слоя основной кровли более 16 м. Литологические разности отслаиваются друг от друга при деформировании, неучет этого явления вносит погрешность в результаты, обеспечивая чрезмерную жесткость кровли.



Рис. 4. Зависимость шага генерального обрушения от толщины основной кровли. Звездочками показаны результаты, полученные в данной работе. 1 – результаты моделирования МКЭ, 2 – результаты физического моделирования, 3 – натурные наблюдения, данные взяты из работы [1] (*a*), аппроксимация полученных результатов моделирования (*б*).

По мнению авторов работы, ключевыми положениями для моделирования эволюции НДС горного массива в окрестностях выработки являются:

 – учет наиболее значимых элементов структуры горного массива; это, в первую очередь, слои непосредственной и основной кровли, почвы, вышележащих пород, угольного пласта;

– учет динамики процесса при моделировании отработки месторождений угля и/или других полезных ископаемых, т.е. учет скорости проходки и соответствующей скорости накопления повреждений, обусловленной уровнем напряжений. Учет времени процессов разрушения особенно важен при решении задач, связанных с прогнозом критических состояний в горном массиве с выработками, а следовательно, и с оценкой шагов обрушения кровли над выработанным пространством;

– при моделировании неупругого деформирования и разрушения горных пород и элементов горного массива важен учет неоднородности процесса разрушения во времени: наличие квазистационарной стадии сравнительно медленного разрушения и режима с обострением, когда процесс развивается в сверхбыстром режиме.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14– 17–00198).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Shabanimashcool M. Numerical modelling of the longwall mining and the stress state in Svea Nord Coal Mine: Thesis for the degree of Philosophie Doctor. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2012. 162 p.

 Хозяйкина Н.В. Обрушение пород кровли в лавах пологопадающих угольных пластов. Днепропетровск: Национальный горный университет, 2012. 127 с.

3. Jiachen W., Zhigang L. Study on coal face stability and movement behavior of the overlying rock strata of longwall top-coal caving in the soft coal seam, http://www.paper.edu.cn.

4. Verma A.K., Deb D. Numerical analysis of an interaction between hydraulic-powered support and surrounding rock strata // International Journal of Geomechanics. 2013. V. 13, № 2. P. 181–192.

5. Сдвижкова Е.А., Попович И.Н., Дудка И.В., Кузяева О.А. Геомеханическая оценка эффективности крепления и охраны участковых выработок в условиях шахты «Партизанская» ГП «Антрацит» // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. 2014. № 4. С. 129–133.

6. Власов С.Ф., Сидельников А.А. Пространственное моделирование геомеханических процессов при подземной разработке месторождений. Днепропетровск: Национальный горный университет, 2012. 223 с.

7. Петренко В.Д., Тютькин А.Л., Петренко В.И. Обзор аналитических и экспериментальных методов исследования взаимодействия массива и крепи // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2012. Вип. 1. С. 75–81.

8. Ревуженко А.Ф. Механика упругопластических сред и нестандартный анализ. Новосибирск: НГУ, 2000. 428 с.

9. Stefanov Yu.P. Numerical modelling of deformation and failure of sandstone specimens // Journal of mining science. 2008. V. 44, № 1. P. 64–72.

10. Макаров П.В. Математическая теория эволюции нагружаемых твердых тел и сред // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11, № 3. С. 19–35.

#### MATHEMATICAL MODELLING OF STRESS-STRAIN STATE EVOLUTION IN ROCK MASS SURROUNDING THE EXCAVATION

#### M.O. Eremin, P.V. Makarov

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

*Abstract.* Roof, floor, pillars, roadways etc. are in extremely non-equilibrium states caused by the complicated mining conditions and coal face loads. The paper presents the results of mathematical modeling of general roof caving in rock mass accompanying the excavation process. Under otherwise equal conditions, the calculations involved the varying thickness of the main roof layer. The estimates have been obtained for general steps of caving.

Keywords: mathematical modeling, excavated rock mass, long-wall mining, general caving, damage accumulation

\*\*\*

УДК 550.348

## РЕЗУЛЬТАТЫ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗОНЕ МОГОДСКОГО РАЗЛОМА

А.Ю. Ескин, С.П. Серебренников, Е.В. Брыжак

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

*Аннотация.* На примере Могодского разлома рассмотрена возможность изучения тектонических нарушений с помощью электроразведки методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Изложен один из способов сбора и обработки геофизической информации при решении такой геологической задачи, как картирование разлома. Приведены результаты обработки кривых ВЭЗ по нескольким профилям, дан анализ круговых ВЭЗ.

*Ключевые слова:* разлом, геоэлектрический разрез, удельное электрическое сопротивление, вертикальное электрическое зондирование, тектоническое нарушение

В последнее время изучению разломов и ослабленных зон в горных массивах придается огромное значение. Это связано со строительством разных по назначению сооружений, таких как атомные станции, газо- и нефтепроводы, железные и автомобильные дороги и т.д.

Типичным примером, хорошо выделенным на местности, является Могодский разлом, образовавшийся в результате одноименного землетрясения, произошедшего в 1967 г.

Могодский разлом является составной частью Тулэтской тектонической системы. При Могодском землетрясении возникла непрерывная система сейсмогенных разрывов протяженностью до 45 км, отчетливо выраженная в рельефе. Сам разлом расположен в 360 км от г. Улан-Батора и 80 км от г. Булган. Высотные отметки составляют 1500–1800 м. Климат в районе исследований резкоконтинентальный. Среднегодовая температура –1.9 °С, количество осадков – в среднем 265 мм в год.

Области тектонических нарушений Могодского разлома и прилегающей к нему территории хорошо выделяются, по данным сейсморазведки, отраженными волнами. Кроме сейсмических методов при определении зон разломов и зон повышенной трещиноватости с успехом применяются различные методы электроразведки (электрическое профилирование,

вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ)) [1].

Для выделения зон разломов и зон повышенной трещиноватости обычно используют два вида съемки в полевых условиях методом ВЭЗ: профильную в крест простирания оси искомой зоны и площадную.

Электроразведочные измерения выполнялись методом ВЭЗ при помощи цифровой электроразведочной аппаратуры «Электротест–С» (Россия).

Эта аппаратура имеет встроенное питание для линии АВ и может работать в режимах постоянного и переменного тока. Она имеет три режима накоп-

ления, что позволяет выполнять исследования в условиях электрических помех и запоминать данные измерений в энергозависимой памяти. Для выполнения работ была выбрана симметричная установка AMBN, разносы которой выбирались в зависимости от условий заземления и рельефа местности и достигали АВ/2 – 225 м, что при благоприятных геоэлектрических условиях дает возможность изучать распределение электрических сопротивлений на глубину 50 м и более. Шаг измерений между точками зондирований по профилю составил 25, 40 и 65 м в зависимости от удаленности от оси тектонического нарушения. Для заземления линии АВ применялись стальные электроды длиной 1.2 м и толщиной 12 мм, для устройства линии MN использовались латунные электроды длиной 0.4 м и толщиной 22 мм. При измерениях использовались разносы линии AB/2 - 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 9.0, 15.0, 25.0, 40.0, 65.0, 100.0, 150.0 и 225.0 м, линии MN/2 – 0.5 и 5.0 м. На разносах питающей линии АВ/2 - 15 и 25 м выполнены двойные измерения (так называемые «ворота») для перехода с линии MN/2 - 0.5 м на линию MN/2 -5 м. Данный переход предназначен для получения более уверенного измеряемого сигнала [2]. Данные измерений заносились в полевой журнал, а для дальнейшей обработки фиксировались в таблицах Exel. Интерпретация полученных результатов производилась с помощью программного обеспечения IPI2.Win, разработанного в МГУ [5]. Полученные разрезы кажущихся сопротивлений и геоэлектрические разрезы представлены на рисунках 1 и 2. Получены разрезы по трем профилям. Кроме того, на одном из профилей были выполнены три круговых ВЭЗ для фиксации направления линии разлома (рис. 3). Ошибка измерений не более 5 % обеспечивается путем повторных замеров, а также независимым контролем сравнения данных измерений на соседних точках. Привязка точек наблюдений осуществлялась с помощью GPS-геодезии и мерной ленты.



Рис. 1. Разрез кажущегося сопротивления и геоэлектрический разрез по профилю № 2, Могод, Монголия.

Геофизические измерения проводились по профилям, ориентированным в крест основных тектонических структур.

Предпосылки использования геофизических (мало- и среднеглубинных) методов для решения поставленных задач заключаются в том, что зоны тектонических нарушений в пределах кристаллического фундамента до 30-50 м характеризуются аномально низкими значениями скоростей сейсмических волн и удельных электрических сопротивлений (УЭС) по сравнению с вмещающими грунтами. Дифференцируемость грунтов по УЭС значительно выше, чем по скоростям, особенно для грунтов фундамента, из-за наличия конкретно выраженных по физико-механическим свойствам зон тектонических нарушений (разломов) [3]. Зоны, выполненные продуктами разрушения размерами от блоков и глыб до тектонической глинки, служат естественными водотоками и относительно лучшими проводниками электрического тока. Их удельное сопротивление, выраженное в Ом м, на 1-2 порядка ниже по сравнению с вмещающими скальными породами. В то же время результативность геофизических измерений определяется рельефом местности и другими

приповерхностными условиями, что и вызвало необходимость постановки опытных работ.

Разрезы кажущихся сопротивлений строятся в зависимости от разноса AБ/2. Считается, что на данную глубину проникает электрический ток [4]. Геоэлектрические разрезы наглядно показывают распределение слоев с различными значениями кажущихся сопротивлений ( $\rho_{\kappa}$ ) с глубиной (рис. 3). Слои с пониженными значениями ( $\rho_{\kappa}$ ) имеют повышенную пористость и относительно большее содержание влаги.

Распределение истинных сопротивлений с глубиной дает количественная интерпретация, представленная на геоэлектрических разрезах, которые являются отражением разрезов кажущихся сопротивлений, до глубины 80–100 м. По ним выделяются слои с высоким сопротивлением порядка 10000 Ом·м, средним от 200 до 500 Ом·м и низким до 50 Ом·м. По мощности эти слои меняются в широких пределах. Сами слои по профилю также разделяются на «блоки» с различным сопротивлением. Причиной такого разделения служит зона тектонического нарушения как в пределах кристаллического фундамента, так и при выходе на поверхность.



Рис. 2. Геоэлектрический разрез по профилю № 2, Могод, Монголия.



Рис. 3. Диаграммы распределения кажущихся сопротивлений.

По данным ВЭЗ выделяется блоковое строение фундамента. На разрезе видны вертикальные смещения блоков фундамента относительно друг друга. В результате интерпретации электроразведочных данных в верхней 10-метровой зоне выделяется ряд мелких слоев, которые связаны с почвеннорастительным слоем, литологическими границами, уровнем грунтовых вод и слоем сезонных изменений температур. В толще рыхлых грунтов, промежуточных между верхней зоной и фундаментом, имеют место отдельные аномалии геофизических полей различного объема, местонахождения и контрастности проявления, однако однозначную идентификацию их с определенными тектоническими структурами и литологией установить невозможно. Нет определенности и в приуроченности разлома в фундаменте к его поднятиям или впадинам. В целом выявленные геофизические границы в промежуточной толще грунтов повторяют форму рельефа верхней границы фундамента.

Как говорилось ранее, были выполнены круговые ВЭЗ в трех точках на профиле № 2: 1 – ВЭЗ № 11, восточный борт тектонического нарушения; 2 – ВЭЗ № 14, ось тектонического нарушения; 3 – ВЭЗ № 17 западный борт тектонического нарушения. На полученных диаграммах достаточно уверенно выделяется как сам разлом, так и его крылья. Распределение кажущихся сопротивлений на второй диаграмме резко отличается от двух других. Это связано с неоднородностью строения зоны тектонического нарушения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Джурик В.И. Выявление зон разломов и ослабленных участков горных пород в районах Монголии с помощью малоглубинной геофизики / В.И. Джурик, А.Ю. Ескин, С.П. Серебренников, Е.В. Брыжак, Л.А. Усынин, Ц. Батсайхан // Тезисы докладов IX Российско-Монгольской конференции по астрономии и геофизике. Иркутск, 2011. С. 19.

2. Ляховицкий Ф.М., Хмелевской В.К., Ященко З.Г. Инженерная геофизика. М.: Недра, 1989. 252 с.

3. IPI2Win. Руководство пользователя. М.: МГУ, 2001. 37 с.

4. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 501 с.

5. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований.

## RESULTS OF MODERN GEOPHYSICAL MEASUREMENTS IN THE MOGODSKY FAULT ZONE

#### A.Yu. Eskin, S.P. Serebrennikov, E.V. Bryzhak

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Using the Mogodsky fault as an example, consideration is being given to the possibility of study of tectonic faults involving vertical electrical sounding (VES). Presented here is one of ways of gathering and processing the geophysical information for the solution of such geological problem as fault mapping. The results of processing the VES curves on several profiles have been presented, the circular VES curves have been analyzed.

Keywords: fault, geoelectric section, specific electric resistance, vertical electrical sounding, tectonic fault

\*\*\*

УДК 519.234

## СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ (МЕТОД БЛИЖАЙШИХ СОСЕДЕЙ)

## Ф.Л. Зуев, А.И. Мирошниченко

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. При применении ряда методик анализа геологических данных требуется точное определение пространственного положения совокупностей различных структурных элементов: систем даек, разломов земной коры, тектонической трещиноватости и т.п. Одним из необходимых элементов этого анализа является построение структурных диаграмм, с помощью которых определяются такие параметры, как максимумы плотности структурных элементов и их разброс в пространстве. В работе рассмотрен один из способов построения диаграмм, позволяющий с наименьшими искажениями отобразить изучаемые объекты.

Ключевые слова: математическая статистика, частота явлений, карта плотности

В науках о Земле широко используются карты частоты встречаемости какого-либо дискретного явления. Для построения таких карт часто используется прямолинейный способ, сводящийся к последовательному наложению палетки (в наше время, как правило, виртуальной, так как подсчет ведется на компьютере) на различные участки территории и подсчету количества попавших в ее поле точек. Существенный недостаток метода в том, что, вопервых, результат очень сильно зависит от выбранной формы и размера палетки и, во-вторых, в том, что очень большая доля информации о расположении явлений оказывается неиспользованной. В итоге, при небольшом числе точек это приводит к картам очень низкого качества.

Частота явления в области – это, с точностью до единиц измерения, вероятность встретить явление в данной области. Даже если это может быть не так в строгом физическом смысле (имеющийся у нас набор точек может быть не выборкой, а полной совокупностью, явление может иметь место только при определенных условиях, например только на реках, а не в произвольной точке области и т.д.), все равно, вероятно, есть модель, в терминах которой читатель воспринимает информацию с частотных карт.

Математическая статистика разработала богатый арсенал методов и подходов для определения функции плотности вероятности по экспериментальным данным, под общим названием «методы непараметрической оценки плотности». Мы свободно можем черпать из него, не ограничиваясь вышеописанным способом с палеткой (называемым в статистике гистограммным методом), в поисках наилучшего представления данных.

Заметим, что частота явлений в окрестностях точки и расстояние от точки до ближайших явлений есть величины взаимосвязанные. Если говорить математически строго, то расстояние от точки до ближайшего явления обратно пропорционально квадратному корню из плотности явлений в окрестностях точки. В самом деле, если расстояние до ближайшего явления равно г, то описанный вокруг точки круг радиуса *r* будет содержать ровно одно явление и иметь площадь  $\pi \cdot r^2$ . Таким образом, плотность явлений внутри этого круга составит  $1/(\pi \cdot r^2)$ . Из соображений устойчивости лучше брать не первое ближайшее, а *N*-е ближайшее, имея круг, содержащий *N* событий. Также вместо расстояний до *N*-й точки можно брать сумму расстояний до *N*-й ближайших точек, используя больше информации о их взаимном расположении; правда, математическая интерпретация при этом усложняется (у нас нет строгой математической модели на этот случай).

В простейшем случае, если нас интересуют не количественные элементы плотности, а только качественная картина явления, мы можем использовать для построения карты непосредственно расстояние до *N*-го ближайшего события.

При попытке выразить результаты непосредственно в терминах плотности, однако, мы наталкиваемся на то обстоятельство, что в ближайших окрестностях точек, в особенности если координаты нескольких точек совпадают, плотность неограниченно растет. Для преодоления этого обстоятельства в статистике разработан ряд методов, известных как метод парзеновского окна и/или метод ядерной оценки плотности. Однако эти методы используют множество произвольных параметров, что возвращает нас к исходному вопросу о произволе при построении карты. Мы еще не исследовали этот аспект в достаточной мере.

# A STEREOMETRIC PATTERN OF THE STRUCTURAL DATA BASED ON NON-PARAMETRIC DENSITY ESTIMATION (NEAREST NEIGHBOR METHOD)

#### F.L. Zuev, A.I. Miroshnichenko

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The application of some techniques for the geological data analysis requires a precisely determined spatial location of the whole complex of different structural elements: dyke systems, crustal faults, tectonic fracturing etc. One of the elements necessary for this analysis is drawing the structural diagrams, which are used to determine such parameters as maximum densities of structural elements and their spacing. This work considers one of the ways of diagram drawing that allows for the least distorted reflection of the investigated objects.

Keywords: mathematical statistics, the frequency of the phenomena, the density map

\*\*\*

# УДК 550.844+546.791.027+632.126

## ДЕФОРМАЦИОННЫЙ ОТКЛИК ГЛАВНОГО САЯНСКОГО РАЗЛОМА В ФЕВРАЛЕ–МАРТЕ 2014 Г. В ЭФФЕКТЕ ЧАЛОВА–ЧЕРДЫНЦЕВА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ КУЛТУКСКОГО ПОЛИГОНА

А.М. Ильясова<sup>1</sup>, С.В. Рассказов<sup>1,2</sup>, Е.П. Чебыкин<sup>1,3</sup>, Е.Н. Воднева<sup>1,3</sup>, И.С. Чувашова<sup>1,2</sup>, С.А. Борняков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Приводятся результаты мониторингового ряда наблюдений 2012–2014 гг. деформационного эффекта Чалова–Чердынцева – вариаций изотопных отношений активностей урана (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) – в водах родника Култукского полигона, находящегося на палеосейсмодислокации в зоне Главного Саянского разлома (станция 14k). Низкие изотопные отношения всех имеющихся станций полигона в зоне разлома свидетельствуют об отсутствии деформаций. В феврале– марте 2014 г. на станции 14k зарегистрирован слабый деформационный отклик сейсмической активизации коры Южного Байкала.

Ключевые слова: Прибайкалье, подземные воды, <sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U, сейсмичность

Наличие палеосейсмодислокаций в зоне Главного Саянского разлома (ГСР) интерпретировалось как показатель его высокой сейсмической опасности [1]. По данным каталога Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН [2], с 1994 г. сейсмическая активность зоны ГСР проявилась в районе Култукского полигона, однако в течение короткого временного интервала (22.03.1995 г.-10.02.1999 г.) и в дальнейшем отсутствовала. В 2012-2014 гг. в зоне ГСР на Култукском полигоне были выполнены измерения изотопных отношений активностей урана (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) в подземных водах десяти станций, расположенных на палеосейсмогенных дислокациях или вблизи них. Эти данные составили независимую информацию о степени активности зоны разлома. Низкие значения этого параметра (1.14-1.45) свидетельствовали об отсутствии деформационных эффектов, за исключением повышенных значений на станции 40 (2.14–2.48), которая зафиксировала накопленные деформации на выходе ГСР на берег Байкала. Таким образом, этот возросший деформационный фон не относился непосредственно к его зоне [3]. В настоящей работе мы обращаем внимание на обнаруженные слабые деформационные эффекты в зоне ГСР в мониторинговых наблюдениях на станции 14k (родник на западной окраине пос. Култук, координаты: 51°44.001′ с.ш., 103°39.500′ в.д.).

Вариации (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) и 1/U в водах станции 14k рассматриваются в рамках семи деформационных эпизодов трех сейсмических активизаций коры Южного Байкала (рисунок, *a*).



Временная смена соотношений ( $^{234}U/^{238}U$ ) – 1/U (*a*) и временные вариации концентраций U (*b*), ( $^{234}U/^{238}U$ ) (*b*) в подземных водах станции 14k в контексте сейсмических активизаций на Южном Байкале. Максимальная концентрация U=0.96 мкг/л 10.01.2013 г. принимается на станции 14k в качестве общего компонента (I<sub>4</sub>=II<sub>4</sub>) для проб I и II сейсмических активизаций. Во вторую сейсмическую активизацию наблюдения отсутствовали. В это время могли проявиться деформационные эффекты, подобные эффектам третьей сейсмической активизации. Одно деление на оси абсцисс соответствует одному месяцу.

Первый деформционный эффект соответствовал сейсмической активизации в 2012 г., второй сейсмической активизации в 2013 г., от четвертого до седьмого – сейсмической активизации в 2014 г. и последовавшему за ней асейсмичному интервалу. Фигуративное поле  $III_1 - III_4$  частично смещено относительно фигуративного поля  $II_1\!\!-\!II_4.$  Наиболее заметны отличия в снижении ( $^{234}U/^{238}U)$  в четвертый эпизод 23.02.2014 г. (в снижении деформаций) и резком возрастании (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) и 1/U в пятый эпизод 22.03.2014 г. (в повышении деформаций). Пятый эпизод сопоставляется с землетрясением 19.03.2014 г., эпицентр которого находился на Култукском полигоне. Каждая сейсмическая активизация представлена фазами а (предшествующая), б (проявление события на полигоне), в (последующая), г (асейсмичная). Концентрации U в водах станции 14k были сравнительно низкими в фазу Ів и последовательно возрастали во время асейсмичной фазы Іг. К началу II сейсмической активизации, обозначившейся главным событием 08.01.2013 г. с эпицентром вблизи Обручевского разлома, концентрация U на станции 14k в пробе, отобранной через два дня после этого события, была на максимуме 0.96 мкг/л, но через 17 дней снизилась до 0.90 мкг/л. Перерыв в наблюдениях не позволяет судить о характере распределения U во время II сейсмической активизации. Через пять дней после ее финального землетрясения (т.е. 12.06.2013 г.) концентрация U была сравнительно низкой (0.71 мкг/л) и продолжала снижаться в последующих пробах первой половины асейсмичной фазы IIг. В фазу IIIб (22.03.2014 г.) была получена минимальная концентрация U (0.33 мкг/л), а в фазу IIIв (09.05.2014 г.) – максимальная (0.82 мкг/л) (рисунок, б).

Отношение  $(^{234}U/^{238}U)$  в водах станции 14k в I сейсмическую активизацию (фаза I6) было низким (1.09) и в 2012–2013 гг. достигало значения 1.14. В начале III сейсмической активизации наметилось снижение ( $^{234}U/^{238}U$ ) с переходом 23.02.2014 г. к минимуму 1.09, сменившемуся 22.03.2014 г. максимумом 1.24. Максимум соответствовал землетрясению 19.03.2014 г. с эпицентром на полигоне. В дальнейшем, 05.04.2014 г. и позже, восстановились значения ( $^{234}U/^{238}U$ ), существовавшие до III активизации (рисунок, e). На станции отчетливо выражен сценарий подготовительной стадии со снижением ( $^{234}U/^{238}U$ ) в фазу III*a* (проявлением компонента III<sub>3</sub>) и стадии проявления деформаций с максимумом в фазу III*b* (проявлением компонента III<sub>1</sub>).

Мы приходим к заключению о том, что вариации (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) в водах станции 14k служат в качестве чувствительного индикатора деформаций в зоне Главного Саянского разлома. В настоящее время эта зона не активна. Зарегистрированный слабый деформационный импульс на станции 14k в феврале– марте 2014 г. был производным сейсмической активизации коры Южного Байкала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 6. С. 936–937.

 Карта эпицентров последних десяти землетрясений. Иркутск: Байкальский филиал Геофизической службы, 2016. <u>http://www.seis-bykl.ru</u>.

3. Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) и <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–553.

#### DEFORMATIONAL RESPONSE OF THE MANE SAYAN FAULT IN FEBRUARY–MARCH 2014 TO THE CHALOV–CHERDYNTSEV EFFECT IN GROUNDWATER AT THE KULTUK POLYGON

A.M. Ilyasova<sup>1</sup>, S.V. Rasskazov<sup>1,2</sup>, E.P. Chebykin<sup>1,3</sup>, E.N. Vodneva<sup>1,3</sup>, I.S. Chuvashova<sup>1,2</sup>, S.A. Bornyakov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup>Limnological Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The results presented here are related to 2012-2014 monitoring observations of the Chalov–Cherdyntsev effect – variations in isotopic activity ratios ( $^{234}$ U/ $^{238}$ U) – in a water spring of the Kultuk polygon located at the paleoseismogenic dislocation in the Main Sayan Fault zone (14k station). Low isotope ratios for all stations inside the polygon in the fault zone showed no deformation. In February–March 2014, 14k station recorded slight deformation in response to seismic reactivation of the crust in South Baikal.

*Keywords*: Baikal area, groundwater, <sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U, seismicity

\*\*\*

УДК 556.3

# ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ТЕРМАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ШИВЕРТ В ХАНГАЙСКОМ РЕГИОНЕ (ПО ДАННЫМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

## Е.А. Кузьмина

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. В термодинамических расчетах получен химический состав воды, близкий по содержанию основных макроэлементов к аналитическому составу воды термального источника Шиверт. Ряд микроэлементов (Li, Al, Rb, Sr, Mo, Si), по данным физико-химического моделирования, может поступать в термальный источник Шиверт из гранитов. Происхождение элемента ванадия (V) остается пока открытым.

Ключевые слова: термальный источник, микроэлементы, физико-химическое моделирование

Термальный выход Шиверт расположен на территории Монголии в пределах Хангайского сводового поднятия. Это нагорье, высотой 2–3 тыс. м над уровнем моря и шириной до 200 км, простирается с северо-запада на юго-восток примерно на 700 км в центральной части Монголии. Термальный источник выходит на левобережной пойме р. Шиберту-Гол, правого притока р. Хойт-Тамир-Гол, в 20 км к северо-северо-востоку от г. Цэцэрлэг. Выход термальной воды приурочен к грабенообразной впадине и представлен тремя грифонами на заболоченной территории площадью 200 м<sup>2</sup> (рисунок). Температура воды источника Шиверт составляет 60°, минерализация – 324.3 мг/л, рН=8.07, химический состав воды – сульфатный натриевый [1].

Основным типом гидрогеологических структур на территории Хангая являются гидрогеологические массивы и обводненные разломы. Гидрогеологические бассейны встречаются редко и приурочиваются к небольшим межгорным котловинам. В пределах Хангайского региона отмечается позднекайнозойский вулканический ареал. Он сформировался на самом позднем этапе развития длительно развивавшейся (свыше 150 млн лет) Южно-Хангайской вулканической области [3]. Размеры ареала превышают 450×450 км и объединяют разновозрастные изолированные друг от друга вулканические районы, отдельные лавовые поля и потоки.

В соответствии с типизацией минеральных подземных вод [4] термальный источник Шиверт относится к провинции азотных кремнистых терм, приуроченной к территории Хангая. Эти термы связаны с кайнозойским этапом тектонической активизации, сменившим эпоху позднемезозойского магматизма. Минерализация азотных терм составляет 0.23–0.90 г/л. Величина pH азотных терм (pH=7.95–9.70) указывает на их слабощелочной и щелочной характер. Основу газового состава составляет азот – от 93.92 до 99.95 об. %.



Геологический и геотермический разрез через долину р. Шиверт (по работе [2]).

Изучение разрывной структуры в районе термального источника Шиверт показало, что основные структурные элементы – это разломы север-северозападного и субмеридионального простирания. Этим направлениям разломов соответствует измеренная трещиноватость пород. Однако собственно в районе термального источника преобладает трещиноватость северо-восточного простирания. Структуры этого направления благоприятно расположены относительно современного растяжения и поэтому представляют собой водопроводящие каналы.

Геологический разрез в районе выхода термальной воды Шиверт представлен палеозойскими интенсивно дислоцированными розовыми гранитами, залегающими на глубине 25–50 м, и верхним терригенным слоем четвертичного возраста, толщиной 25–40 м [5].

Основная задача исследований заключалась в определении генезиса термального источника Шиверт. Главный вопрос состоит в том, возможно ли формирование химического состава воды термального источника при взаимодействии воды с гранитами или необходимо рассмотреть какой-то другой источник поступления химических элементов в воду (кайнозойские базальты, мантийные флюидные потоки и пр.).

В исследовании генезиса состава воды источника Шиверт применялось физико-химическое моделирование, с помощью которого можно решать задачи, связанные с поступлением элементов в водный раствор, реконструкцией процесса миграции, концентрирования и осаждения химических элементов, определением формы существования элементов в водном растворе, газовой и твердой фазах.

Физико-химическое моделирование было выполнено с помощью программного комплекса «Селектор» [6] в его последней модификации [7]. В модели представлены все возможные в реальных условиях компоненты водного раствора, газы и твердые фазы, обеспеченные достаточно надежными термодинамическими данными, появления которых можно ожидать в процессе взаимодействия воды с гранитными породами.

Вначале с помощью физико-химического моделирования состава воды термального источника Шиверт была проверена корректность самой модели, базирующейся на химическом составе воды этого источника. Химический состав воды задавался по независимым компонентам и рассчитывался при температуре 60 °C в равновесии с атмосферой и без атмосферы.

Проверка предположения о том, могут ли граниты быть источником всех химических элементов или для формирования состава анализируемой воды необходимо участие ювенильного источника вещества, была проведена в два этапа. На первом этапе физико-химического моделирования проводилось исследование взаимодействия атмосферные воды – порода (граниты) при разных Р-Т-условиях. Данные о составе гранитов взяты из работы [8]. В расчетах изменялась степень взаимодействия вода – порода, выраженная коэффициентом, определяющим количество породы, взаимодействующей с 1 кг воды. На втором этапе моделирования рассматривался процесс охлаждения гидротермального раствора, полученного при температуре от 120 до 60 °С.

По результатам физико-химического моделирования было получено решение, наиболее точно соответствующее химико-аналитическим данным по химическим элементам. Было установлено, что элементы Li, Al, Rb, Sr, Mo, Si могут поступать и накапливаться в термальной воде из гранитов Хангайского батолита. Природа поступления элемента ванадия в термальную воду источника Шиверт пока остается открытой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Власов Н.А., Павлова Л.И., Чернышев Л.А. Минеральные озера // Минеральные воды южной части Восточной Сибири. М.: Недра, 1961. С. 189–245.

2. Badminov P.S., Ganchimeg D., Pisarsky B.I., Oyuntsetseg D. Special features of the forming of thermal waters of the eastern part of the Khangai neotectonic uplift // Proceeding of the Mongolian Academy of Sciences. 2009. T. 194, № 4. P. 64–70.

3. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Иванов В.Г. Внутриплитная позднемезозойская – кайнозойская вулканическая провинция Центральной – Восточной Азии – проекция горячего поля мантии // Геотектоника. 1995. № 5. С. 41–67.

4. Геохимия подземных минеральных вод МНР / Отв. ред. Е.В. Пиннекер. Новосибирск: Наука, 1976. 176 с.

5. Purevsuren Dorj, Galsantseren Purevdorj, Tseesuren Batbayar, Ovgor Bavuudorj. Future geothermal survey – study in Mongolia // International Geothermal Conference. Reykjavík, 2003. P. 15–19.

6. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск: Наука, 1981. 247 с.

7. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2010. 287 с.

8. Тектоника Монгольской Народной Республики: Труды Совместной советско-монгольской научноисследовательской экспедиции / Под ред. Н.С. Зайцева. Вып. 9. М.: Наука, 1974. 284 с.

## FORMATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF THE SHIVERT HOT SPRING IN THE KHANGAI REGION (FROM THE RESULTS OF PHYSICOCHEMICAL MODELING)

E.A. Kuz'mina

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Chemical composition of water determined through thermodynamic calculations appeared to be similar to the analytical composition of the Shivert hot spring water in macromineral element concentration. Some of the microelements found in the Shivert hot spring (Li, Al, Rb, Sr, Mo, Si) are emanating from granite according to the results of physicochemical modeling. The source of the element vanadium (V) emanation remains unknown.

Keywords: hot spring, microelements, physicochemical modeling

УДК 004+551.24.03

# МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В КРЫЛЬЯХ РАЗЛОМОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В САЕ-СИСТЕМЕ ANSYS

Р.М. Лобацкая, И.П. Стрельченко, Е.С. Долгих

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. С помощью метода конечных элементов в программе ANSYS проведено моделирование напряженнодеформированного состояния среды в зоне наклонной трещины, имитирующей зону динамического влияния разлома. При моделировании в качестве переменных параметров приняты: характер внешних нагрузок, угол наклона плоскости сместителя, длина моделируемого разлома и вещественный состав пород в противоположных крыльях. Установлено асимметричное распределение напряжений в лежачих и висячих крыльях. Определены количественные зависимости ширины зон аномального напряженного состояния в крыльях от переменных параметров. Результаты моделирования позволяют дифференцировать геологическую среду в крыльях разломов при решении прикладных геологогеофизических задач.

Ключевые слова: моделирование разлома, метод конечных элементов, программа ANSYS, асимметрия крыльев разломов

Изучение разломов литосферы и особенностей внутреннего строения зон их динамического влияния неизменно связано с решением множества прикладных задач в разных направлениях геологических исследований. Ответы на многие проблемные вопросы специфики разломообразования уже не одно десятилетие назад получены при физическом и математическом моделировании (тектонофизические школы ИФЗ РАН и ИЗК СО РАН). Эффективным инструментом тектонофизических исследований И моделирования напряженно-деформированного состояния литосферы в зонах разломов стали САЕ-системы, базирующиеся на программах конечно-элементного анализа [1-3 и др.].

Одной из важных прикладных задач геологии является оценка приразломных изменений геологической среды [4]. Так, хорошо известно, что распределение напряженно-деформиро-ванного состояния литосферы в зонах висячих и лежачих крыльев у разломов любого кинематического типа различно, что связано, в первую очередь, с наклонным положением плоскостей сместителей. Осознание этого факта влечет за собой необходимость количественной оценки ширины зон аномального напряженнодеформированного состояния среды не только в пределах приразломной области в целом, как это было в свое время рассчитано С.И. Шерманом [5], но и в каждом из крыльев отдельно, а привлечение инструментария CAE-системы ANSYS представляется в данном случае не только уместным, но и необходимым.

В основу моделирования для оценки характера асимметрии крыльев разломов положены представления об автомодельности физических систем в разных масштабах [6] и фрактальной иерархической организации неоднородностей [7–9 и мн. др.], которые вполне оправдали себя при изучении разломов и напряженно-деформированного состояния литосферы в зонах их динамического влияния [10]. Задача по оценке асимметрии крыльев разломных структур решалась авторами через определение ширины зон аномального напряженно-деформированного состояния, а моделирование осуществлялось на примере единичной наклонной трещины конечной длины и ширины, окруженной конечным трехмерным объемом, в котором в результате смещения крыльев разрыва возникает неоднородное локальное напряженно-деформированное состояние. При анализе результатов оценивался характер напряжений. Работа в программе ANSYS по имитированию поля напряжений в среде с наклонной трещиной проводилась при варьировании условий моделирования. Изменялись: 1) внешняя нагрузка (сжатие, сдвиг), а следовательно, в сочетании с углом наклона плоскости сместителя кинематический тип моделируемых разломов; 2) угол наклона плоскости сместителя (45, 60, 80°); 3) длина моделируемого разлома (10, 15, 20, 50 км); 4) вещественный состав пород в крыльях.

В описание геологической среды были заложены следующие ограничения: 1) координаты задавались в километрах; 2) наличие неоднородностей, обычно имеющих место в геологической среде, не учитывалось; 3) форма плоскости трещины на глубину принята как полуэллиптическая, приближенная к природной; 4) геометрия модели представлена параллелепипедом с несквозной центральной полуэллиптической трещиной, лежащей на границе разделения двух сред с разным вещественным составом (рис. 1); 5) параметры модели разделены на два типа: постоянные (длина (a), ширина (b) и высота (h) параллелепипеда, имитирующего геологическую среду) и переменные (длина трещины L, ее глубина Н, угол наклона сместителя трещины α), позволяющие провести несколько итераций моделирования; 6) рассматривалась упругая модель, а свойства моделируемых горных пород (гнейс, гранит, мрамор) оценивались через модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

Процесс моделирования включал несколько обязательных шагов. При генерации конечноэлементной сетки (КЭ-сеть) использованы гексаэдрические элементы оптимальной плотности с автоматическим соединением в модели плоскости разлома и зоны его динамического влияния (рис. 1, *e*). Задание параметров симуляции включало «закрепление» границ модели и приложение внешней нагрузки. Под нагрузкой в ANSYS понимается приложение сосредоточенных или распределенных сил на модель, поэтому предполагалось, что блок геологической среды, осложненной наклонной трещиной, находится в напряженном состоянии под действием внешних сил – сжатия, сдвига, моделировавшихся поочередно (рис. 1, f, g). Построение геометрии модели и задание параметров для моделирования напряженно-дефор-мированного состояния в области наклонной трещины позволили перейти к выполнению расчетов и их последующему анализу, результаты которого отражены на рис. 2–7.

Моделирование напряженного состояния среды в зоне наклонной трещины при сжатии (анализ приповерхностной части модели) показало, что чем длиннее моделируемый разлом, тем в целом выше абсолютные значения максимумов напряжений при равных внешних нагрузках. Вне зависимости от длины максимальные значения напряжений в висячих крыльях разломов располагаются значительно дальше от плоскости сместителя, чем в лежачих. Удаленность максимумов напряжений соответствует углу наклона плоскости сместителя и моделируемому кинематическому типу разлома. У надвигов удаленность максимумов напряжений наибольшая, у сбросов — наименьшая. Относительная симметрия расстояний максимумов от плоскости сместителя наблюдается в зонах трещин, имитирующих шарьяж (см. рис. 2).



Рис. 1. Основные этапы подготовки модели для определения напряженного состояния в зоне наклонной трещины методами конечно-элементного анализа в программе ANSYS.



Рис. 2. Результаты моделирования напряженного состояния в зоне наклонной трещины с изменением ее длины от 50 до 10 км при внешних сжимающих нагрузках (на поверхности).



Рис. 3. Значения коэффициентов интенсивности напряжений в зоне наклонной трещины при внешних сжимающих нагрузках (на глубину).



Рис. 4. Результаты моделирования напряженного состояния в зоне наклонной трещины с изменением ее длины от 50 до 10 км при внешних сдвигающих нагрузках (на поверхности).

Напряженное состояние среды в зоне наклонной трещины на глубину оценивалось по значениям коэффициента интенсивности напряжений ( $K_{\rm II}$ ), который характеризует обратно симметричное нагружение относительно линии трещины и деформацию, происходящую поперек фронта трещины (см. рис. 3). Максимальные значения  $K_{\rm II}$  в условиях сжатия наблюдаются для надвигов, минимальные – для сбросов. Важно отметить, что графики значений  $K_{\rm II}$ взбросов и шарьяжей, имеющих углы падения плоскостей сместителей 60 и 30° соответственно, практически совпадают. С уменьшением длины трещины уменьшаются значения  $K_{\rm II}$ .

Результаты моделирования напряженного состояния среды в зоне наклонной трещины при внешних сдвиговых нагрузках показали, что максимумы напряжений при крутом угле падения плоскости сместителя (80°) располагаются почти симметрично в противоположных крыльях (см. рис. 4).

Как видно из графиков, при уменьшении угла падения плоскости сместителя трещины (60, 45°) появляется асимметрия в распределении максимумов напряжений: в висячем крыле они отдаляются от трещины, в лежачем, напротив, приближаются к трещине. Абсолютные значения максимумов напряжений возрастают с уменьшением угла наклона плоскости трещины, но при этом разница в их максимальных значениях в противоположных крыльях увеличивается. При анализе напряженного состояния на глубину, в отличие от случая исследования коэффициентов интенсивности при сжатии, когда анализировались значения К<sub>II</sub>, при сдвиге рассматривались значения коэффициента К<sub>Ш</sub>, характеризующего нагружение вдоль фронта трещины (см. рис. 5).



Рис. 5. Значения коэффициентов интенсивности напряжений в зоне наклонной трещины в ее висячем и лежачем крыльях при внешних сдвигающих нагрузках (на глубину).



Рис. 6. Максимальные значения напряжений в зоне наклонной трещины при изменении ее длины и угла наклона при внешних сжимающих нагрузках.



Рис. 7. Максимальные значения напряжений в зоне наклонной трещины при изменении ее длины и угла наклона при внешних сдвигающих нагрузках.

Асимметрия и пропорции соотношений ширины аномальной зоны висячих и лежачих крыльев охарактеризованы количественно (рис. 6, 7), и установлено, что ширина зоны аномально напряженного состояния в висячем крыле по отношению к лежачему изменяется от 0.3 единицы при крутых углах падения до 1.7 единицы при пологих в случае внешних сжимающих нагрузок и от 1.5 единиц при крутых углах падения до 3.0 единиц при пологих в случае внешних сдвиговых нагрузок. Установленная асимметрия в распределении напряжений в противоположных крыльях трещин, имитирующих разломы длиной от 10 до 50 км, и определение количественных соотношений ширины зон аномального напряженного состояния в висячих и лежачих крыльях позволяют использовать полученные при моделировании результаты при прогнозных оценках зон динамического влияния разломов и решении прикладных задач геологии [11, 12].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлова А.В., Ребецкий Ю.Л. Математическое моделирование тектонических структур. Конечно-элементные численные комплексы NASTRAN и U-WAY // Проблемы тектонофизики. К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М.: Изд-во ИФЗ, 2008. С. 37–68.

2. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упругих хрупкопластичных материалов // Физическая мезомеханика. 2005. № 3. С. 129–142.

3. Адамович А.Н., Иванова С.В., Шерман С.И. Роль температурного фактора в эволюции напряженного состояния Байкальской рифтовой зоны // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. Новосибирск: Издво СО РАН, филиал «Гео», 2003. С. 233–237.

4. Лобацкая Р.М. Разломно-блоковая структура Байкало-Енисейского разлома в районе эксплуатации объектов ядерной энергетики // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. № 5. Р. 547–562.

5. Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.

6. Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 256 с.

7. Адилов З.А., Асманов О.А. Проявления фрактальности в сейсмичности территории Дагестана // Геология и геофизика юга России. 2012. № 2. С. 3–10.

8. Крылов С.С., Бобров Н.Ю. Фракталы в геофизике. СПб: СПГУ, 2004. 135 с.

9. Митин В.Ю. Метод минимального покрытия и другие методы фрактального анализа изрезанности рельефа поверхностей // Вестник Пермского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2013. № 2(21). С. 16–21. 10. Шерман С.И. Деструкция литосферы: разломно-блоковая делимость и ее тектонофизические закономерности // Geodynamics & Tectonophysics. 2012. № 4. С. 315–344.

11. Лобацкая Р.М. Структурная зональность разломов. М.: Недра, 1987. 128 с.

12. Lobatskaya R.M., Strelchenko I.P. GIS-based analysis of fault patterns in urban areas: a case study of Irkutsk city, Russia // Geoscience Frontiers. 2016. V. 7, № 2. P. 287–294.

#### MODELLING OF STRESS IN THE FAULT WALLS USING THE FINITE ELEMENT METHOD IN COMBINATION WITH ANSYS' CAE SIMULATION SOFTWARE

R.M. Lobatskaya, I.P. Strelchenko, E.S. Dolgich

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The ANSYS finite element program has been used to model the stress state of the medium in the zone of the inclined crack simulating the area of dynamic influence of a fault. The variables involved were character of the external loads, fault plane slope, simulated fault length, and composition of the rocks in the opposite walls of the fault. There has been an asymmetrical distribution of stresses found in the hanging wall and the footwall. Quantitative relationships have been identified between the width of anomalous stress state zones in the fault walls and the variable parameters. The results of modelling allow us to differentiate the geological medium in the fault walls at solving the problems of applied geology and geophysics. *Keywords:* modelling of faults, finite element method, the ANSYS program, asymmetry of fault walls

\*\*\*

УДК 551.2/.3.24.243+550.3.8.342

## ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЕЛИМОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА

## А.И. Никонов

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

*Аннотация.* В работе показано, что линеаменты, фиксирующиеся на земной поверхности при исследовании аэрокосмических снимков, отражают градиентные зоны полей напряжений разного ранга. Данные зоны образуются под действием геодинамических процессов разного уровня. Геометрическое подобие проявляющихся блоковых структур линеаментов определяется с кратностью около 3.

*Ключевые слова:* линеамент, геодинамический процесс, деформация, аэрокосмический снимок, блоковая делимость с кратностью 3

Формирование тектонических структур пликативного и дизъюнктивного характера означает, что породы земной коры и осадочного чехла изначально должны были быть подвержены деформированию, то есть воздействию глубинных геодинамических процессов, приводящих к пластическим деформациям или потере их прочностных свойств и последующему разрушению.

В работах Ю.О. Кузьмина [1, 2] дается анализ существующих подходов – кинематического и силового для определения геодинамики как научной дисциплины. Важным в нем является то, что деформация есть результат, непосредственной причиной которого является движение, а не силы (или напряжения как силы, нормированные на площадь их приложения). Силы сами по себе еще не определяют деформаций, которые должны возникнуть. Следовательно, объяснить происхождение деформаций – это значит объяснить происхождение тех движений, которые привели к изменению взаимного расположения отдельных частей тела.

Целью данного изучения является рассмотрение натурных геолого-геофизических и модельных исследований, относящихся к вопросам делимости земной коры на основе представлений о ее блоковом строении и унаследованности геодинамических процессов, формирующих объективную пространственную структуру разноранговых систем линеаментов, отраженных в породах земной коры и осадочного чехла.

Установление закономерностей линеаментообразующих факторов на земной поверхности является, безусловно, ключевым звеном геодинамической и геоморфологической интерпретации линеаментов.

При выделении линеаментов методом структурного дешифрирования исследователь в большей степени опирается на существующую тектоническую концепцию или тип разломной зоны, запечатленный на современном снимке, а также на отдельные факты зрительных ассоциаций и собственную интуицию, чем на понимание природы формирования региональ-ных и локальных структурных взаимосвязей пространственно-временных закономерностей линеаментно-блоковых систем. Авторы основываются на различных представлениях об иерархической делимости земной коры и верхней мантии, а также факторах, формирующих структурный каркас территории исследований, и, как следствие, физическом смысле, вкладываемом в понятие линеамент.

С позиции автора под линеаментами понимаются спрямленные системно-упорядоченные элементы в структуре земной поверхности, формирующиеся за счет градиентных зон в поле напряжений, под действием разноранговых геодинамических процессов. В их пределах могут формировать-

ся элементы пликативной структуры, а при превышении уровня порога прочности геоматериалов зоны отрывных и сдвиговых деформаций (флексуры, разломы, зоны повышенной трещиноватости и т.п.).

В связи с тем, что в структуре земной поверхности (ландшафта) могут отражаться различные направления простирания линейных элементов за счет наложения разновременных локальных и региональных тектонических полей напряжений, необходимо проведение системного палеотектонического анализа ее развития с последующим выявлением главных, определяющих направлений линеаментов, отвечающих геодинамическим обстановкам формирования структурного плана исследуемой территории.

В работах [3-5] по структурному дешифрированию нефтегазоносных провинций использован принцип «от общего к частному», где главным в применяемой методике структурного дешифрирования является выделение не отдельных, взаимонезависимых и хаотично распределенных линеаментов, а их связь с закономерно упорядоченными ранжированными системами линеаментов, свойственных данному масштабу изучаемого региона. Принципиальный результат структурного дешифрирования на мелко- и среднемасштабных снимках – выявление упорядоченности в структуре линеаментов по их ширине и размеру блоков, которые соответствуют соотношению размеров соседних рангов, численно равных трем. Близкий результат при анализе природных объектов получен В.В. Пиотровским, В.Ю. Забродиным, В.Д. Наливкиным и др., которые также определили геометрическое подобие блоковых структур с кратностью около трех.

На примере структуры кратонов Африканского континента [6] можно показать, что общий структурный стиль региона, по мнению автора, характеризуется определенной упорядоченностью (рис. 1, a). Интересной в данной работе является диагональная структура линеаментов (рис. 1,  $\delta$ ), разделяющая кратон на блоки, имеющие размерность 3, причем доминирующими элементами разрывов (система северо-восточных разломов), сопоставляемых с зонами линеаментов (рис. 1), образующих эту систему,

служат региональные зоны разломов. Внутри этого блока имеются два заметных линеамента, при этом расстояния между ними и основными разломами одинаковы. Северо-западные линеаменты отстоят друг от друга на таком же расстоянии, что и северовосточные.

В данной работе автор рассматривает Африканский континент с позиции кратонов, осложненных рифтами, как модель для понимания общей его структуры (рис. 1, в), отмечая, что земная кора гармонично связана с подстилающим материалом и что определенные формы и размеры рифтов каким-то образом обусловлены процессами, происходящими в верхней мантии. Важной характеристикой, с геодинамических позиций, в структуре кратонов рифтовых долин являются элементы унаследованности и упорядоченности, обычно четко выраженные во всех структурах. Они представляют широкий возрастной интервал, где архейские структуры малы, а более молодые становятся обширными.

Данные закономерности наблюдаются в образцах [7], на которых были проведены испытания по образованию многоранговой дискретной структуры при их деформировании, когда образец не доводится до макроразрушения, а испытывает значительные пластические деформации.

На рис. 2 отчетливо наблюдались четыре уровня организации подобных блоковых структур.

Утолщение полос на стадии III–IV происходит за счет объединения образовавшихся мелких трещин более низкого ранга, но при этом порядок делимости остается такой же. Отношение среднегеометрических размеров блоков соседних рангов составляет значение, близкое к 3.

Следует подчеркнуть, что изменение пластичности образцов за счет различного содержания отвердителя приводило в экспериментах к незначительному смещению среднегеометрических размеров блоков, но не изменяло величину отношения  $(l_{i+1}/l_i)$ , остававшуюся равной 3. Необычным, по словам авторов статьи, является устойчивость величины отношения  $(l_{i+1}/l)$  вне зависимости от формы и размеров образцов.



Рис. 1. Схема тектонического строения Африки, на которой в качестве основной структурной единицы принят кратон рифтовых долин (*a*); структура линеаментов северо-восточного и северо-западного простирания, разграничивающих кратон на блоки разного порядка ( $\delta$ ); мозаичная схема расположения тектонических структур Восточной Африки (*в*) [6].



Рис. 2. График зависимости кривой нагрузки (F) от времени, под которым показаны стадии деформации образца эпоксидной смолы (I – IV), демонстрирующие развитие блоковой структуры трещин в плане (под графиком).

Полученные результаты делимости (подобие блоковых структур с кратностью около 3) на основе метода структурного дешифрирования линеаментов позволяют использовать их для построения карт структурно-тектонического каркаса исследуемых территорий.

Для сейсмоактивных территорий данное подобие блоковых структур с кратностью около 3 нарушается глубинными сейсмическими процессами, приводящими к дополнительному деформационному воздействию на градиентные зоны, формирующиеся под действием разноранговых геодинамических процессов. Наверное, поэтому в работе [8] для сейсмоактивного региона Центральной и Восточной Азии были получены иные соотношения делимости литосферы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин Ю.О. Современная аномальная геодинамика асейсмичных разломных зон // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2002. № 1 (20). 27 с.

 Кузьмин Ю.О. Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике // Физика Земли. 2014. № 5. С. 51–64.

3. Кравцов В.В., Никонов А.И. Системно-иерархическая структура полей напряжений и ее отражение на аэрокосмических снимках на примере Самотлорского месторождения (Черногорская площадь) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 1996. № 8–9. С. 18–22.

4. Никонов А.И. Роль геодинамических процессов в функционировании подземных хранилищ газа (на примере Щелковского и Касимовского подземных хранилищ): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2003. 127 с.

5. Никонов А.И. Тектонофизические аспекты структурного дешифрирования линеаментных систем // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Мат-лы Второй молодежной школы семинара. М.: ИФЗ, 2011. Т. 2. С. 78–93.

6. Брок Б.Б. Рифтовые долины кратона // Система рифтов Земли. Труды симпозиума. Оттава, Канада, 4–5 сентября 1965 г. М.: «Мир», 1970. С. 74–91.

7. Асотрян Х.О., Соболев Г.А. Образование иерархической структуры разрывов при деформировании высокопластического материала // Физика горных пород при высоких давлениях. М., 1991. С. 138–141.

8. Семинский К.Ж. Иерархия зонно-блоковой структуры литосферы Центральной и Восточной Азии // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 10. С. 1018–1030.

#### TECTONOPHYSICAL ASPECTS OF DIVISIBILITY OF THE EARTH'S CRUST AND THEIR SPATIAL IMPLEMENTATION BASED ON LINEAMENT ANALYSIS

#### A.I. Nikonov

Oil and Gas Research Institute, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Abstract.* The paper shows that the lineaments seen in aerospace images of the Earth's surface reflect the gradient zones of the stress fields of different ranks. These zones are formed under the influence of geodynamic processes at various levels. Geometrically similar lineaments and blocks make up the hierarchy with multiplicity about 3.

Keywords: lineament, geodynamic processe, deformation, aerospace image, blocks with multiplicity divisible by 3

\*\*\*

УДК: 551.248.2(517)

# АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В БАССЕЙНАХ РЕК СЕЛЕНГА, ОРХОН И ТОЛА (МОНГОЛИЯ)

*А.В.* Парфеевец<sup>1</sup>, В.А. Саньков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Дается оценка активности разломов, условий деформаций и поля напряжений для территории Северной Монголии, охватывающей бассейны рек Селенга, Орхон и Тола в связи с оценкой сейсмической опасности территории из-за предполагаемого строительства гидроэлектростанций. Район находится в зоне динамического влияния восточного сегмента Северо-Хангайского сдвига, который разветвляется на несколько сегментов. Их распределение и распределение типов напряженного состояния связаны с положением относительно окончания главного сместителя сдвига. В северо-восточной ветви, прослеживающейся вдоль долины р. Селенга, преобладают левосторонние сдвиги и сбросы и реконструированы парагенетически связанные с ними тензоры сдвига, растяжения и транстенсии. В юго-восточном секторе преобладают северо-западные правосторонние сдвиги, взбросо-сдвиги и надвиги и реконструированы соответствую-

щие им стресс-тензоры сдвига, транпрессии и сжатия, в юго-западном секторе – субширотные левосторонние сдвиги и взбросо-сдвиги с реконструкциями стресс-тензоров сдвига, транспрессии и сжатия. Установлено, что в радиусе 100 км от местоположения створов планируемых ГЭС на реках Селенга, Эгийн-Гол, Орхон и Тола располагаются от трех до шести разломов, имеющих признаки голоценовой сейсмогенной активизации. Таким образом, для территории возможного строительства ГЭС в Северной Монголии фиксируется высокий сейсмический потенциал разломов, что необходимо учитывать при проектировании и строительстве

Ключевые слова: активный разлом, кинематика, палеонапряженное состояние

Территория Северной Монголии, охватывающая бассейны рек Селенга, Орхон и Тола, до настоящего времени недостаточно изучена с точки зрения оценки активности разломов, условий деформаций в их зонах и полей тектонических напряжений. Она находится в зоне динамического влияния широтного Северо-Хангайского генерального разлома, который на своем восточном окончании дихотомирует. Одна его ветвь отклоняется к северовостоку и прослеживается вдоль долины р. Селенга, а вторая представляет собой кластер разломов ССЗ направления в Орхон-Тольском междуречье. Актуальность исследования определяется необходимостью оценки сейсмической опасности территории в связи с предполагаемым строительством ГЭС на реках Селенга, Эгийн-Гол, Орхон и Тола.

Восточный сегмент Северо-Хангайского разлома и его северо-восточное продолжение представляют собой структуру типа releasing bends на широтном сдвиге [1], которая формирует систему кулисных грабенов-впадин, используемых долинами рек Селенга, Бугсэйн-Гол, Эгийн-Гол (Бугсэйнгольская и Хутагская впадины и др.) (рисунок, группа точек наблюдения 1). Впадины, как правило, это полуграбены, ограничены разломами северовосточного и субширотного простирания. Далее на восток широтная releasing bends структура практически полностью преобразуется в систему полуграбенов, которая прослеживается уже в СВ направлении (Селенгинская, Цаганнурская и др.).



Схема плиоцен-четвертичных разрывных нарушений и напряженного состояния земной коры восточного сегмента зоны Северо-Хангайского разлома. 1 – кайнозойские впадины; 2 – сбросы; 3 – сдвиги; 4 – надвиги; 5 – участки разломов с голоценовой активностью; 6 – точки наблюдения; 7 – предполагаемые локации строительства гидроэлектростанций. Буквами обозначены впадины: Б – Бугсэйнгольская, Дз – Дзуннурская, Хт – Хутагская, С – Селенгинская, Ц – Цаганнурская, Х – Хубсугульская. Цифрами обозначены группы стресс-тензоров для: 1 – разломов восточного сегмента Северо-Хангайского разлома, 2 – разломов в междуречье рек Бугсэн-Гол и Идэр-Гол, 3 – Хануйгольского разлома, 4 – разломов в междеречье рек Орхон и Тола. На вставке внизу – классификация стресс-тензоров по [2].

В целом, восточный сегмент Северо-Хангайского разлома характеризуется транстенсивной обстановкой и левосторонними сбрососдвиговыми смещениями. Впадины заполнены озерно-аллювиальными плиоцен-четвертичными осадками мощностью до 100 м [3]. На плейстоценголоценовую активность разломов, ограничивающих впадины, указывают деформации и смещения долин временных водотоков и конусов выноса. Реконструкции стресс-тензоров восточного сегмента Северо-Хангайского разлома показывают режимы сдвига и растяжения.

Для южного крыла восточного сегмента Северо-Хангайского разлома характерны деформации, формирующиеся в транспрессивной обстановке (рисунок, группа точек наблюдения 2). Южнее Бугсэйнгольской впадины в междуречье истоков реки Селенга – рек Бугсэйн-Гол и Идэр-Гол расположена серия субширотных разрывов, продолжающих и подставляющих с юга осевую часть зоны центрального сегмента Северо-Хангайского сдвига. Для этой серии разломов в целом характерны левосторонние взбросо-сдвиговые смещения с сейсмогенными обновлениями. Разлом, ограничивающий Дзуннурскую впадину с севера, изменяет свое простирание с восток-северо-восточного на западном сегменте на северо-западное на восточном сегменте. В целом разлом представляет собой левосторонний сдвиг со сбросовой компонентой отрезке северона восточного простирания, где наблюдается расширение впадины с озерной котловиной. Его восточный отрезок субширотного и северо-западного простирания интерпретируется по смещениям долин временных водотоков как левосторонний сдвиг. На этом отрезке зафиксированы сейсмогенные разрывы. Простирание сейсмодислокации 90°, простирание ложбин и рвов 60-75°, валов сжатия 310°. Уступы с простиранием 90-110°, высотой до 1.5 м, фиксируют поднятие северного крыла, что предполагает небольшую взбросовую компоненту смещений. Вдоль линии дислокаций смещены конусы выноса ручьев с амплитудой до 20.0 м, а одноактные амплитуды горизонтальных смещений достигают 3.5 м. Реконструкции полей паленапряжений показывают сдвиговые режимы, режим сжатия с северовосточным направлением оси сжатия и режимы растяжения на отрезке северо-восточного простирания.

Серия разломов субширотного и восток-северовосточного простирания к востоку от Дзуннурской впадины также характеризуется левосторонними взбросо-сдвиговыми смещениями и сейсмогенными обновлениями. Плейстоцен-голоценовые смещения зафиксированы на одном из уступов субширотного простирания. Смещена первая надпойменная терраса с амплитудой 3.5 м, примерная вертикальная компонента смещений по разорванным конусам выноса двух генераций составляет 2.5 и 4.0 м. Левый борт долины временного водотока в целом смещен на 58 м. Линия сейсмодислокаций на одном из разломов восток-северо-восточного простирания начинается уступом с поднятым южным крылом, амплитуда вертикального смещения изменяется по простиранию с запада на восток от 2 м на коренном склоне (0.7–0.8 м в конусе выноса ручья) до 3 м (до

1.0 м в конусах выноса ручьев). При этом амплитуда левосторонних смещений бортов долин составляет от 10–15 до 20 м, а тальвегов ручьев – 8–9 м. Общее простирание дислокаций 75°, простирание трещин отрыва и рвов 55–75°, валов сжатия 310°. Реконструкции полей палеонапряжений для этой серии разломов показывают режимы сдвига, транспрессии и сжатия с северо-восточным направлением оси сжатия.

Зона Хануйгольского разлома субширотного простирания по широте продолжает серию разрывов междуречья рек Бугсэйн-Гол и Идэр-Гол (рисунок, группа точек наблюдения 3). Он прослеживается от сомона Рашаант в восточном направлении к сомону Баян-Агт и далее на восток, пересекая долину р. Хануй-Гол, продолжается в виде кулис субширотного и северо-западного простирания. Общая протяженность структуры составляет не менее 100 км. В районе сомона Баян-Агт разлом ярко выражен уступом запад-северо-западного простирания высотой в целом 20-25 м, а в подновленной части 3-4 м. Уступ осложнен сейсмогенными оползнями. Сейсмогенное обновление движений по разлому проявилось в разжижении и выдавливании грунтов. Помимо вертикальной составляющей смещений, для разлома на этом сегменте характерны левосторонние сдвиговые смещения с амплитудами в 3 м по тальвегу ручья и в 8 м по смещению конуса выноса. Хотя реконструкции полей палеонапряжений характеризуют режимы сдвига со сжатием в северо-восточном и субширотном направлении, разлом здесь, по-видимому, имеет левостороннюю взбросо-сдвиговую кинематику. На субширотном участке, пересекающем долину р. Хануй-Гол, фиксируются левосторонние взбрососдвиговые смещения ее бортов, бронированных базальтовым потоком (N<sub>2</sub>). Поднято северное крыло, высота уступа в правом борту долины составляет примерно 15 м, амплитуда сдвигового смещения по правому борту долины около 20 м. Плейстоценголоценовые деформации фиксировались на восточном сегменте Хануйгольского разлома - левосторонние сдвиговые смещения долины временного водотока достигают 12-17 м. Деформациями затронуты осадки конуса выноса временного водотока. Выразительно также связанное с движениями по разлому и уже спущенное к настоящему моменту подпорное озеро. Оно образовалось в результате перегораживания долины водотока порогом субширотного простирания, сформированного левосторонним взбросо-сдвигом. Поднято южное крыло высота уступа достигает 5 м. Накопленная амплитуда левостороннего сдвига по смещениям долин временных водотоков варьируется от 100 до 135 м. Реконструкции полей палеонапряжений характеризуют режимы сдвига и сжатия с осью сжатия субмеридионального и северо-восточного направлений.

Кластер северо-западных и субмеридиональных разломов закартирован в междуречье рек Орхон и Тола, в окрестностях сомонов Орхон и Хишиг-Ундэр (реконструкции стресс-тензоров объединены в группу 4, рисунок). Самым известным объектом здесь является Могодская сейсмодислокация, представляющая собой систему, состоящую из сопряженных субмеридионального правого сдвига и северо-западного взброса [4]. К востоку от Могодской структуры располагается серия северо-западных и субмеридиональных уступов, местами пересекающих долину р. Орхон. В районе сомона Хишиг-Ундэр, в правом борту долины рек Маньт-Гол и Тэгийн-Гол, прослеживается уступ простирания в целом 330°, его длина составляет около 35 км. В одной из точек наблюдения зона разлома с видимой мощностью около 30 м имеет падение по азимуту 50°∠35°. Здесь на уступе зафиксированы взбросонадвиговые деформации, а реконструкции полей палеонапряжений характеризуют режимы сжатия и транспрессии с осью сжатия, ориентированной в северо-восточном направлении. К востоку в районе сомона Орхон прослежен разломный уступ вдоль правого борта р. Шувутын-Гол. Длина уступа около 12-14 км. Простирание в северной части - северозападное, к югу переходящее в субмеридиональное. Высота уступа изменяется по простиранию от 2-4 до 10-12 м. Признаки правостороннего сдвигового смещения, выраженные асимметричными конусами выноса, характерны для субмеридионального участка. Деформации базальтового потока (N<sub>2</sub>) установлены на отрезке северо-западного простирания. Базальтовый поток разорван и поднят по зоне надвига. Высота уступа на этом участке составляет от 2-3 до 4 м. Разброс по абсолютной высоте разорванных поверхностей одновозрастного базальтового потока в долине р. Орхон и на уступе приблизительно 70-75 м, что, по-видимому, составляет накопленную вертикальную амплитуду смещения. Реконструкции полей палеонапряжений в зоне разлома характеризуют режим сжатия в субширотном направлении на северо-западном участке и сдвиговый режим со сжатием в СВ направлении - на субмеридиональном. Далее к востоку прослежен тектонический уступ субмеридионального простирания вдоль правого борта р. Дзурхийн-Могойн-Гол. Его длина составляет примерно 12 км. Здесь зафиксированы правосторонние смещения долин водотоков с амплитудами от 15 до 23-25 м. Вертикальная амплитуда не определена, хотя в целом в рельефе выражено поднятие восточного крыла разлома. Падение зоны разлома в одном из коренных обнажений 95°∠70°. Реконструкции полей палеонапряжений характеризуют режимы чистого сдвига и транспрессии со сжатием в СВ направлении. К юго-востоку этот разлом может быть продолжен серией уступов северозападного и субширотного простирания вдоль дороги Орхон-Заамар, наследующих зону древнего разлома, заложенного по контакту кембрийских и триасовых пород [5].

Самый восточный в кластере разлом выражен в рельефе серией тектонических уступов, прослеженных в междуречье рек Орхон и Тола примерно в 40 км к северу от месторождения Заамар. Простирание уступов, кулисообразно подставляющих друг друга, главным образом северо-западное, с участками субширотного и субмеридионального. Общая протяженность составляет 63 км. Сегменты разлома северо-западного простирания падают на северовосток под углом 30–35°, а субмеридиональные имеют падение в восточных румбах под углом 55– 65°. Высота уступов в среднем 8–10 м, в отдельных местах по конусу выноса последней генерации более 1 м. Деформации характеризуют надвиговые и левосторонние взбросо-сдвиговые смещения по северо-западным и субширотным отрезкам зоны разлома и правосторонние сдвиговые смещения по субмеридиональным. В последнем случае накопленная амплитуда сдвига составляла 19–20 м. Реконструкции полей палеонапряжений показывают режим транспрессии со сжатием в северо-восточном направлении.

В пределах массивного поднятия хребта Бурэн-Нуруу, которое разделяет две ветви Северо-Хангайского разлома на его окончании, также проявлены позднеплейстоценовые и голоценовые разрывные деформации. Так, в верховьях долины р. Дзохийн-гол, в 18 км от г. Эрдэнэт, на пологом склоне правого борта прослеживается уступ ССВ простирания длиной около 5 км и высотой 1.0 м, секущий конусы выноса и низкие террасы временных водотоков. Соотношение морфологии земной поверхности и трассы разрыва указывает на его крутое падение в восточных румбах. Есть основания полагать, что этот сброс проявился результате сейсмогенной подвижки по субмеридиональному разлому в голоцене.

В целом район, прилегающий к восточному окончанию зоны Северо-Хангайского разлома, характеризуется сложным напряженным состоянием земной коры и разнообразным парагенезом разрывов в разных своих частях. Распределение типа напряженного состояния связано с положением относительно окончания главного сместителя сдвига. В северо-восточном секторе преобладают левосторонние сдвиги и сбросы и реконструированы парагенетически связанные с ними тензоры сдвига, растяжения и трастенсии. В юго-восточном секторе преобладают правосторонние сдвиги, взбросо-сдвиги и надвиги и реконструированы соответствующие им стресс-тензоры сдвига, транпрессии и сжатия. Положение областей преобладающего растяжения и сжатия относительно конца разлома соответствует картине распределения секторов сжатия и растяжения в теоретической модели левого сдвига, развивающегося в упругом полупространстве [6].

Судя по параметрам Могодского разлома, с которым связано одноименное землетрясение 1967 г. (M=7.5), сейсмические события подобной энергии могут возникать на многих из описанных выше сегментах разломов, имеющих признаки сейсмогенного обновления за последние 10000 лет. В последнее время широко обсуждаются проекты строительства ГЭС на реках Селенга, Эгийн-Гол, Орхон и Тола в Северной Монголии. Как нам представляется, определение местоположения будущих створов гидростанций и мер по усилению их устойчивости к сейсмическим воздействиям требует учета имеющейся информации по активным разломам района. Так, для планируемого створа ГЭС на р. Орхон шесть разломов с признаками голоценовой сейсмогенной активизации располагаются на расстоянии менее 100 км, из них три – на расстоянии менее 50 км. Для створов на реках Эгийн-Гол и Селенга (Шурэнская ГЭС) по три голоценовых разлома располагаются на расстоянии менее 100 км, а для створа на реке Тола – четыре разлома. Кроме того, кластер разломов в междуречье Орхона и Толы находится под воздействием дополнительного тектонического сжатия, что при прочих равных условиях определяет большую магнитуду максимальных сейсмических событий при одинаковой длине разрывов по отно-

шению к районам с другим типом напряженного состояния. Таким образом, сейсмический потенциал разломов территории возможного строительства ГЭС в Северной Монголии весьма высок, что необходимо учитывать при проектировании и реализации проектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Parfeevets A.V., Sankov V.A. Late Cenozoic tectonic stress fields of the Mongolian microplate // Comptes rendus – Geoscience. 2012. V. 344. P. 227–238. doi: 10.1016/j.crte.2011.09.009.

2. Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzhich V., San'kov V. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting // Tectonophysics. 1997. V. 282. P. 1–38.

3. Сейсмотектоника и сейсмичность Прихубсугулья / Под ред. Н.А. Логачева. Новосибирск: Наука, 1993. 184 с.

4. Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. М.: Наука, 1985. 224 с.

5. Geological map of Mongolia. Scale 1:1000000 / O. Tomurtogoo (ed.),. Ulaan-Baatar: Institute of Geology and Mineral Resources, Mongolian Academy of Sciences, 1999.

6. Осокина Д.Н. Поле напряжений, разрушение и механизмы деформирования геосреды в зоне разрыва (математическое моделирование) // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 129–174.

## ACTIVE FAULTS AND LATE CENOZOIC CRUSTAL STRESS FIELD IN THE SELENGA, ORKHON AND TOLA RIVER BASINS (MONGOLIA)

A.V. Parfeevets<sup>1</sup>, V.A. Sankov<sup>12</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth;s Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia <sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The paper provides an estimate of faulting activity and deformation and stress field conditions for North Mongolia containing the Selenga, Orkhon and Tola river basins in connection with seismic hazard assessment of the area supposedly chosen for the construction of hydroelectric power plants. The area is located in the zone of dynamic influence of the eastern segment of the North Khangai strike-slip fault that splits into several branches whose distribution and distribution of stress state type depends on the location relative to the major fissure. The northeastern branch traced along the Selenga River valley is dominated by the left-lateral strike-slip and normal faults, with paragenetically related shear, extensional and transtensional tensors reconstructed therein. The southeastern sector shows the predominance of the NW right-lateral strike-slip faults, reverse faults and thrusts, with their corresponding shear, transpressional and compressional stress tensor reconstructions performed there. The southwestern sector is characterized by sublatitudinal left-lateral strike-slip faults and reverse faults with the reconstructions of shear, transpressional and compressional stress tensors. It has been found that within a 100-m radius from the power sites planned on the Selenga, Egiyn-Gol, Orkhon and Tola rivers there are 3 to 6 faults with evidence of the Holocene seismogenic activation. Therefore, the faults of the area supposedly chosen for the construction of hydroelectric power plants in North Mongolia are of high seismic potentiality that should be considered in the design and construction. *Keywords:* active fault, kinematics, paleostress state

\*\*\*

УДК 551.24.01

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ В ЗОНАХ РАЗЛОМОВ ЮЖНО-БАЙКАЛЬСКОГО И УЛАН-БАТОРСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНОВ

Д.В. Салко<sup>1</sup>, С.А. Борняков <sup>1.2</sup>, С. Дэмбэрэл<sup>3</sup>, К.Ж. Семинский<sup>1</sup>, Т. Батсайхан<sup>3</sup>, С. Тогтохбаяр<sup>3</sup>, А.И. Мирошниченко<sup>1</sup>, Д. Ганзорик<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Институт астрономии и геофизики АНМ, Улан-Батор, Монголия

Аннотация. Мониторинг деформаций горных пород в зонах разломов в пределах Южно-Байкальского и Улан-Баторского геодинамических полигонов показал, что они реализуются в виде долговременных плавных разнонаправленных вариаций, на которые эпизодически накладываются кратковременные аномальные выбросы. В записях они чаще всего представлены асимметричными импульсами, длительностью от первых минут до нескольких часов. Принимая во внимание информацию, изложенную в серии обзорных работ [2–4] и результаты физического моделирования [1, настоящий сборник], появление аномальных деформаций во временных рядах данных можно связать с прохождением деформационных волн. Правомерность такой интерпретации подтверждается результатами мониторинга деформаций сетью пространственно-разнесенных пунктов в пределах Южно-Байкальского геодинамического полигона. *Ключевые слова:* геодинамический полигон, зона разлома, мониторинг деформаций, деформационная волна На Южно-Байкальском и Улан-Баторском геодинамических полигонах проводится мониторинг деформаций горных пород инструментальным комплексом авторской разработки, с целью поиска предвестников землетрясений (рис. 1).

Пункт мониторинга на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне расположен в штольне на территории сейсмостанции «Талая» БФ ГС РАН и представлен сетью пространственно-разнесенных горизонтальных и вертикальных штанговых датчиков деформаций с базой 1.7 м (рис. 2). Параллельно с деформацией в каждой точке производится измерение температуры горных пород. На Улан-Баторском геодинамическом полигоне пункт мониторинга расположен в зоне Хустайского разлома. Измерение деформаций в этом пункте производится вертикальным штанговым датчиком с базой 10 м, установленным в скважине.



Рис. 1. Расположение пунктов мониторинга (черные квадраты) в пределах Южно-Байкальского и Улан-Баторского геодинамических полигонов.

Деформационный процесс в пунктах мониторинга реализуется в виде относительно плавных вариаций деформаций, на которые эпизодически накладываются кратковременные резкие их изменения (рис. 3). Корреляционный анализ данных показал, что в сейсмически спокойные периоды в вариациях деформаций отчетливо выделяется приливная суточная составляющая, тогда как в преддверии землетрясений суточная периодичность нарушается, что отражается в снижении коэффициента корреляции. Спектральный анализ данных подтверждает эту выявленную тенденцию, а также показывает, что перед землетрясением временные вариации деформаций становятся упорядоченными с логпериодичной структурой спектрограммы [1].

Кратковременные резкие изменения деформаций представлены во временных рядах данных ступенями или асимметричными импульсами, с длительностью реализации от первых минут до нескольких часов (рис. 3). Схожие по форме асимметричные импульсы выделялись ранее в низкочастотных сейсмических шумах и рассматривались как признак предсейсмогенного состояния среды [2]. Принимая во внимание информацию, изложенную в серии обзорных работ [3–5], и результаты физического моделирования [1, настоящий сборник], появление аномальных деформаций во временных рядах данных можно трактовать как следствие воздействия медленных деформационных волн на массивы горных пород в пунктах мониторинга.



Рис. 2. Схема размещения датчиков дефор-мации в штольне. Цифры в кружках – номера точек.



Рис. 3. Примеры импульсного изменения деформаций горных пород в штольне с/с Талая (слева) и в зоне Хустайского разлома (справа).

Волновая природа деформационных аномалий, зарегистрированных в штольне (рис. 3, А), подтверждается результатами корреляционного анализа данных с разных точек мониторинга. Расчеты показывают, что деформационное возмущение последовательно проходит от точки к точке с задержкой в первые минуты. Сопоставление данных по аномальным деформациям горных пород и их температуре показывает, что изменения этих параметров синхронизированы по времени. По направленности их изменения, с учетом известных результатов инструментальных исследований, представленных в [6], можно полагать, что вмещающий штольню массив горных пород подвергается воздействию деформационных волн сжатия, распространяющихся с югозапада на северо-восток. Исходя из времени реализации деформационных аномалий, составляющего от одного до двух часов, и расчетной скорости пространственной миграции порождающих их волн, длина последних может быть оценена в первые десятки километров. Вопрос природы этих волн остается открытым.

Импульсные аномалии деформаций в зоне Хустайского разлома (рис. 3, *Б*) имеют меньшее время реализации, составляющее от трех до семи минут. С 18.09.2015 г. по 10.10.2015 г. в пункте мониторинга зафиксировано 35 деформационных аномалий. Их проявление почти прекратилось после землетрясения с энергетическим классом K=10.9, произошедшего 10.10.2015 г. за пределами зоны Хустайского разлома на расстоянии 126 км от пункта мониторинга. Этот факт позволяет связывать природу деформационных аномалий с тектоническими процессами в очаговой области землетрясения на заключительной стадии его подготовки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16–55–44017–Монг\_а, 15–55–53023–ГФЕН\_а).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борняков С.А., Пантелеев И.А., Тарасова А.А. Динамика деформаций в сдвиговой зоне: по результатам физического моделирования // ХХХ. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2016. С. ХХХ.

2. Соболев Г.А. Серии асимметричных импульсов в минутном диапазоне микросейсм как индикаторы метастабильного состояния сейсмоактивных зон // Физика Земли. 2008. № 4. С. 3–16.

3. Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 11. С. 1176–1190.

4. Кузьмин Ю.О. Деформационные автоволны в разломных зонах // Физика Земли. 2012. Т. 48, № 1. С. 1–16.

5. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений. Тектонофизическая концепция. Новосибирск: «ГЕО», 2014. 359 с.

6. Chen S.Y., Liu P.X., Guo Y.S., Liu L.Q., Ma J. An experiment on temperature variations in sandstone during biaxial loading // Physics and Chemistry of the Earth. 2015 № 85–86. P. 3–8.

## SPACE AND TIME VARIATIONS OF DEFORMATIONS IN THE FAULT ZONES OF SOUTH BAIKAL AND ULAANBAATAR GEODYNAMIC TEST SITES

D.V. Salko<sup>1</sup>, S.A. Bornyakov<sup>1,2</sup>, S. Demberel<sup>3</sup>, K.Zh. Seminsky<sup>1</sup>, T. Batsaihan<sup>3</sup>, C. Togtohbayar<sup>3</sup>, A.I. Miroshnichenko<sup>1</sup>, D. Ganzorik<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

*Abstract.* Monitoring of deformations of rocks in fault zones within the South Baikal and Ulaanbaatar geodynamic test sites has shown that they occur in the form of long-term smooth multidirectional variations, episodically affected by short-term abnormal emissions. They are most often recorded as asymmetric impulses lasting from the first minutes to several hours. In view of the information derived from a series of review papers [2–4] and physical modeling results [1], time series of abnormal deformation data are related to strain wave propagation. The reliability of such interpretation is confirmed by the deformation monitoring network data at spaced locations within the South Baikal geodynamic test site.

Keywords: geodynamic polygon, fault zone, monitoring of deformations, deformation wave

\*\*\*

УДК 550.348.432+551.243.12

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГРУППЫ ТУНКИНСКИХ ВПАДИН МЕТОДОМ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

А.В. Саньков<sup>1</sup>, А.А. Добрынина<sup>1</sup>, А.Н. Шагун<sup>1</sup>, Е.Н. Черных<sup>1</sup>, В.А. Саньков<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Проведены первые исследования разреза Тункинской, Торской и Быстринской впадин Байкальской рифтовой системы методом спектральных отношений Накамуры, по нескольким профилям получены разрезы до глубины 3 км. Получены новые данные о глубине залегания фундамента Торской и Быстринской впадин, о строении их осадочного разреза. Сделан вывод о крутом залегании зон ограничивающих впадины разломов.

Ключевые слова: микросейсмы, H/V-отношение, скоростной разрез, глубинное строение, группа Тункинских впадин
Субширотная Тункинская впадина, расположенная на юго-западном фланге Байкальской рифтовой системы, является тектонотипом внутриконтинентальных рифтовых впадин [1, 2]. Ее разрез, вскрытый скважиной Р-2 лишь до глубины 2.1 км, содержит миоценовые, плиоценовые и четвертичные осалочные и вулканогенно-осалочные поролы с потоками базальтов, которыми особенно насыщена его нижняя часть. По гравиметрическим данным мощность осадочных отложений в Тункинской впадине оценивалась в 2500 м [3]. Переинтерпретация данных электроразведочных работ в 50-х годах прошлого столетия показала, что максимальная глубина залегания фундамента в северной части впадины может достигать 3700 м [4]. Кинематика Тункинского разлома в целом определяется как левосторонний сдвиго-сброс [5]. Большая роль сдвиговой компоненты смещений по разлому на плейстоцен-голоценовом этапе подчеркивалась в работах [6-8].

Различия в оценках параметров разреза впадины настолько велики, что существует необходимость заверки существующих данных независимым методом. Кроме того, не ясен механизм формирования впадин с достаточно мощным осадочным наполнением, ограниченных сдвиговыми структурами. Для решения этого вопроса требуется изучение строения на глубине зон контролирующих впадины разломов. Нами проведены первые исследования разреза Тункинской, Торской и Быстринской впадин методом спектральных отношений Накамуры [9], по нескольким профилям получены разрезы до глубины 3 км. В методе Накамуры используются отношения спектральных амплитуд горизонтальных и вертикальных компонент (H/V-отношения) записей микросейсмических колебаний для определения характеристических частот и амплитуд усиления колебаний локального участка. В основе метода лежит предположение о том, что микросейсмические колебания представляют собой поверхностные волны Лява и Рэлея. В средах различной плотности эти волны затухают не одинаково, что позволяет на качественном уровне оценить разрез коры (наличие слоев, неоднородностей и пр.) под точкой регистрации, а также, в первом приближении, оценить скоростной разрез. Помимо определения характеристических частот, метод также позволяет оценить углы падения разломов, форму и глубину залегания фундамента, выявить неоднородность среды.

Для того чтобы получить глубинный разрез, были выставлены временные сети сейсмических станций по четырем профилям. На сейсмических станциях регистрировались микросейсмы, длина отдельного участка записи на каждой станции – от 30 минут и более. Для обработки записей и построения H/V кривых использовался пакет программ Geopsy. Кривые отношений H/V строились для частотного диапазона от 0.5 до 20.0 Гц.

При моделировании поверхностных волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей [10] показано, что на поверхности Земли над высокоскоростными неоднородностями спектральные амплитуды уменьшаются (отношение H/V увеличивается), а над низкоскоростными – возрастают (отношение H/V уменьшается). Частоты f экстремумов кривой H/V связаны с глубиной H и соответствующей скоростью фундаментальной моды волны Рэлея  $V_{\rm R}(f)$  соотношением:  $H\approx 0.4 \cdot V_{\rm R}(f)/f$ . Так как для региона нет определений дисперсионной кривой для периодов от 0.05 до 2 с, скоростной разрез оценивался путем сопоставления наблюдаемых и теоретических кривых H/V-отношений.

Разрез собственно Тункинской впадины исследовался по широтному профилю в районе д. Никольское. Глубина залегания фундамента здесь составляет около 1 км, что совпадает с данными бурения по скважине P-1, которая расположена в 6 км западнее профиля. В разрезе осадков впадины выделяются три сейсмопачки – верхняя, соответствуюцая четвертичным неконсолидированным отложениям, средняя, которую можно сопоставить с вулканогенно-осадочной толщей плиоцена, и нижняя, более высокоскоростная пачка, соответствующая, повидимому, миоценовым осадочным и вулканогенноосадочным породам с типичными для них прослоями базальтов.

Разрез, пересекающий Торскую впадину с юга на север восточнее п. Торы, характеризуется переменной мощностью осадочного наполнения впадины. Вблизи южного борта фундамент находится на глубине 600 м, углубляясь к центральной части до 1000 м. Далее к северу его поверхность поднимается до глубины 400 м, образуя выступ, затем снова погружается до 800 м вблизи бортовых структур зоны Тункинского разлома. Следует отметить, что, по данным гравиметрических исследований, мощность осадков во впадине оценивалась в 600 м [3]. Широкая зона Торского сегмента Тункинского разлома представлена серией крутопадающих разломов, некоторые из них на кривых скоростей выражены пологими ступенчатыми кривыми. В разрезе осадков впадины представлены три пачки, которые по аналогии с Тункинской впадиной могут быть отнесены к четвертичным рыхлым осадкам, плиоценовым и миоценовым толщам.

В северном борту Торской впадины в районе д. Тибельти наблюдается ступенчатое опускание фундамента по разломам. Максимальная глубина залегания фундамента в опущенном крыле достигает 1200 м. В осадочном разрезе выделяются три сейсмопачки – маломощная верхняя, соответствуюшая известным здесь неконсолидированным четвертичным осадкам, средняя, которая по своим характеристикам соответствует верхненеогеновым отложениям Тункинской впадины, и нижняя, соответствующая нижненеогеновым отложениям. Кривая распределения скоростей поверхностных волн по глубине для станции, располагаложенной непосредственно в зоне разлома, имеет характерную мелкоступенчатую форму, что соответствует постепенному нарастанию скорости с глубиной в зоне деструкции.

Один из профилей пройден в северо-восточном борту Быстринской впадины (район д. Анчук). В верхней части осадочного разреза впадины выделяется пачка неконсолидированных четвертичных осадков, ниже которых залегает толща с характерными для верхненеогеновых отложений скоростными параметрами. Поверхность фундамента в долине р. Большая Быстрая находится на глубине 750 м. Разломы, выраженные на профиле, имеют крутое падение. Для зоны одного из оперяющих Главный Саянский разлом дизъюнктивов, выраженного уступом в рельефе, получена характерная мекоступенчатая кривая нарастания скорости с глубиной.

Таким образом, проведенные предварительные исследования группы Тункинских впадин с использованием метода спектральных отношений Накамуры [9] позволили получить новые данные о строении разреза впадин, скоррелировать положение известных разломов с глубинным разрезом, выявить неизвестные ранее разломы. Для уточнения строения и корреляции разрезов впадин Тункинской группы планируется проведение измерений на участках со строением, известным по данным бурения, а также проведение площадных измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 258 с.

2. Логачев Н.А. Саяно-Байкальское Становое нагорье // Нагорья Прибайкалья и Забайкалья. М.: Наука, 1974. С. 7– 163.

3. Зорин Ю.А. Механизм образования Байкальской рифтовой зоны в связи с особенностями ее глубинного строения // Роль рифтогенеза в геологической истории Земли. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. С. 36–41.

4. Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2009. 316 с.

5. Шерман С.И., Медведев М.Е., Ружич В.В., Киселев А.И., Шмотов А.П. Тектоника и вулканизм юго-западной части Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1973. 134 с.

6. McCalpin J.P., Khromovskikh V.S. Holocene paleoseismicity of the Tunka fault, Baikal rift, Russia // Tectonics. 1995. V. 14, № 3. P. 594–605.

7. Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Семенов Р.М. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения в зоне Тункинского разлома (Юго-Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 6. С. 587–602.

8. Парфеевец А.В., Саньков В.А. Напряженное состояние земной коры и геодинамика юго-западной части Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал "Гео", 2006. 151 с.

9. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // QR Railw. Tech. Res. Inst. 1989. V. 30. P. 25–33.

10. Горбатиков А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С.96–112.

### A STUDY OF THE STRUCTURE OF THE TUNKA BASINS GROUP WITH MICROSEISMIC SOUNDING METHOD

A.V. Sankov<sup>1</sup>, A.A. Dobrynina<sup>1</sup>, A.N. Shagun<sup>1</sup>, E.N. Chernykh<sup>1</sup>, V.A. Sankov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia <sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The first studies have been made of the cross-sections through the Tunka, Tora and Bystrinsky basins of Baikal rift system using Nakamura spectral ratio method, with the cross-sections constructed to a depth of 3 km along some the profiles. New data have been obtained on the depth of crystalline basement of the Tora and Bystrinsky basins and on their cross-sectional structures. It has been concluded that the basin-bordering fault zones are steeply dipping.

Keywords: microseisms, H/V-ratio, velocity section, deep structure, Tunka system of basins

\*\*\*

УДК 556.114.2+551.243.8

### РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА В ИСТОЧНИКАХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (на примере Южного Приангарья)

А.К. Семинский

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Изучение водопроявлений Байкальского региона проводилось в середине прошлого столетия в составе площадных гидрогеологических исследований территории Восточной Сибири. Мониторинговые измерения проводились главным образом при использовании природных вод на курортах, а впоследствии – с целью поиска эманационных предвестников землетрясений. Однако при обработке длинных временных рядов измерения параметра *Q* не использовании обработке длинных временных рядов измерения параметра *Q* не использовались методы математической статистики. Целью исследования было провести обработку данных мониторинга, изучить общие закономерности эманаций и выявить главные факторы, на них влияющие. Обрабатываемые массивы включали в себя информацию о радоновой активности в водопроявлениях, метеорологические параметры, а также характеристику сейсмических событий. Расчеты проводились на основе кластерного, корреляционного и Фурье-анализа. С помощью кластерного анализа выявлено три группы данных: 1) объемная активность радона в различных источниках, 2) метеопараметры, 3) сейсмическая активность, причем связь между первыми двумя кластерами значительно прочнее, чем между первыми и последним, что говорит о большем влиянии на радон атмосферных факторов, чем сейсмической активности. Эти результаты подтверждены корреляционным анализом, с помощью которого удалось выявить связь между активность с энергетическим классом сейсмических событий на дан-

ном этапе исследований установить не удалось. Фурье-анализ позволил разложить колебания всех параметров во времени на простейшие колебания с разной длиной волны. Наиболее часто выделялись (с погрешностью 20 дней) гармоники с длиной 365 дней (1-го порядка), 126 дней (2-го порядка), 30 дней (3-го порядка). Временные ряды параметров на данном этапе исследований предварительно проанализированы с помощью математических методов. Произведено разделение всего массива данных на группы, а также установлено наличие связей между ними. Выявлению новых закономерностей и уточнению уже полученных будут посвящены дальнейшие целенаправленные исследования. *Ключевые слова*: радон, вода, мониторинг, статистика

Обследование водопроявлений Байкальского региона проводилось в середине прошлого столетия в составе площадных гидрогеологических исследований территории Восточной Сибири. В рамках комплексного анализа замерялась активность радона (Q [Бк/л]) в воде. При этом, согласно принятой классификации, собственно радоновыми считались источники подземных вод с содержанием растворенного газа в воде более 185 Бк/л. Мониторинговые измерения проводились главным образом при использовании природных вод на курортах, а впоследствии - с целью поиска эманационных предвестников землетрясений [1, 2]. Однако при обработке длинных временных рядов измерения параметра Q не использовались методы математической статистики.

Целью исследования было провести обработку данных мониторинга, изучить общие закономерности эманаций и выявить главные факторы, на них влияющие. Работы проведены для урбанизированной территории Южного Приангарья, которая принадлежит к Байкальской рифтовой зоне, характеризующейся сложным тектоническим строением и интенсивной сейсмичностью.

Задачи исследования: 1) на основе выбранной на территории Южного Приангарья опорной сети мониторинга источников подземных вод [3] составить длинные ряды измерений объемной активности радона; 2) проанализировать на базе статистического анализа получившийся массив данных с вариациями таких параметров, как энергетический класс землетрясений (происходящих в дни отбора проб), температура и влажность воздуха, атмосферное давление; 3) установить на этой основе факторы, определяющие эманации.

Концентрация радона в каждом водоисточнике измерялась два раза в месяц. Для определения параметра Q использовался радиометр РРА-01М-03 с пределом погрешности ≈30 %. Кроме данных о радоновой активности, к анализу привлекалась информация о метеоусловиях (температуре, давлении, влажности), а также энергетическом классе сейсмических событий, произошедших в регионе за время отбора проб [4, 5]. Для каждого изучаемого водоисточника формировались ряды измерений, состоящие из набора параметров (концентрация радона в воде, атмосферное давление, влажность, температура возлуха и энергетический класс сейсмического события), выстроенных в хронологическом порядке. Статистический анализ проводился с применением стандартных математических методов (кластерный, корреляционный и Фурье-анализы).

Результаты кластерного анализа позволили разделить все рассматриваемые параметры по степени зависимости друг от друга. Наиболее отчетливо выделяются три основных кластера. Первый образуют параметры Q для разных источников, а второй и третий – разнотипные факторы формирования эманационного поля: внешние (метеорологические условия) и внутренние (землетрясения разного энергетического класса). Степень влияния параметров из второго и третьего кластеров на концентрацию радона в воде различна. Наиболее тесные межкластерные связи фиксируются между значениями Q и метеопараметрами, а наименее тесные - между величинами О и энергетическим классом. Дополнительно проведенный корреляционный анализ позволил уточнить, что объемная активность радона характеризуется прямой связью с давлением, а ее зависимость от температуры и влажности проявляется только на уровне тенденций. Взаимосвязь между сейсмическими событиями и эманациями радона на данном этапе исследований установить не удалось.

Колебательный характер изменчивости всех анализируемых параметров во времени позволил использовать анализ Фурье для разложения кривых мониторинга на простейшие колебания с разными длинами волн. Интерпретация его результатов дает возможность разделить выделенные гармоники (с погрешностью до 20 дней) на три основные группы: 1-го порядка (длина волны ≈365 дней), 2-го порядка (≈126 дней) и 3-го порядка (≈30 дней). Колебания с длиной волны, равной одному году, проявились для значений Q из трех источников и для метеорологических параметров. Колебания 2-го порядка были зафиксированы практически для всех анализируемых параметров, кроме величин Q из двух водопунктов и атмосферного давления. Гармоника с наименьшим периодом была выявлена для каждой из анализируемых кривых, но границы ее проявления определены менее достоверно в связи с недостаточной для их уточнения частотой опробования. То, что для каждого порядка гармоник характерна определенная группа параметров, в которых она проявляется, свидетельствует о «защищенности» некоторых величин от воздействия цикличных процессов, оказывающих влияние на остальные кривые.

В результате проведенного исследования можно сделать следующие предварительные выводы.

Согласно результатам кластерного анализа, изученные параметры образуют три группы, к первой из которых относятся уровни объемной активности радона в воде опробуемых источников, ко второй – метеорологические параметры, а к третьей – энергетический класс сейсмических событий. Наиболее тесные межкластерные связи установлены между величинами Q и метеопараметрами. Таким образом, факторы, влияющие на газовые эманации, можно разделить на внешние и внутренние, причем воздействие на концентрацию радона первых оказалось в период мониторинга сильнее, чем влияние вторых. По данным корреляционного анализа объемная активность радона имеет устойчивую прямую зависимость от давления, но слабую взаимосвязь с температурой и влажностью. Согласно анализу Фурье, выявлено три основных вида гармоник: 1-го порядка (365 дней), 2-го порядка (126 дней) и 3-го порядка (30 дней). Гармоники по-разному представлены в кривых различного типа, что свидетельствует о сложных взаимоотношениях факторов, выявлению которых будут посвящены дальнейшие целенаправленные исследования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–05–00154).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Семинский А.К., Тугарина М.А. Особенности распределения радона в подземных водах Байкальского региона // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с межд. участием «ГЕОНАУКИ-2013»: актуальные проблемы изучения недр. Иркутск: ИрГТУ, 2013. С. 133–137.

2. Лопатин М.Н. Вариации концентраций растворенного радона в подземных водах Южного Прибайкалья при подготовке и реализации очагов землетрясений // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVI Всероссийской молодежной конференции. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015. С. 108–109.

3. Семинский А.К. Систематизация источников подземных вод Прибайкалья и Забайкалья по содержанию радона: предварительные результаты // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVI Всероссийской молодежной конференции. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015. С. 164–166.

4. Байкальский филиал геофизической службы [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://seis-bykl.ru/ – Основной каталог событий. (Дата обращения: 10.02.2016).

5. Расписание погоды – Rp5.ru [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rp5.ru/ – Архив погоды в Иркутске. (Дата обращения: 10.02.2016).

### RESULTS OF STATISTICAL ANALYSIS OF MONITORING DATA FOR RADON VOLUME ACTIVITY IN UNDERGROUND WATER SOURCES (BY THE EXAMPLE OF THE SOUTHERN PRIANGARYE)

### A.K. Seminsky

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. The study of seepage waters in the Baikal region was conducted in the middle of the last century as part of areal hydrogeological investigations of East Siberia. Monitoring mainly involved the use of natural waters at health resorts and the use of radon emanation as an earthquake precursor later on. However, processing long-term sequential Q measurements was not mathematically based. The present study was aimed at monitoring data processing and identifying trends in radon emanation and factors that affect them. The processed data included information on radon activity in seepage waters, meteorological parameters, and characteristics of seismic events. The calculations were based on cluster, correlation and Fourier analysis identified three groups of data: 1) volume activity of radon for different sources, 2) meteoparameters, 3) seismic activity, with the first two clusters related to each other more strongly than the first and the last, which indicates that radon is influenced by atmospheric factors rather than seismic activity. These results have been confirmed by correlation analysis showing the relationship between activity of radon and atmospheric characteristics, but the study found no relationship between radon activity and energy class of seismic events. Fourier analysis allowed us to split spatial variability of parameters into elemental parameter variations at different wavelengths. The most common harmonics (with an accuracy of 20 days) are those of the 365-day period (1<sup>st</sup> order), 126-day period (2<sup>nd</sup> order), and 30-day period (3<sup>rd</sup> order). Time series of parameter estimates have been preliminarily studied using the quantitative analysis technique. The data array has been separated into groups, with relationship found between them. Further research will be aimed at identifying new trends and specifying those already identified. Keywords: radon, water, monitoring, statistics

\*\*\*

УДК 551.24.02

### ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ РАЗРЫВНО-БЛОКОВОЙ СТРУКТУРЫ СДВИГОВОЙ ЗОНЫ НА РАЗНЫХ МАСШТАБНЫХ УРОВНЯХ: РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.А. Тарасова<sup>1,2</sup>, И.А. Пантелеев<sup>3</sup>, С.А. Борняков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

*Аннотация.* На основе результатов физического моделирования процесса формирования сдвиговой зоны в упруговязкопластичной модели литосферы показано, что деформационный процесс в ее пределах реализуется в виде повторяющихся разномасштабных периодов. Эта периодичность выстраивается в последовательность «стадия – этап – цикл – индивидуальная вариация».

Ключевые слова: физическое моделирование, сдвиговая зона, разрыв, деформация, перемещение

В серии работ, посвященных экспериментальному исследованию общих закономерностей развития крупных сдвиговых зон, показано, что в деформационной эволюции их внутренней разрывноблоковой структуры, несмотря на нагружение моделей с постоянной скоростью, имеет место периодичность, выражающаяся в качественном повторении во времени процесса разрывообразования в рамках нескольких стадий [1, 2]. Выделим условно для внутренней разрывно-блоковой структуры сдвиговой зоны три масштабных уровня - глобальный, региональный и локальный. Первый охватывает всю зону в целом, второй - группу разрывов и блоков в пределах небольшой ее части, а третий характеризует отдельные разрывы и блоки. С точки зрения такой типизации, стадийность деформационного процесса в сдвиговой зоне отражает его периодичность на глобальном масштабном уровне. С целью поиска проявлений таких периодичностей на двух других, более низких, масштабных уровнях авторами выполнено физическое моделирование процессов формирования сдвиговых зон в упруговязкопластичной модели литосферы по стандартной методике, подробно описанной в работах [1-4]. Развивающийся в модели процесс фотографировался с задан-

ной временной дискретностью. Для обработки полученных фотоматериалов использован метод корреляции цифровых изображений [5], а также ручная обработка в стандартной программе CorelDraw. Методические приемы фотографирования в ручном режиме детально описаны в [6, 7]. На фотографиях в центральной части сдвиговой зоны выделялась рабочая прямоугольная площадка размером 0.275×0.125 м, в пределах которой определялись количество разрывов (N), их длина (L) и накопленная на них амплитуда смещения (А). Вариации перечисленных параметров в пределах рабочей площадки отражают интегральную групповую динамику разрывообразования в разломной зоне на региональном масштабном уровне. Для получения представлений о деталях этого процесса на локальном масштабном уроне были оценены вариации амплитуды смещения (ai) по простиранию протяженных разрывов и пластических деформаций модельного материала в их активном и пассивном крыльях  $(m_i)$  в смежных блоках. За активное принималось крыло, расположенное со стороны подвижного штампа экспериментальной установки.



Периодические вариации в пределах первой стадии развития сдвиговой зоны суммарной длины активных разрывов (A) и накопленной амплитуды смещения на них (B), амплитуды смещения на единичном разрыве (B) и ее приращения за единичный временной интервал ( $\Gamma$ ), деформации блока (A) и ее приращения за единичный временной интервал (E).

Графики на рисунке отражают динамику развития разрывных нарушений сдвиговой зоны в пределах тестовой площадки в ходе ее структурной эволюции. На них представлены вариации суммарных значений количества разрывов N (рисунок, A) и амплитуды смещения по ним A (рисунок,  $\overline{B}$ ). Из приведенных графиков следует, что для выбранных граничных условий эксперимента длительность вариации «рост-снижение» параметров составляет 1.0-1.5 минуты. В рамках стадии имеют место три таких вариации, что позволяет говорить о реализации в их пределах трех качественно повторяющихся деформационных этапов. Сопоставление полученных кривых показывает в целом достаточно высокую степень согласованности в поведении всех рассмотренных параметров разрывов. Периодичность деформационного процесса проявляется и на локальном уровне, что прослеживается в вариациях суммарных, кумулятивных амплитуд смещений и их приращений за единичные интервалы времени на отдельных разрывах (рисунок, B,  $\Gamma$ ), а также в вариациях значений пластической деформации модельного материала в областях динамического влияния

этих же разрывов в их активных крыльях (рисунок,  $\mathcal{A}$ , E). Эти параметры изменяются во времени по определенному тренду в колебательном режиме. В приращениях перечисленных параметров отчетливо выделяется циклическая структура колебательного процесса, с меняющимися длительностью и интенсивностью колебаний в пределах циклов. При этом деформационная активность разрывов и блоков находится в противофазе (рисунок,  $\Gamma$ ,  $\mathcal{A}$ ).

Кроме того, фиксируется несогласованность в деформационном поведении смежных блоков, что является причиной сегментации разделяющих их разрывов с реализацией на них разнонаправленных смещений в разные временные интервалы. По мере приближения к межстадийной структурной перестройке наблюдается тенденция снижения деформационной активности и блоков, и разделяющего их разрыва. Нивелируется различие деформационных процессов в смежных блоках, и возрастает вероятность их кратковременной синхронизации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–35–00349–Мол а).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере: зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991. 261 с.

2. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разрывных зон: тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во «ГЕО», 2003. 244 с.

3. Шерман С.И. Физический эксперимент в тектонике и теория подобия // Геология и геофизика. 1984. № 3. С. 8– 18.

4. Борняков С.А., Семинский К.Ж., Буддо В.Ю., Мирошниченко А.И., Черемных А.В., Черемных А.С., Тарасова А.А. Основные закономерности разломообразования в литосфере (по результатам физического моделирования) // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 4. С. 823–861.

5. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. Berlin: Springer, 2009. 316 p.

6. Борняков С.А., Семенова Н.В. Диссипативные процессы в зонах разломов (по результатам физического моделирования) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 6. С. 862–870.

 Тарасова А.А., Борняков С.А. Экспериментальное исследование закономерностей пространственно-временной активизации разломов в деструктивных зонах литосферы // Известия ИГУ. 2014. Т. 9. С. 118–131.

#### DIFFEREENT-SCALE TENDENCIES OF THE PERIODIC DEFORMATIONAL EVOLUTION OF THE RACTURE-BLOCK STRUCTURE OF SHEAR ZONE BASED ON THE PHYSICAL MODELING RESULTS

A.A. Tarasova<sup>1, 2</sup>, I.A. Panteleev<sup>3</sup>, S.A. Bornyakov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Continuous Media Mechanics, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

*Abstract.* A physical model of the shear-zone formation process in an elastic-viscous-plastic model for the lithosphere has shown that the deformation process therein has different recurrence intervals. These different recurrence intervals form a "stage-step-cycle-individual variation" sequence.

Keywords: physical modeling, shear zone, fault, deformation, displacement

\*\*\*

### УДК 550.8.013

### ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МОДЕЛЬНОГО ФРАГМЕНТА ЗЕМНОЙ КОРЫ

А.А. Татаурова<sup>1,2</sup>, Ю.П. Стефанов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

*Аннотация.* В работе исследуются особенности напряженно-деформированного состояния модельного упругопластического фрагмента земной коры. Основное внимание уделяется изучению влияния реологических неоднородностей на характер развития деформаций.

Анализ влияния параметров осуществлялся при помощи численного моделирования. Расчеты проводились в постановке плоской деформации с использованием явной конечно-разностной схемы. Описание деформации за пределом упругости осуществлялось в рамках модифицированной модели Друккера-Прагера-Николаевского с неассоциированным законом течения. В работе представлен ряд результатов численных экспериментов для среды, которая деформируется под действием силы тяжести с использованием различных вариантов последовательностей приложения нагрузки.

Установлено, что на развитие пластической деформации большое влияние оказывает распределение закона прочности с глубиной. В результате снижения прочности происходит утонение блоков под действием вышележащих пород. Это приводит к образованию прогиба и изменению геометрии границ между слоями вышележащих толщ. Вследствие того, что упругий слой частично погрузился, в нем произошло перераспределение напряжений, что привело к развитию узких вертикальных зон пластичности. На масштабы пластичности оказывает влияние геометрия и размер реологических неоднородностей. Таким образом, пластическая деформация в ослабленной зоне оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние в среде.

*Ключевые слова:* земная кора, прогиб, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, пластическая (необратимая) деформация, прочность

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию деформационных процессов в земной коре, остаются открытыми вопросы о влиянии различных параметров на распределение напряженно-деформированного состояния [1]. Часто при расчетах за основу берется предположение о горизонтальной слоистости среды без учета вклада от вещественных и реологических неоднородностей, которые могут способствовать развитию процессов внутри коры. В данной работе выполнено исследование влияния упругопластических параметров на распределение напряжений и деформаций на примере модельного фрагмента земной коры блочной структуры.

Рассмотрим трехслойную модель среды, в которой второй и третий слои содержат блоки с пониженной прочностью [2] (рис. 1).

Длина профиля составляет 900 км, глубина – 30 км. Будем считать, что среда находится под действием силы тяжести, при этом смещение основания и боковых границ отсутствует. Начальное напряженное состояние обусловлено весом вышележащих пород, находящихся в состоянии упругости, и при отсутствии дополнительных сил определяется выражением:

$$\sigma_{z}(z) = -g \int_{0}^{z} \rho(z) dz,$$
  

$$\sigma_{x}(z) = \sigma_{z}(z)\xi,$$
  

$$\sigma_{y}(z) = \sigma_{z}(z)\xi$$

где  $\xi = \frac{v}{1-v}$ , v – коэффициент Пуассона,  $\rho$  – плотность среды. Изучение особенностей развития деформаций осуществляется при помощи численного моделирования. Для этого численно решается система уравнений механики упругопластической среды при помощи явной конечно-разностной схемы [3, 4].



Рис. 1. Структура модельного фрагмента земной коры.

Поведение геологической среды описывается в рамках модифицированной модели Друккера– Прагера–Николаевского с неассоциированным законом течения. Уравнение предельной поверхности, определяющее прочность среды, записывается в виде:

$$\tau^* = Y + \alpha p, \qquad (1)$$

где  $\tau^*$  – эффективная прочность, p – давление,  $\alpha$  и Y – параметры модели, которые могут быть выражены через угол внутреннего трения и когезию. Значение параметров модели задавалось таким образом, чтобы с ростом глубины и давления была получена заданная форма закона изменения эффективной прочности с глубиной (рис. 2, *a*), при этом выделенные блоки имели пониженную прочность. Параметры модели приведены в таблице.

Составляющая мо- дели	ρ, г/см <sup>3</sup>	<i>К</i> , ГПа	<i>G</i> , ГПа	<i>Ү</i> , МПа	α
Слой 1	2.34	20.8	11.7	50	0.6
Слой 2	2.65	45.1	30.7	80	0.4
Блок 1	2.65	45.1	30.7	52-20	0.52 - 0.08
Слой 3	3.20	111.4	66.7	65–11	0.280-0.035
Блок 2	3.20	111.4	66.7	18–7	0.07-0.02

Решение задачи осуществляется для двух вариантов приложения нагрузки. В первом случае сначала решается задача о начальном напряженнодеформированном состоянии среды под действием силы тяжести, при этом среда остается упругой. Затем осуществляется постепенное понижение прочностных свойств с глубиной в выделенных нами блоках до получения заданного закона изменения прочности с глубиной. Во втором случае определенный закон прочности задается с самого начала. В результате расчетов было установлено, что в обоих вариантах значения распределения напряжений и деформаций близки. В дальнейшем будут рассмотрены результаты первого варианта приложения нагрузки.

При заданных параметрах пластическая деформация развивается в выделенных блоках. Появление пластичности приводит к перераспределению напряжений, вызывая изменение давления. Из уравнения (1) следует, что прочность, напряжение и давление являются взаимосвязанными параметрами и изменение значения одного из них приводит к изменениям в остальных.

Пластическая деформация возникает не только в области с пониженной прочностью, но и в окружающем пространстве, которое изначально было упругим. Для того чтобы оценить переход среды к пластическому состоянию, было предложено использовать параметр в виде:

$$\varsigma = \frac{\tau^* - \tau}{\gamma(z)},$$

где  $\tau$  – интенсивность касательных напряжений,  $\gamma(z)$  – нормирующий параметр, который равен значению максимальной разности, достигаемой в числителе с глубиной. На рисунке 2,  $\delta$ , видно, что пластическая деформация не только затронула блоки с пониженной прочностью, но также оказала влияние на вышележащий слой. Это происходит вследствие утонения пластического блока и приводит к образованию прогиба в верхнем слое (рис. 2,  $\epsilon$ ). Изменение напряженного состояния приводит к развитию вертикальных зон пластической деформации в верхнем слое.

В результате моделирования было установлено, что геометрия зон пластических деформаций отражается в форме рельефа дневной поверхности. Ширина прогиба верхнего слоя коррелируется с шириной ослабленного пластического блока. Размер блоков и их положение в пространстве оказывают влияние на величину прогибов: чем меньше блок и чем более глубоко он расположен, тем меньшее влияние он оказывает на окружающую среду.



Рис. 2. Результаты моделирования: *a* – профиль изменения прочности с глубиной; *б* – распределение параметра, характеризующего близость среды к пластическому состоянию; *в* – границы рельефа: *I* – дневная поверхность; *2* – между первым и вторым слоями; *3* – между вторым и третьим.

Проведенные расчеты показали, что существует несколько причин появления пластических деформаций в среде. Основной причиной является понижение прочности в блоках. При этом блоки с пониженной прочностью утоняются в вертикальном направлении и расширяются в горизонтальном, оказывая дополнительное боковое давление на смежное пространство. Изменение геометрии блоков приводит к погружению части вышележащего упругого слоя, что способствует проявлению в нем пластичности вследствие перераспределений напряжений и деформаций. Наличие реологической неоднородности отражается в рельефе земной поверхности, способствуя образованию прогибов. Их величина зависит от размера зоны пластичности и ее пространственного положения. Ширина прогибов соответствует размерам блоков с пониженной прочностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gol'din S.V., Suvorov V. D., Makarov P.V., Stefanov Yu.P. An instability gravity model for the structure and stressstrain state of lithosphere in the Baikal rift // Russian Geology and Geophysics. 2006. № 10. P. 1079–1090.

2. Ranalli G., Merphy D.C. Rheological stratification of the lithosphere // Tectonophysics. 1987. V. 132. P. 281-295.

3. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin–Heidelberg–New York: Springer, 1999. 246 p.

4. Stefanov Yu.P., Bakeev R.A. Formation of flower structures in a geological layer at a strike slip displacement in the basement // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2015. V. 51, № 4. P. 535–547.

### THE INFLUENCE OF RHEOLOGICAL INHOMOGENEITIES ON STRESS-STRAIN STATE OF THE FRAGMENT OF THE CRUSTAL MODEL

A.A. Tataurova<sup>1, 2</sup>, Yu.P. Stefanov<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Petroleum Geology and Geophysics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

*Abstract.* The paper deals with the features of the stress-strain state of the fragmentary model of elastoplastic crustal processes. Emphasis has been placed on the study of the influence of rheological inhomogeneities on the pattern of deformation behavior. Analysis of the parameter influence has been carried out using numerical modeling. The calculations have been performed under conditions of plane deformation with the use of explicit finite-difference scheme. Beyond the elastic limit, the deformation has been calculated based on the modified Drucker-Prager-Nikolaevskii model combined with a non-associated flow rule. This paper presents some results of numerical experiments for the medium, which is deformed due to the force of gravity under different load sequences.

It has been found that plastic deformation is strongly affected by the law strength distribution with depth. Decrease in strength causes thinning of the blocks under the influence of the overlying rocks. This leads to sagging and to the change in geometric boundaries between the overlying rock layers. The partial subsidence of elastic layer caused the redistribution of stresses within it, which gave rise to the formation of narrow vertical zones of plasticity. The plasticity length-scale parameters are influenced by geometry and size of the rheological heterogeneities. Thus, the plastic deformation in the weakened zone has a profound impact on the stress-strain state of the medium.

Keywords: Earth's crust, sag, numerical modeling, stress-strain state, plastic deformation, strength

\*\*\*

УДК 551.24

# АНАЛИЗ ЗЕРКАЛ СКОЛЬЖЕНИЯ РИФЕЙСКИХ МЕТАМОРФИТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНОГО САЯНА

Т.Ю. Тверитинова

Геологический факультет МГУ, Москва, Россия

Аннотация. Изучена трещиноватость рифейских метаморфических толщ в зоне Главного Саянского разлома в центральной части Восточного Саяна (верховья Большой и Малой Бирюсы). Массовые замеры зеркал скольжения обработаны методом парагенетического анализа трещиноватости [10] и с помощью специальной компьютерной программы выявления количественных параметров тектодинамических парагенезисов минидизьюнктивов и последовательности их формирования [6]. Полученные результаты отражают сложную структурную обстановку с формированием преимущественно взбросо-сдвиговых зеркал скольжения, фиксирующих преобладающие сдвиговый и надвиговый типы поля напряжений в условиях меридионального латерального сжатия и субгоризонтального субширотного (сдвиговый тип) и субвертикального (надвиговый тип) растяжения. Компьютерная обработка позволила выявить не менее шести деформационных этапов, выраженных наличием закономерно связанных парагенетических сообществ, отвечающих определенным условиям нагружения. Возраст выделенных парагенезов проблематичен, но сравнение полученных данных с региональным материалом по Восточному Саяну и прилегающим территориям позволяет предполагать, что формирование большинства зеркал скольжения было связано с позднеальпийской эпохой тектогенеза. При этом формирование структур разрушения подчинялось более древним структурным планам.

Ключевые слова: дизъюнктив, зеркало скольжения, поле напряжений, парагенезис, структурно-кинематический метод

Объект исследований. Работы проведены на одном из рудных полей Бирюсинского золоторудно-россыпного узла Восточно-Саянской золотоносной провинции [1]. Территория рудного поля является частью Удинско-Колбинской зоны Присаянского краевого шва (Главного Саянского разлома (ГСР)) между Сибирской платформой и Алтае-Саянской складчатой областью, выраженной системой рифтоподобных прогибов, закономерно омолаживающихся с юго-запада на северо-восток: Мурхойского (нижнерифейская мурхойская свита), Чатыгойского (средне-верхнерифейская чатыгойская серия и ее аналоги), Негодкинского, Миричунского и Киченского (венд-кембрийские отложения). Изученный участок расположен в зоне одного из швов ГСР – Мурхойского разлома между Мурхойским и Чатыгойским грабенами (рис. 1). Оруденение золото-сульфидно-кварцевой формации локализовано в зонах приразломной складчатости и тектонической трещиноватости в мраморизованных известняках и кварц-карбонатных сланцах нижнерифейской мурхойской свиты, метапесчаниках и углеродистых сланцах хорминской свиты среднего-верхнего рифея, габброидах мадарского и гранитоидах саржинского позднерифейского комплекса. Мурхойский разлом смят в систему крупных синформ и антиформ, отражающую правосдвиговые деформации в зоне ГСР, и разбит более поздними разломами.



Рис. 1. Схематическая карта рудного поля и участков структурно-кинематических наблюдений. *1* – окраина Дербинского блока (ранний докембрий); *2* – Мурхойский грабен (мурхойская толща); *3* – Чатыгойский грабен (хорминская свита); *4* – массив габброидов мадарского комплекса; *5* – гранитоиды саржинского комплекса; *6* – разломы (достоверные и предполагаемые); *7* – участки структурных наблюдений; *8* – контуры рудных зон.

Структурный рисунок метаморфических толщ является результатом неоднократной структурнометаморфической переработки в этапы активизации тектонических движений, магматизма, метаморфизма, гидротермальных процессов [1, 2]. В пределах рудного поля выделяется северо-западный, центральный и юго-восточный участки, разделенные субширотными разломами (рис. 1). Северозападный и юго-восточный участки характеризуются относительно простым тектоническим строением, рудные зоны вытянуты здесь вдоль относительно прямолинейных отрезков Мурхойского разлома северо-западной ориентировки. Центральный участок, включающий большинство рудных зон рудного поля, построен наиболее сложно вследствие существенной пликативной деформации Мурхойского разлома и наличия секущих его крутопадающих разломов.

Фактический материал. В рифейских породах замерено более 1200 сопровождающихся жильным выполнением зеркал скольжения (ЗС) – трещин с характерными бороздами скольжения по жильному выполнению; информация дополнена данными по распределению структур отрывно-жильного типа, сланцеватости и полосчатости, шарниров мелких складок (табл. 1).

							Табли
Зона	Всего /кинематика	Отрывы/жилы, всего/%	Правые сдвиги, всего/%	Левые сдвиги, всего/%	Взбросы, всего/%	Сбросы, всего/%	_
		севе	ро-западный участ	ок			-
XP	455/329	79/24	60/18	85/26	96/29	9/3	
		це	нтральный участо	к			
ЦP	140/72	12/17	18/25	28/39	13/18	1/1	
ЛР	220/115	17/15	29/25	45/39	20/17	4/3	
ШР	305/191	76/40	31/16	28/15	48/25	8/4	
Всего	665/	105/24	78/22	105/31	81/20	13/3	
		ЮГС	-восточный участо	ок			
ЧБР	600/309	93/30	60/19	84/27	62/21	11/4	
		3a I	пределом рудных за	0H			
УΓ	260/128	42/33	19/15	25/20	29/23	13/10	
УЛ	198/100	19/19	23/23	21/21	25/25	12/12	
Всего	458/228	61/26	42/19	46/21	54/24	25/11	_
	D	VD ID TD II	ID LIED (	\ \	1 / E		

Примечание. Рудные зоны: ХР, ЦР, ЛР, ШР, ЧБР (названия условные); вне рудных зон: УГ – устье руч. Гурбея, УЛ – устье руч. Липатровский. Жирным шрифтом выделены преобладающие структуры.

По рудным зонам и участкам за их пределами проведен кинематический анализ трещиноватости с ипользованием структурно-парагенетического метода анализа минидизьюнктивов [3–5]. Повсеместно фиксируется характерная крутопадающая метаморфическая сланцеватость и полосчатость северозападного простирания и других ориентировок. Сланцеватость чаще параллельна полосчатости, в замковых частях мелких складок является по отношению к ней секущей. Метаморфические толщи рассечены согласными и секущими сланцеватость различно ориентированными трещинами с жильным выполнением и разнообразными ЗС.

По сводным кинематическим стереограммам структур разрушения определены основные параметры складчатой структуры рудных зон (сланцеватость), главных систем жильно-отрывных структур, ЗС различного типа (часто организованных в малые и большие пояса трещиноватости), определены ориентировки главных осей сжатия и растяжения, ответственных за структурный рисунок эллипсоидов напряжений (табл. 2). Сводная очень сложная стереограмма трещиноватости различного типа по всему рудному полю (рис. 2) отражает главные поля напряжений (ПН) последних этапов деформирования. Главной системой в структуре рудного поля является крутопадающая сланцеватость запад-северозападного простирания. Другие ориентировки сланцеватости отвечают в основном мелким складкам. Практически на всех поверхностях сланцеватости выражена минеральная линейность, но она детально не исследовалась. Отрывно-жильные структуры и разнообразные ЗС развиты по крутопадающим системам сланцеватости, представлены наклонными и пологими структурами. Среди ЗС преобладают взбросы и сдвиги. Широкое развитие субгоризонтальных и пологонаклонных ЗС указывает на активность субгоризонтальной системы, появление которой, возможно, было связано с формированием первичных складок с горизонтальными шарнирами, которые в современной структуре наблюдаются фрагментарно. По распределению ЗС выявляются малые и большие пояса сбросо-взбросовых и сдвиговых нарушений, указывающие на широкое проявление деформационных процессов тектодинамического вращения и течения. Относительно меньшее количество субвертикальных ЗС вдоль сланцеватости, вероятно, связано с тем, что именно вдоль нее происходит главное сплющивание и активное течение материала с участием пластических видов деформации (минеральная линейность) и мы не фиксируем характерных ЗС. Определяющее значение при формировании структуры играли условия меридионального горизонтального сжатия и вертикального и горизонтального широтного растяжения. Менее значительную, но отчетливую роль играло северозападное горизонтальное сжатие, вероятно, связанное с кинематогенными процессами при движении по зоне ГСР.



Рис. 2. Сводная стереограмма основных структур разрушения и осей напряжений. *1* – сланцеватость; 2 – жилы и отрывы; 3–5 – зеркала скольжения: 3 – взбросы, 4 – правые сдвиги, 5 – левые сдвиги; 6, 7 – нормальные оси эллипсоида напряжений: 6 – горизонтального сжатия, 7 – растяжения (*A* – горизонтального, *Б* – вертикального).

Результаты компьютерной обработки замеров. Для выделения последовательности разновозрастных парагенезисов проведена компьютерная обработка замеров 3С по методике О.И. Гущенко и его последователей [6–11]. Выделено шесть фаз палеотектонического нагружения земной коры в развитии структуры рудного поля (табл. 3).

									Таблица 2
она	Сланце-	Жилы и	Зеркала скольжения		П (ориен об	ряса тировка сей)	Оси		
EN .	BAIUCIB	отрывы	взбросы	правые сдвиги	левые сдвиги	малые	большие	сжатия	растяжения
ХР	180∠85 210∠85	30∠88 185∠88 95∠88 345∠85	0∠30	60∠40 240∠40	320∠60 100∠30	∠90	180∠0 75∠0	15∠0 0∠0	∠90 105∠0 90∠0
ЦР	0∠90 240∠80 310∠70	120∠85 270∠70 0∠0	240∠50 340∠40	260∠50 90∠40	340∠60 140∠40	110∠70	140∠85 100∠20	25∠0 60∠0 310∠0	295∠0 210∠75 130∠30
ШР	10∠80 0∠85 290∠70	35∠88 65∠88 110∠88 180∠88	10∠5	350∠5 270∠60	355∠40 90∠40	∠90	∠90	10∠0 0∠0 240∠0	∠90 90∠0
ЛР	220∠85 30∠85	25∠85 125∠80	0∠40 240∠60	10∠40 240∠50	340∠50 100∠60	∠90	110∠10	0∠0 240∠0 310∠0	∠90 90∠0 230∠0
ЧБР	30∠90 330∠80	25∠88 330∠80 65∠88 100∠88	0∠30 180∠70 300∠40 160∠50	210∠40 60∠40	140∠50 300∠40	∠90	90∠0 60∠0	0∠0 30∠0 330∠0	∠90 90∠0 60∠0
УГ	350∠85 30∠85	75∠85 155∠85 20∠30	350∠60 260∠20 90∠30	80∠85 260∠20 190∠70	350∠60 60∠65 120∠70	∠90	0∠0 355∠0	350∠0 10∠0 90∠0 250∠0	∠90 75∠0 155∠0
УЛ	180∠85 270∠80	325∠85 10∠85 150∠60	0∠0	60∠20 130∠40	180∠10	∠90	∠90	0∠0 330∠0 90∠0	∠90 325∠0 10∠0

Примечание. Рудные зоны: ХР, ЦР, ЛР, ШР, ЧБР (названия условные); вне рудных зон: УГ – устье руч. Гурбея, УЛ – устье руч. Липатровский. Сбросы в пределах рудного поля непредставительны, поэтому данные по ним не приводятся.

											Таблица 3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Фаза	%	Cooc.	Тип	Sigma1	Sigma2	Sigma3	MuSi	MuEp	TauLft	TauRgt	
A	35.2	3.3	-2-	273.1	21.87	183.3	0.99	0.27	138.1	228.3	
В	23.4	1.5	-1-	277.90	277.0	187.0	-0.99	-0.06	7.45	187.45	
2	15.6	1.6	-1-	348.86	184.4	94.1	-0.99	-0.57	90.46	278.44	
D	19.4	4.3	-2-	13.0	283.78	103.12	0.98	0.08	57.8	149.8	
Е	10.2	6.7	-3-	189.1	99.15	284.75	-1.00	0.00	204.44	355.42	
F	10.8	7.3	-3-	280.0	190.4	10.86	-0.98	-0.45	284.45	96.45	

Примечание. Фаза – фазы деформирования в порядке от наиболее поздней (A) к более древним (B, C, D, E, F). % – количество замеров из всего объема (в %), отвечающих данной деформационной фазе. Соос. (соосность) – угол расхождения (в градусах) между осями напряжений и деформаций. Тип – деформационные механизмы (типы ПН) (1 – взбросовый, 2 – сдвиговый, 3 – сбросовый). Sigma1—Sigma2—Sigma3 – ориентация осей нормальных напряжений: растяжения (Sigma1), промежуточного напряжения (Sigma2) и сжатия (Sigma3). MuSi – MuEp – величины коэффициентов Лодэ-Надаи для эллипсоидов напряжений (MuSi) и деформаций (MuEp). TauLft и TauRgt – ориентировки осей действия максимальных касательных напряжений (с левой и правой сдвиговыми компонентами при сдвиговом ПН, парных сбросов при сбросовом ПН или парных взбросов при взбросовом ПН). Численные значения ориентировок даны по О.И. Гущенко в проекции на верхнюю полусферу сетки Вульфа. Жирным шрифтом выделены фазы, благоприятные для рудообразования.

Выявленные ПН образуют закономерный ряд, будучи связаны какой-либо одной тектодинамической осью при переиндексации двух других. При этом все эллипсоиды ориентированы симметрично современной географической сети координат. Наиболее поздний режим деформирования определялся условиями меридионального латерального сжатия и латерального широтного и вертикального растяжения, что подтверждает выводы, сделанные на основе структурно-парагенетического анализа.

Возраст выявленных полей напряжений. Тектодинамическая обстановка меридионального сжатия характерна для новейшего поля напряжений центральной части Евразийского континента. При северо-западной ориентировке Восточного Саяна и, в частности ГСР, ведущим деформационным процессом в условиях меридионального сжатия являлся процесс правосдвиговых деформаций. Обстановке меридионального сжатия предшествовала обстановка широтного сжатия предшествовала обстановка широтного сжатия (сдвиговый тип ПН, поле D), последовательно сменившаяся при переходе к полю А обстановкой сначала широтного (поле С), а потом меридионального сжатия (поле В) в условиях взбросового поля напряжений. А вот до сдвигового ПН с широтным сжатием и меридиональным растяжением проявлялись условия сбросовых полей напряжений, возможно отражающих общую геодинамическую обстановку растяжения. В последовательности деформационных фаз в качестве наиболее ранних выявляются поля напряжений с меридиональным (поле Е) и предшествующим ему широтным (поле F) растяжением при вертикальном сжатии. С проявлением тектодинамических обстановок растяжения (фазы Е и F) в региональном плане, возможно, следует связывать формирование Байкальской рифтовой системы, в строении которой участвуют сегменты меридиональной и широтной ориентировки, что указывает на проявление в начальные этапы ее формирования условий меридионального и широтного растяжения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Галимова Т.Ф. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. Серия Ангаро-Енисейская. Лист N-47–Нижнеудинск. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. 652 с.

2. Сизых А.И., Сизых Н.В. Геология, петрология и геодинамика фанерозойских метаморфических поясов Восточного Саяна // Режимы формирования Центрально-Азиатского складчатого пояса. М., 2001. С. 362–384.

3. Лукьянов А.В. Структурные проявления горизонтальных движений земной коры. М.: Изд-во АН СССР, 1965. 212 с.

4. Лукьянов А.В. Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере. М.: Наука, 1991. 144 с.

5. Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М.: ГИН АН СССР, 1987. С. 173–235.

6. Васильев Н.Ю., Корчемагии В.А., Костенко Н.П., Мострюков А.О., Никольская Н.Е., Сим Л.А. Этапы и стадии тектоническою нагружения в эволюционном развитии массива габбро-пироксенит-дунитовой формации (Ватыно-Вывенская сутура. Корякское нагорье) // Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма: Материалы XXXII Тектонич. совета. М.: ГЕОС, 1999. Т. 1. С. 121–123.

7. Васильев Н.Ю., Мострюков А.О. Тектонофизическая реконструкция условий размещения благородных металлов в дунитах расслоенного массива // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М.: Наука, 2000. Т. 1. С. 281–295.

8. Васильев Н.Ю., Мострюков А.О. Особенности рудолокализующих условий деформации геологической среды в характеристиках тектонических полей напряжений // Фундаментальные проблемы тектоники: Материалы XI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2007. Т. 1. С. 126–130.

9. Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // Докл. АН СССР. 1975. Т. 225, № 3. С. 557–560.

10. Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 725.

11. Гущенко О.И. Кинематический принцип относительной хронологии палеонапряжений (основной алгоритм тектонического стресс-мониторинга литосферы) / Теоретические и региональные проблемы геодинамики. М.: Наука, 1999. С. 108–125.

### ANALYSIS OF SLICKENSIDES IN RIPHEAN METAMORPHIC ROCKS OF THE CENTRAL EASTERN SAYAN

T.Yu. Tveritinova

Geological Faculty of Moscow State University, Moscow, Russia

*Abstract.* The studies have been made of fractures in the Riphean metamorphic rocks in the Main Sayan Fault zone in the central part of the East Sayan (upper reaches of the Bolshaya Biryusa and Malaya Biryusa rivers). Mass slickenside measurements have been processed using paragenetic analysis of fractures [10] and a special computer program to identify quantitative parameters of tectodynamic parageneses of mini-disjunctives and sequence of their formation [6]. The results obtained show the complex structure and predominant formation of slickensides of reverse-slip faults, reflecting primarily the strike-slip- and thrust-type stress fields under conditions of meridional lateral compression and subhorizontal sublatitudinal (strike-slip-type) and subvertical (thrust-type) extension. Computer processing has yielded at least six deformation stages expressed by the presence of regularly connected paragenetic communities that meet certain loading requirements. The determination of age of the parageneses that were identified is problematic, but when the obtained data are compared with the regional material on the Eastern Sayan Mountains and adjacent areas, it is apparent that the formation of slickensides was largely related to the late Alpine tectogenesis. The formation of the fracture structures therewith was subjected to more ancient structural plans. *Keywords:* disjunctive, slickenside, stress field, paragenesis, structural and kinematic method

УДК 551.243.6

### НЕКОТОРЫЕ СТРУКТУРНЫЕ СЛЕДСТВИЯ НОВЕЙШИХ СДВИГОВЫХ ДВИЖЕНИЙ ПО ДРЕВНИМ РАЗЛОМАМ ФУНДАМЕНТА ПЛАТФОРМ. АНАЛОГИЯ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

\*\*\*

### Н.С. Фролова, А.Н. Корбутяк, А.А. Мишакина, С.В. Корпач

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. Целым рядом исследователей показано, что в новейшее время происходит активизация многих разломов фундамента платформ. В последние годы появляется все больше публикаций, в которых доказывается сдвиговый характер смещения по таким разломам, при этом в осадочном чехле образуются не только дизъюнктивные, но и пликативные структурные формы. Складки продольного укорочения, выраженные в рельефе как эшелонированные брахиморфные поднятия (валы) над крупными сдвигами фундамента, описаны в природе, получены в экспериментах с использованием глины, имитирующей чехол, и входят в качестве члена структурного парагенеза сдвиговых зон во все учебники по структурной геологии. В то же время при моделировании некоторые исследователи получили эшелонированные валообразные поднятия с иной ориентировкой по отношению к направлению сдвига и с другим механизмом формирования, однако они до сих пор плохо изучены, и им не найдено аналогов в природе. Проведенная нами серия экспериментов, в которых «чехлом» служил песок (такие модели часто больше похожи на природные), позволила изучить морфологию поднятий, ее зависимость от изменения некоторых условий эксперимента, а также проследить весь процесс и условия их формирования. Природным аналогом этих структур могут служить крупные эшелонированные валы (например, Варьеганский, Вынгаяхский, Етыпуровский), выраженные в рельефе структурных поверхностей стратиграфических подразделений от юры до палеогена на севере Западно-Сибирской плиты. Они сформировались в позднем кайнозое при активизации крупных разломов, входящих в систему Колтогорско-Уренгойского грабен-рифта, при этом движения носили сдвиговый характер. Вероятно, такое же происхождение могут иметь многие эшелонированные валообразные поднятия, приуроченные к древним рифтам (авлакогенам) в фундаменте других платформ (например, Вятский вал на Восточно-Европейской платформе, Арало-Кызылкумский вал на Туранской плите и др.).

*Ключевые слова*: аналоговое моделирование, рифт, разлом фундамента, внутриплитная сдвиговая тектоника, валообразное поднятие, Западная Сибирь

Вдоль древних разломов фундамента платформ в осадочном чехле нередко наблюдаются цепочки вытянутых поднятий, чаще всего расположенных кулисообразно (эшелонированно). Это пологие формы высотой до первых сотен метров, часто асимметричные. Такие структуры в отечественной литературе принято называть валами. Они развиты либо над осевыми частями авлакогенов, либо в их бортах над граничными и другими разрывами. Выраженность в рельефе и пространственная связь с разломами фундамента приводят исследователей к логичному выводу, что эти поднятия сформировались при активизации таких разломов в новейшее время. А вот мнения о механизме формирования поднятий расходятся.

Существует мнение, что зоны приразломных поднятий связаны с опусканием крыльев по краевым сбросам авлакогенов [1]. В ряде случаев этот механизм подтверждается данными о структуре валов, в которых наклон слоев увеличивается с глубиной от долей градуса до 18–20°, однако он не объясняет кулисное расположение валообразных поднятий и требует доказательства того, что в новейшее время возобновилось именно растяжение.

По мнению других ученых (П.Е. Оффман, Ю.Н. Успенская, С.Ф. Федоров и др.), возникновение платформенных протяженных валов, состоящих из цепочек локальных, часто кулисообразных поднятий, обусловлено вертикальными колебательными движениями восходящего характера, проявлявшимися вдоль ослабленных зон фундамента [2].

Очень популярной является точка зрения об инверсии авлакогенов и формировании в связи с этим валообразных структур [3, 4]. Безусловно, инверсия рифтов (авлакогенов) имеет место, и для некоторых из них это можно считать доказанным. Такая инверсия была многократно воспроизведена экспериментально [5], и установлено, что над рифтом по всей его длине формируется поднятие, осложненное взбросами и надвигами. Таким образом, моделирование помогает установить природу поднятий, приуроченных к древним рифтам. Из этого следует, что если мы видим отдельные эшелонированные поднятия при отсутствии надвигов, вряд ли можно говорить об инверсии. Кроме того, надо объяснить, почему сжатие затрагивало лишь отдельные локальные участки платформы.

Роль сдвигов в формировании валообразных поднятий. С каждым годом появляется все больше

публикаций о роли горизонтальных сдвигов фундамента древних и молодых платформ в новейшей тектонике. Так, в результате исследований в Каспийском регионе, коллектив авторов [6] пришел к выводу, что крупные региональные нарушения имеют значительные горизонтальные перемещения. Большинство из них активны в настоящее время, а в зонах этих разрывов наблюдаются кулисные пликативные дислокации. А.И. Тимурзиев [7] в своих работах обосновал наличие сдвигов фундамента в пределах нескольких разновозрастных осадочных бассейнов Земли и показал, что такие сдвиги, независимо от возраста основания, являются деформациями новейшего этапа.

Давно замечено, что зоны сдвига всегда выражены в рельефе. Достаточно посмотреть снимки знаменитого сдвига Сан Андреас. Кстати, именно там были описаны эшелонированные валообразные поднятия, изучение которых показало, что это складки продольного укорочения, оси которых перпендикулярны оси максимального сжатия. Такие складки называют еще складками продольного изгиба и складками присдвигового волочения. Последнее, впрочем, некорректно. Эти складки были получены в 20-х годах У. Мидом в экспериментах и подробно описаны в известном труде А. Сильвестра [8] (рис. 1, a).

Мы тоже получали эшелонированные брахиморфные складки продольного укорочения в экспериментах (рис. 1,  $\delta$  и  $\epsilon$ ). В основе механизма их образования лежит изгиб. После своего зарождения они рассекаются формирующимися сколами Риделя, и их части с течением времени все больше смещаются друг относительно друга (рис. 1,  $\delta$  и  $\epsilon$ ). Такие складки входят в качестве члена структурного парагенеза сдвиговых зон во все учебные пособия, посвященные структурной геологии, например [5, 9, 10].

Однако в зонах сдвига существуют поднятия иной природы. В моделях из глины их получили, например [11, 12 и др.] (рис. 2). Оси этих поднятий ориентированы под небольшим углом к оси сжатия и никак не могут быть складками продольного укорочения. Их формирование связано с поднятиями между концами смежных сколов Риделя [13, 14]. Такие поднятия, хотя и были получены в результате физического моделирования достаточно давно, специально стали изучаться только в последние год [12]. Мы тоже провели серию экспериментов, но, в отличие от А.С. Черемных, использовали песок в качестве эквивалентного материала, поскольку модельные структурные формы в этом случае, как нам кажется, больше похожи на природные.

Физическое моделирование валообразных поднятий. Мы поставили перед собой задачу экспериментально изучить причины, эволюцию, морфологию описанных выше валов и влияние на них различных факторов. «Фундаментом» служили две доски длиной 90 см, смещаемые друг относительно друга со скоростью 0.7 мм/мин в специальном приборе. «Чехлом» служил песок различной зернистости, сухой и влажный, а также с примесью солидола. Мощность «чехла» составляла 3 или 4.5 см. Правомерность использования песка для моделирования верхних частей земной коры показана многими зарубежными исследователями [15, 16].

Во всех экспериментах были получены валы. При небольшой амплитуде сдвига формировался вал по всей длине «разлома в фундаменте», при этом в сухом песке он был хорошо выражен, а во влажном слабо заметен. При увеличении амплитуды сдвигания постепенно начинали формироваться сколы Риделя, а единый вал (рис. 3-1) распадался на ряд более мелких асимметричных вытянутых эшелониро-

ванных поднятий, расположенных между этими сколами (рис. 3-2). Постепенно поднятия увеличивали амплитуду и все больше разобщались (рис. 3-3). В конце концов, их рост прекращался, но они продолжали отодвигаться друг от друга. Максимальной амплитуды поднятия достигали в крупнозернистом песке – влажном или с солидолом. Величина поднятий не зависела от мощности «чехла». Анализ экспериментов показал, что над сдвигами в «фундаменте» валообразные поднятия в гранулированных материалах «чехла» формируются всегда. Они могут иметь разную форму, степень вытянутости, конфигурацию, размеры и амплитуду, располагаясь эшелонированно, а иногда и четковидно (рис. 3-4). Причиной формирования валов является на первом этапе дилатансия. а затем сжатие, с подъемом вверх, материала между смежными концами сколов Риделя (рис. 4). Иными словами, эти структуры аналогичны известным локальным поднятиям типа push-up (pop-up), которые формируются между двумя разломами сдвигового типа в обстановке транпрессии. Разница заключается в том, что в нашем случае транспрессионное поле напряжений является полем второго ранга и регулярно повторяется вдоль единого разлома.



Рис. 1. Складки продольного укорочения, формирующиеся в чехле над сдвигом в фундаменте: *a* – ориентировка осей таких складок по отношению к направлению сдвига и осям максимальных напряжений; б и *в* – складки в образце из влажной глины со слабой горизонтальной неоднородностью (опыт M09-1).



Рис. 2. Поднятия между концами смежных сколов Риделя в моделях из глины (*a* – [18], *б* – эксперимент лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ).



Рис. 3. Развитие валообразных поднятий (1–4) в эксперименте. Простой неоднородный правый сдвиг. Песок с небольшой примесью солидола, фракция 0.5–0.8 мм.



Рис. 4. Принципиальная схема формирования валообразных поднятий в зонах сдвига.

Природные аналоги полученных структур. Такие аналоги нашлись в северной части Западно-Сибирской плиты. В фундаменте этой плиты на основе сейсмических данных и бурения выделяют систему грабен-рифтов триасового возраста (рис. 5, a), заполненных рифтовым комплексом отложений и перекрытых мезозойско-кайнозойским чехлом. На картах структурных поверхностей (по кровле юрского комплекса, альб-сеноманского горизонта и эоцена) на многих участках рифтовой системы видны цепочки валообразных поднятий. Они в основном тяготеют к Худуттейскому рифту (рис. 5,  $\delta$ ).

Углы падения пластов на крыльях валообразных структур составляют первые градусы. Наибольшую площадь валы имеют по кровле сеноманских отложений, по более глубоким горизонтам плошаль мегавалов меньше. Высота валов также максимальна в разрезе меловых и верхней части юрских отложений (самые первые сотни метров), а в направлении подошвы осадочного чехла валы исчезают [17]. Это обстоятельство позволило В.П. Гаврилову [17] высказать предположение, что происхождение валов связано с конвективной неустойчивостью пластичных пород. Г.Е. Рябухин [4] полагает, что надразломные валообразные структуры имеют инверсионное происхождение. А.А. Нежданов считает, что образование валообразных поднятий обусловлено тангенциальными подвижками в бортах рифтов при их раздвижении на неотектоническом этапе активизации. О такой активизации разломов фундамента пишет немало авторов, но в последние годы большинство из них считает, что по разломам происходили сдвиговые движения [7, 18]. Кроме того, показано, что главная ось сжатия на Западно-Сибирской плите ориентирована субмеридионально [7, 18, 19 и др.]. Детальные работы последних лет привели таких исследователей, как [7, 20], к пониманию того, что формирование валообразных поднятий обусловлено сдвигами в фундаменте. Эти авторы полагали, следуя общепринятым представлениям, что валы - это складки «присдвигового волочения» [7], складки продольного изгиба [20]. Однако анализ и сравнение ориентировок осей таких складок в экспериментальных молелях и природе показывают. что здесь это не так (рис. 6). Ориентировка Худуттейского разлома по отношению к оси регионального сжатия может вызвать только правосдвиговые движения по нему. Следовательно, оси складок продольного укорочения должны быть ориентированы так, как показано на рис. 6, а. Однако оси реальных валов ориентированы совсем иначе (рис. 6, б), противоположно направлению перемещения крыльев разлома в фундаменте, следовательно, они не могут быть складками продольного укорочения, а вот нашим экспериментам это как раз не противоречит (рис. 6, в).



Рис. 5. Рифтовые структуры и валы севера Западно-Сибирской плиты: *а* – схема континентальной рифтовой системы раннего-среднего триаса Западной Сибири (по В. С. Суркову и др. с упрощениями) [4]: *1* – рифты (грабен-рифты); *2* – эффузивно-осадочный комплекс (Т<sub>1-2</sub>); *б* – структурная карта по кровле альб-сеноманского горизонта (фрагмент) [7], белая пунктирная линия – Худуттейский разлом.



Рис. 6. Валообразные поднятия в экспериментальных и природных зонах неоднородного сдвига: *a* – брахискладки продольного укорочения в модели из слабослоистой влажной глины; *б* – Пуровский пояс мегавалов. Фрагмент структурной карты Западно-Сибирской синеклизы по кровле альб-сеноманского горизонта [17]; *в* – валообразные поднятия в модели из песка. Белые сплошные линии – проекции на поверхность: на *a* и *в* – линии соприкосновения блоков, имитирующих фундамент в экспериментах, на *б* – Худуттейский разлом. Белые пунктирные линии – оси складок или валов.

Итак, основными доводами в пользу рассматриваемого нами механизма формирования валов на севере Западно-Сибирской плиты свидетельствует эшелонированное расположение их вдоль крупного разлома и, главное, ориентировка осей согласно описанной выше модели. Не противоречат нашему предположению отмеченная геологами асимметрия валов и уменьшение их выраженности вниз по разрезу. Такое изменение структуры видно на поперечных разрезах сдвиговых зон в экспериментах. Остальные гипотезы о природе валов на севере Западной Сибири либо противоречат тем или иным данным о природной структуре, либо их реальность не подкреплена экспериментами. эшелонированные валообразные поднятия между сколами Риделя (то, что они существуют, было известно и ранее), но и проследили весь процесс их формирования. Мы показали, что валы могут иметь весьма разнообразную морфологию и соотношение друг с другом, что зависит от свойств среды и амплитуды сдвигания. Аналоги полученных нами цепочек валообразных поднятий мы нашли на севере Западно-Сибирской плиты. В принципе, сдвиговые движения по разломам фундамента – простой и универсальный механизм формирования валов в чехле платформ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–35–00575).

В наших экспериментах мы не только получили

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гарецкий Р.Г. Тектоника молодых платформ Евразии. М.: Наука. 1972. 240 с.

2. Успенская Н.Ю. Некоторые закономерности нефтегазонакопления на платформах. М.–Л.: Гостоптехиздат, 1952. 155 с.

3. Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2004. 339 с.

4. Рябухин Г.Е., Байбакова Г.А. Формирование и нефтегазоносность осадочных бассейнов связи с рифтогенезом // Геология нефти и газа. 1994. № 5. С. 3–7.

5. Fossen H. Structures Geology. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 463 p.

6. Леонов Ю.Г., Волож Ю.А., Антипов М.П., Быкадоров В.А., Хераскова Т.Н. Консолидированная кора Каспийского региона: опыт районирования. М.: Изд-во «Геос», 2010. 51 с.

7. Тимурзиев А.И., Гогоненков Г.Н. Структурно-тектоническая характеристика фундамента сдвиговых зон на примере Еты-Пуровского вала // Геология нефти и газа. 2007. № 6. С. 2–10.

8. Sylvester A.G. Strike-slip faults // Geol. Soc. Amer. Bull. 1988. V. 100. P. 1666-1703.

9. Кирмасов А.Б. Основы структурного анализа. М.: Научный мир, 2011. 368 с.

10. Прокопьев А.В., Фридовский В.Ю., Гайдук В.В. Разломы (морфология, геометрия и кинематика). Якутск: ЯФ Изд-во СО РАН, 2004. 148 с.

11. Борняков С.А. Тектонофизический анализ процесса формирования трансформной зоны в упруговязкой модели // Проблемы разломной тектоники. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1981. С. 26–44.

12. Черемных А.С., Тарасова А.А. Основные закономерности разломообразования в литосфере и их прикладные следствия (по результатам физического моделирования) // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5(4). С. 823-861.

13. Гончаров М.А., Фролова Н.С. Парадокс ориентировки некоторых новейших нефтегазоносных брахиантиклиналей сдвиговых зон вдоль оси максимального сжатия: тектонофизическое истолкование // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Т. 1. М.: Изд-во «Геос», 2008. С. 218–222.

14. Atmaoui N., Kukowski N., Stöckhert B., König D. Initiation and development of pull-apart basins with Riedel shear mechanism: insights from scaled clay experiments // International Journal of Earth Sciences. 2006. V. 95. P. 225–238.

15. Dooley T.P., Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results // Tectonophysics. 2012. V. 574–575. P. 1–71.

16. Naylor M.A., Mandl G, Sijpesteijn C.H.K. Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states // Journal Struct. Geol., 1986. V. 8. P. 737–752.

17. Гаврилов В.П., Григорьянц Б.В., Дворецкий П.И., Пономарев В.А., Тарханов М.И. Зоны нефтегазонакопления жильного типа. М.: «Недра», 2000. 152 с.

18. Сим Л.А., Брянцева Г.В., Постникова О.В., Постников А.В., Пошибаев В.В. О новейшей геодинамике Тимано-Печорской, Западно-Сибирской и Восточно-Сибирской платформ и ее связи с нефтегазоностью // Материалы XLVII Тектонического совещания "Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты". М.: Изд-во «Геос», 2015. С.157–161.

19. Никишин А.М., Старцева К.Ф. Пример детального объемного строения сдвиговых зон по данным интерепретации 3D-сейсмических данных // Геология нефти и газа. 2015. № 4. С. 29–33.

20. Филиппович Ю.В. Сдвиговая тектоника в районе Надым-Тазовского междуречья и методика прогноза нефтяных залежей. Автореф. дис. ... канд. геол-минер. наук. М., 2012. 21 с.

# SOME STRUCTURAL EFFECTS OF RECENT STRIKE-SLIP MOVEMENTS ALONG LARGE FAULTS IN THE BASEMENT OF ANCIENT PLATFORMS: AN ANALOGUE TO PHYSICAL MODELING RESULTS

N.S. Frolova, A.N. Korbutyak, A.N. Mishakina, S.V. Korpach

### Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. A number of researchers have shown that many faults in platform basement have been recently activated. More and more publications are dealing with strike-slip displacements along these faults, with both disjunctive and plication dislocations formed in the sedimentary cover. The folds of layers of rocks having axial shortening that form well-defined en echelon brachyanticlinal uplifts (swells) above large basement strike-slip faults were revealed to be naturally occurring, experimentally induced with the cover-imitating clay, and included in all structural geology textbooks as a member of structural paragenesis in shear zones. At the same time, some of researchers obtained experimental en echelon swell-shaped uplifts with an orientation different to that of the shear and with another mechanism of formation; however, they remain poorly understood, and their natural analogues have not been discovered. In our series of experiments we used sand as a «cover» (such models are often more similar to natural) that has made it possible for us to study uplift morphology and its dependence on some changes in experimental conditions, and to follow uplift formation process. Natural analogues of these structures can be large en echelon swell-shaped uplifts (for example, Varyegansky, Vyngayakhsky, Etypurovsky), defined in structural surfaces of Jurassic to Paleogene stratigraphic units in the northern West Siberia. They formed in the late Cenozoic during activation of large faults, which are a part of the Koltogorsko-Urengoysky graben-rift system, with the movement known as strike-slip faulting. The same origin may be assigned to many en echelon swell-shaped uplifts confined to the ancient rifts (avlakogenes) in the basement of the other platforms (for example, Vyatsky swell on the East European platform, Aral-Kyzylkum swell on the Turan plate, and others). Keywords: analogue modelling, rift, fault in basement, intraplate strike-slip tectonics, swell, West Siberia

\*\*\*

УДК 551.243

# ПАРАГЕНЕЗЫ РАЗРЫВОВ В ЗОНАХ РАЗЛОМОВ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

### А.В. Черемных

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Неоднократная активизация региональных разломов Забайкалья отразилась на формировании в их зонах разрывов различных морфолого-генетических типов. В связи с этим одни исследователи признают сбросово-глыбовый характер формирования структур региона, другие находят подтверждение надвиговой тектоники. В настоящее время в пределах Забайкалья известны проявления как комплекса метаморфических ядер, характерных для условий растяжений, так и аркогенных надвигов, формирующихся при активизации в условиях сжатия земной коры. Для получения статистически обоснованного решения о кинематическом типе наиболее крупных (региональных) разломов Западного Забайкалья в их окрестностях был собран необходимый фактический материал, на основе которого проведен структурнопарагенетический анализ разрывов и трещиноватости горных пород. Материал о трещиноватости и локальных разрывах собран в разновозрастных породах, в том числе сформированных в мезозойское и кайнозойское время. Наиболее проявленной обстановкой в изученных разломных зонах является тектоническое поле растяжения северо-запад - юговосточной ориентировки, в котором сформировались локальные сбросы, а также различно ориентированные сдвиги. Обстановкам сжатия соответствуют от 5 до 36 % из общего числа локальных решений в соответствующей разломной зоне. Локальные надвиги реконструированы в домезозойских и в кайнозойских породах, а в мезозойских отложениях их обнаружить не удалось. Структурно-парагенетический анализ, проведенный для 54 точек наблюдения, в которых измерено более 5500 локальных разрывов и трещин, позволил установить соотношение разновозрастных обстановок в изученных разломных зонах, основные из которых по мере выраженности: растяжение, сжатие и правосторонний сдвиг. Ключевые слова: Западное Забайкалье, региональный разлом, структурный парагенез, сброс, поранговый анализ

Полициклическое развитие региональных разломов Западного Забайкалья отразилось в широком распространении в границах их зон разрывов различных морфолого-генетических типов [1]. В связи с этим некоторые исследователи признают сбросово-глыбовый характер формирования структур, другие находят подтверждение надвиговой тектоники региона. Так, в пределах Забайкалья известны проявления как комплекса метаморфических ядер, характерных для условий растяжения [2], так и аркогенных надвигов, формирующихся при активизации в условиях сжатия земной коры [3, 4]. Вероятнее всего, это разновозрастные образования, взаимоотношение между которыми еще следует изучить, хотя имеются и представления об одновременном сочетании тектонических усилий «рифта» и «рампа» [5].

Для определения кинематического типа региональных разломов Западного Забайкалья было применено специальное картирование разломных зон, базирующееся на парагенетическом анализе массовых замеров повсеместно распространенной трещиноватости горных пород. Этот метод недавно получил полную методическую завершенность и в настоящее время является наиболее эффективным для исследования разломной структуры земной коры с учетом ее ранговой соподчиненности [6, 7].

Необходимый фактический материал был собран в окрестностях Тугнуйской, Малетинской и Чикойской впадин, что позволило создать достаточно равномерную сеть точек наблюдения в зонах Северо-Тугнуйского. Южно-Тугнуйского (Северо-Заганского), Хилокского и Чикой-Ингодинского дизъюнктивов. Массовые замеры разрывов и трещиноватости собраны в разновозрастных породах, в том числе сформированных в мезозойское и кайнозойское время. Изучались только неминерализованные разрывы, а также отдельные трещины или дислокации, на поверхности которых наблюдались низкотемпературные минералы (такие, как кальцит), образующиеся в приповерхностных условиях.

В зоне Чикой-Ингодинского разлома, на протяжении 113 км по его простиранию, произведены наблюдения на 14 выходах горных пород. Получено 16 решений о кинематическом типе локальных разрывов. Поранговый структурно-парагенетический анализ в рамках спецкартирования позволил установить, что этот дизьюнктив развивается как зона растяжения, в которой наряду со сбросами широко распространены сдвиги. Взбросовые решения составляют лишь 13 % от общего числа, имеют достаточно крутые (50-70°) углы падения сместителей и могут быть элементами левосторонних сдвигов субширотного и северо-северо-восточного (ССВ) простирания. Кроме того, в горном обрамлении юговосточного борта Чикойской впадины вкрест простирания разлома произведены наблюдения на девяти обнажениях. По результатам анализа отмечается проявление правосторонних сдвигов северовосточного простирания за пределами впадины, а край депрессии ограничен сбросом такой же ориентировки.

В пределах Хилокской разломной зоны, на протяжении 70 км, изучено 24 выхода горных пород, для которых получено 20 локальных решений о типе разрывов. Большинство реконструкций (82 %) соответствует парагенезу зоны растяжения с простиранием 70°. Левостороннему сдвигу с простиранием 30° отвечает 13 % локальных зон скалывания. Лишь одно решение является взбросом с аз.пад. 140∠60°, что составляет 5 % от их общего количества. Если рассмотреть реконструкции, полученные для пород мезозойского и кайнозойского возраста, то установлено следующее. Локальные сбросы и левосторонние сдвиги (пять решений), выявленные в породах мезозойского возраста, как и большинство дислокаций в окрестностях Хилокского дизьюнктива, являются элементами парагенеза зоны растяжения. В кайнозойских породах получено четыре решения, соответсвующие наиболее проявленным парагенезам: ВСВ зоны растяжения (два субширотных левосторонних сдвига), ССВ зоны сдвига (левосторонний сдвиг) и СВ зоны сжатия (охарактеризованный выше взброс).

Южно-Тугнуйский или Северо-Заганский дизъюнктив изучен на протяжении 58 км по простиранию, где произведены наблюдения в 13 точках. Поранговый анализ 14 локальных решений позволил установить, что этот разлом, вероятнее всего, является зоной растяжения северо-восточного простирания (66.5 %). Кроме того, для этого дизъюнктива характерны парагенезы субширотного правостороннего сдвига (18.5 %) и левостороннего сдвига с простиранием 30° (15 % локальных решений). В породах мезозоя оба локальных решения укладываются в парагенезы зон растяжения северовосточного простирания. Из четырех решений в кайнозойских отложениях три соответствуют парагенезу зоны растяжения (сброс, левый и правый сдвиги), одно является левосторонним сдвигом с простиранием 30°.

Для Северо-Тугнуйского разлома исследован 33-километровый сегмент. На этом протяжении произведены наблюдения в мезозойских магматических породах и получено 21 локальное решение о зонах скалывания. В результате порангового парагенетического анализа разрывов установлено наиболее проявленное направление разломной зоны на изученном отрезке – 80°. Этому направлению соответствуют: парагенез зоны растяжения (44 % решений), парагенез зоны сжатия (36 %) и парагенез зоны сдвига с правосторонним перемещением крыльев (20 %).

Проведенное исследование позволило установить следующие особенности. Изученные разломные зоны преимущественно формировались в условиях растяжения, так как структурные парагенезы зон растяжения подтверждаются 44-87 % локальных решений о зонах скалывания различных типов (сбросов, сдвигов и даже взбросов). Парагенезы зон сжатия и сдвига охватывают значительно меньшее количество локальных разрывов: от 5 до 36 % и от 13 до 20 % соответственно. Выше отмечено, что локальные взбросы реконструированы в домезозойских и в кайнозойских породах. В образованиях мезозойского возраста встречены только сбросы и сдвиги. Однако наши наблюдения чаще проведены у подножий склонов, в бортах долин, где редко наблюдались мезозойские отложения. А именно в этих областях формируются аркогенные надвиги. Интересен парагенез левостороннего сдвига с простиранием 30°, который отчетливо проявился как самостоятельная обстановка в зонах Хилокского и Южно-Тугнуйского дизьюнктивов, а для ЧикойИнгодинского разлома является составной частью парагенеза субширотной зоны растяжения следующего ранга. Изучение этой сдвиговой зоны с простиранием, отличающимся от ориентировки региональных разломов региона, требует постановки дополнительных исследований.

В целом, формирование изученных разломов Западного Забайкалья происходило в разное время в обстановках растяжения, сжатия и правостороннего сдвига. Такие же типы разломных зон и в близких процентных соотношениях характерны для региональных разломов Центрального Прибайкалья, где, кроме того, распространены левосторонние сдвиги северо-восточного простирания [8, 9]. Близость ориентировки региональных разломов Прибайкалья и Западного Забайкалья и их морфологокинематических типов на разных этапах развития может быть связана с подобными или даже едиными тектоническими событиями.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–05–00154).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тектонические разломы Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1978. 112 с.

2. Скляров Е.В., Мазукабзов А.М., Мельников А.И. Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. 182 с.

3. Гладков В.Г., Сизых В.И., Фомин И.Н., Фомина В.А. Формы проявления аркогенного надвига в южной части Заганского хребта (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 1967. № 5. С. 117–122.

4. Гладков В.Г., Сизых В.И., Фомин И.Н., Фомина В.А. Аркогенный надвиг в северной части Заганского хребта (Западное Забайкалье) // Геотектоника. 1967. № 2. С. 90–94.

5. Александров Г.В. Нижнемеловая сводово-глыбовая структура Забайкалья // Геология и геофизика. 1985. № 6 (306). С. 127–131.

6. Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 2. С. 445–467.

7. Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 1. С. 1–43.

8. Черемных А.В. Внутренняя структура разломных зон Приольхонья и эволюция напряженного состояния верхней коры Байкальского рифта // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1, № 3. С. 273–284.

9. Черемных А.В. Разломы Центрального Прибайкалья: результаты структурно-парагенетического анализа // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2015. Вып. 2. С. 59–72.

### PARAGENESES OF FRACTURES IN FAULT ZONES OF THE WESTERN TRANSBAIKALIA

#### A.V. Cheremnykh

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Repeated activation of regional faults of Transbaikalia affected the formation of fractures of different morphological and genetic types in the fault zones. In this connection, some researchers accept the normal fault-block structure formation in the region, and others find evidence of thrust tectonics. Transbaikalia is currently known for both the occurrences of metamorphic core complex, typical of extensional conditions, and arched thrusts that form during crustal compression activation. For obtaining statistically substantiated solution for kinematic types of largest (regional) faults in the Western Transbaikalia, necessary factual material was collected in their neighborhoods around which paragenetic analysis has been performed on fractures and rock fracturing. The fracturing and local faulting data have been collected from different rocks, including those formed in the Mesozoic and Cenozoic. The most pronounced setting in the studied fault zones is that related to the NW-SE tectonic extension field, wherein local normal faults and differently oriented strike-slip faults were formed. Compression settings account for 5 to 36% of the total number of local solutions in the corresponding fault zone. Local thrusts are reconstructed in pre-Mesozoic and Cenozoic rocks and have not been found in the Mesozoic sediments. Structural paragenetic analysis carried out for 54 sites, in which more than 5500 local faults and fractures were measured, correlates the environments of different ages in the studied fault zones, the main of which, according to the degree of expression, are extension, compression and right-lateral strike-slip. *Keywords:* Western Transbaikalia, regional fault, structural parageneses, normal fault, rank analysis

\*\*\*

УДК 551.24.035+551.4.044

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ РАСТЯЖЕНИЯ В РЕЛЬЕФЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.С. Черемных

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты проведенной серии физических экспериментов по моделированию зон растяжения, направленных на изучение формирующегося в них рельефа. Всего проведено более 20 экспериментов. Для каждого опыта проводилось построение цифровой модели рельефа экспериментальной поверхности, на основе которой рассчитывался средний градиент вертикальных движений. В результате комплексного анализа распределений рельефа и градиента выделены закономерности отражения внутренней структуры зон растяжения в рельефе. В частности, показано, что в зоне растяжения происходит формирование двух сбросовых разломных зон, одинаковых в структурном отно-

шении, но различных по интенсивности перемещений по разрывам. Сбросовые зоны в рельефе представлены уступами с чередованием участков крутого и более пологого подъема. В отдельно взятой сбросовой зоне наибольшее влияние на формирование рельефа оказывает ее магистральный сместитель. Несколько меньше в рельефе выделяются разрывы R типа, еще меньше – R<sup>7</sup> типа. Другие структурные элементы сбросовой зоны очень слабо проявлены в рельефе и/или не оказывают на его формирование никакого воздействия. В целом данный подход к решению поставленных задач зарекомендовал себя с положительной стороны при подобных исследованиях.

*Ключевые слова:* зона растяжения, сбросовая разломная зона, физическое моделирование, цифровая модель рельефа, градиент вертикальных движений

В соответствии с тектонофизическим подходом разломы проявляются в земной коре в виде широких зон, включающих различные типы структурных элементов, среди которых главную роль играют системы разрывов, парагенетически связанные с формированием магистрального сместителя [1]. Внутреннее строение зон характеризуется пространственно-временной неравномерностью, конкретным выражением которой является стадийное развитие разлома, а также наличие участков специфического структурного развития, называемых дуплексами, пулл-апартами и др. В зависимости от наличия или отсутствия этих специфичных форм, определяющихся механизмом и историей формирования разломной зоны, последняя будет характеризоваться существенно разным морфоструктурным выражением на местности, топокартах, аэро- и космоснимках.

Изучить рельефообразование в пределах природных разломных зон сложно, поскольку этот процесс, во-первых, происходит в течение длительного геологического времени и, во-вторых, осложнен влиянием экзогенных процессов. Применение полевых морфотектонических методов в пределах крупных разломных зон затруднено еще и в связи с невозможностью равноценного исследования значительных по площади природных территорий. Эффективным методом изучения деформаций земной коры в данном случае является физическое моделирование. Эксперимент позволяет за десятки минут первые часы проследить изменения на модели, которые происходили в земной коре в течение миллионов лет. В настоящее время физическое моделирование на упруго-пластичном материале (глинистая паста) выступает в качестве эффективного метода при исследованиях процесса разломообразования [2].

Целью работы было выявление закономерностей проявления внутренней структуры зоны растяжения в формирующемся в результате разломообразования рельефе. В ходе исследования решались следующие задачи: 1) провести эксперименты по моделированию зоны растяжения в упругопластичной среде, направленные на изучение рельефа; 2) построить для экспериментальных поверхностей цифровые модели рельефа и распределения градиента вертикальных движений; 3) на основе комплексного анализа полученных данных установить специфику отражения в рельефе внутренней структуры зоны растяжения.

Эксперименты проводились согласно общей методике моделирования крупных разломных зон в соответствии с теорией подобия [3]. В качестве модельного материала использовалась однородная глинистая паста, которая при деформировании в лаборатории проявляет упругопластичные свойства подобно литосфере в процессах крупномасштабного

разломообразования [1]. Все эксперименты проводились на специальной установке «Разлом», предназначеной для моделирования разнообразных тектонических структур, путем перемещения в различных направлениях ее отдельных частей - штампов. Модель состояла из одного слоя глинистой пасты и находилась в прямоугольных рамках, препятствующих растеканию глины. Внутренние поверхности у двух сторон деревянной рамки (параллельные направлению движения) обрабатывались смазкой, чтобы уменьшить трение о них глинистой пасты, которое увеличивает влияние краевых эффектов, негативно сказывающееся на формировании структуры зоны растяжения. С помощью двух подложек, расположенных друг на друге и закрепленных на штампах установки «Разлом» (подвижный и неподвижный), исключался эффект провисания центральной части модели при ее растяжении. Геометрические размеры деформируемого образца составляли 60×60 см при толщине 8.5 см; вязкость глинистой пасты – 6.17·10<sup>6</sup> Па·с; скорость деформирования – 0.5 мм/мин. Перемещение штампов установки «Разлом» происходило до момента, когда в структуре зоны растяжения на обоих флангах формировались единые магистральные сместители. Всего было проведено более двадцати экспериментов.

Измерения рельефа поверхности экспериментальной модели выполнялись по сети профилей, проведенных вкрест простирания разломной зоны. Сеть профилей охватывала практически всю экспериментальную модель по длине и ширине, за исключением краевых частей. Она состояла из 13 профилей по 50 пикетов каждый. Расстояние между профилями – 3 см, пикетами – 1 см. На каждом пикете измерялось значение высоты рельефа с точностью 1 мм при помощи лазерного дальномера, закрепленного на одной высоте относительно начальной поверхности экспериментальной модели. На основе измеренных высот был рассчитан средний градиент изменений углов наклона рельефа (градиент вертикальных движений) [4, 5] для каждого пикета по формуле:

$$grad| = \frac{h_A - h_B}{l_{AB}},$$

где  $h_{\rm A}$ - $h_{\rm B}$  – разность отметок высот двух соседних пикетов профиля;  $l_{\rm AB}$  – расстояние между ними, м.

Результатом обработки экспериментальных данных было построение цифровой модели рельефа зоны растяжения и рассчитанного на ее основе распределения градиента вертикальных движений.

В целом проведенные эксперименты показали высокую зависимость рельефа от пространственной неравномерности формирования внутренней структуры зоны растяжения. При деформировании экспериментальной модели происходит образование межблоковой зоны растяжения, отражающейся в рельефе двумя встречно направленными по падению уступами с впадиной между ними. В целом такая структура напоминает грабен. На уступах формируются сбросовые разломные зоны, подобные по внутреннему строению, но различные по амплитуде перемещений по разрывам. Каждая из двух сбросовых зон, сформированных в условиях растяжения, представлена в рельефе уступом. Примером природного аналога межблоковой зоны растяжения в эксперименте является Байкальский рифт. Плечи рифта – это серия крупных встречно направленных сбросовых зон, например таких, как Обручевская зона на северо-западе и Черско-Баргузинская на юго-востоке [6]. Характер распределения высотных отметок уступа склона ступенчатый, с чередованием участков крутого и пологого подъема. Большинство разрывов сбросовой зоны имеют вертикальную составляющую перемещений, причем их величина пропорциональна интенсивности подвижек. Эта закономерность делает эффективными исследования разломных зон путем расчета градиента вертикальных движений, поскольку он отражает зависимость величины вертикального приращения на единицу расстояния.

В распределении градиента вертикальных движений сбросовая разломная зона, образованная при растяжении экспериментальной модели, выделяется значениями параметра выше среднего уровня. Распределение неравномерно вкрест и по простиранию разломной зоны. Основные максимумы параметра соответствуют основанию уступа в рельефе разломной зоны. Неравномерность распределения градиента обусловлена различными элементами внутренней структуры разломной зоны. Максимальные значения градиента отражают магистральный сместитель, несколько меньшими значениями выделяются разрывы R и R<sup>/</sup> типов. Важно отметить, что влияние на распределение и величину градиента разрывов R типа существенно выше, чем разрывов R' типа, однако оно несравнимо с воздействием на параметр магистрального сместителя. Другие структурные элементы сбросовой зоны (исходя из обобщенного парагенезиса [1]) выражены слабо или не проявлены в рельефе и градиенте вертикальных движений.

В целом данный подход с использованием физического моделирования дизъюнктивных зон и последующим комплексным анализом цифровых моделей рельефа и распределений градиента вертикальных движений для экспериментальных поверхностей показал свою высокую эффективность при подобных исследованиях.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16–35–00141, 16–05–00154, 16–35–00349).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 244 с.

2. Борняков С.А. Физическое моделирование процессов разломообразования в литосфере на современном этапе: обзор // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы докладов Всероссийской конференции (г. Москва, 8–12 октября 2012 г.). В 2-х т. Отв. ред. А.О. Глико, Ю.Г. Леонов. М.: ИФЗ, 2012. Т. 1. С. 50–53.

3. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. 112 с.

4. Гзовский М.В. Математика в геотектонике. М.: Недра, 1971. 240 с.

5. Леви К.Г. Применение количественных методов в геоморфологии. Методическое пособие. Иркутск: Изд-во Ирк. госуниверситета, 1995. 52 с.

6. Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., Поспеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потапов В.В., Зарипов Р.М., Черемных А.С.. Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных // Геодинамика и тектонофизика. 2013. Т. 4 (3). С. 203–278.

#### TRENDS IN MANFESTATION OF STRUCTURAL ELEMENTS OF EXTENSIONAL ZONE: ANALOGUE MODELLING RESULTS

#### A.S. Cheremnykh

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The article presents the results of the series of physical experiments with modeling extension zones aimed at studying relief forming therein. In total more than 20 experiments have been carried out. All experiments involved generation of digital elevation model for experimental surface around which average vertical motion gradients have been calculated. Comprehensive analysis of relief and gradient distributions has revealed trends about reflection of internal structure of extensional zones in relief. It has been particularly shown that the extensional zones are characterized by the formation of two normal fault zones, similar in structure but different in intensity of movements along the faults. Normal fault zones are characterized by steep scarps alternated with flat terraces. Relief formation in the individual normal fault zone is mainly influenced by its major fault plane. R-type fractures are somewhat less pronounced, and R<sup>/</sup>-type fractures are even less distinct. Generally, this approach for problem solving has shown itself to be rather effective for these studies.

Keywords: extensional zone, normal fault zone, analogue modeling, digital elevation model, gradient of vertical motion

\*\*\*

УДК 550.344.56

# ОБРАЗЫ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТЕЛ В ВОЛНОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Е.Н. Черных<sup>1</sup>, С.А. Борняков<sup>1</sup>, А.А. Добрынина<sup>1, 2</sup>, А.Н. Шагун<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

*Аннотация.* В районах Байтахской и Файнштейновской аномалий проведены площадные измерения микросейсмического шума. На основе метода микросейсмического зондирования оценены глубинные разрезы среды в районах аномалий. Дана геологическая интепретация полученных результатов.

Ключевые слова: микросейсмическое зондирование, кимберлитовое тело, микросейсмы, волна Рэлея

Микросейсмические волны (микросейсмы, сейсмические шумы) наблюдаются на поверхности Земли в каждой ее точке, вовлекая в колебания как верхние, так и более глубокие части земной коры. По происхождению сейсмический шум Земли можно разделить на эндогенный и экзогенный. Экзогенный связан с внешними источниками: волнением воды, ветром, деятельностью человека. Эндогенный шум обусловлен внутренними источниками, процессами трещинообразования в объеме геосреды, смещением блоков горных пород, перестройкой структур за счет тектонических сил и деформирующих воздействий различной природы.

Микросейсмическое поле двойственно по природе. С одной стороны, оно представлено интерференцией сейсмических волн различных типов, распространяющихся в виде отдельных цугов конечной длительности, механизмы распространения которых хорошо изучены. С другой стороны, заранее неизвестны ни пропорции содержания каждого типа волн, ни амплитуды, ни начальные фазы, ни длительность этих цугов, что делает микросейсмическое колебание в отдельной точке случайным процессом. Двойственность микросейсмического поля является причиной разделения подходов к использованию микросейсм в качестве зондирующего сигнала на две основные группы. Первая группа базируется на детерминированных свойствах микросейсмических волн, вторая - на их статистических параметрах. К этой группе можно отнести способы зондирования, когда используются малоапертурные антенны, содержащие в конфигурации небольшое количество сейсмодатчиков. Как правило, цель измерений состоит в получении экспериментальных дисперсионных зависимостей между скоростями микросейсмических волн и соответствующими частотами в спектре. При этом обычно микросейсмические измерения объединяются с результатами независимых геофизических методов и дополняются контрольными точками прямых измерений в скважинах [1].

Ко второй группе относятся способы, базирующиеся на корреляции тех или иных устойчивых статистических характеристик случайного микросейсмического поля с геологическими неоднородностями в пространстве, и условно эту группу способов можно назвать «статистической». Такими характеристиками могут быть, например, частота и амплитуда пиков в микросейсмических спектрах в предположении их связи с пространственными параметрами залегания геологических слоев.

Основой интерпретации в первой группе способов являются экспериментальные дисперсионные кривые, полученные по микросейсмическому полю, и поэтому можно условно назвать эти подходы «дисперсионными». Они обеспечивают достаточно объективные результаты, поскольку базируются на прямом измерении скоростных свойств пород в изучаемом объеме и не предполагают каких-либо допущений apriori относительно типа распространяющейся волны, ее источника и т.п. Сами значения скоростей, получаемые в измерениях, и наличие в них заметной дисперсии являются основой для заключения о составе микросейсмического поля. Недостатки «дисперсионного» подхода аналогичны недостаткам классической сейсморазведки и сводятся к трудности идентификации скоростной неоднородности без достаточного пробега волны в ней. У «дисперсионной» группы методов имеется также технологический недостаток, связанный с трудоемкостью реализации.

Вторая группа способов менее объективна, чем первая, что связано с необходимостью принятия при интерпретации ряда допущений относительно природы источников микросейсм и их спектральных свойств, преобладающего типа волн в микросейсмическом сигнале и пр. Как правило, эти допущения основаны на предварительном экспериментальном изучении и на модельных расчетах, и всегда остается неоднозначность в интерпретации измерений, приводящая к ненадежности результатов.

Продвижение исследований в этой группе связано с поиском различных методических приемов, снижающих влияние нестабильности глобальных и локальных микросейсмических источников. Здесь, в свою очередь, выделяется два направления. Вопервых, это определение и анализ спектральных отношений между опорной и изучаемой площадкой и, во-вторых, изучение пространственных характеристик спектральных соотношений горизонтальной и вертикальной компонент сигнала. На этом, например, основан широко распространенный в мире метод Накамуры [2].

Способы «статистической» группы в подавляющем числе случаев нацелены на то, чтобы обойти технологические сложности и сравнительно высокую стоимость измерений, характерную для «дисперсионной» группы но, тем не менее, получить информацию о пространственном распределении скоростных параметров среды.

Аппаратура и методика проведения работ. Для проведения измерений применялся комплект аппаратуры, состоящий из пяти регистраторов «Байкал-7HR» и сейсмометров СМЕ-4211. Мобильный регистратор сейсмических сигналов высокого разрешения «Байкал-7HR» представляет собой автономную сейсмическую станцию для записи сигналов от внешних сейсмических или иных датчиков в широком диапазоне частот с высокой точностью и привязкой к абсолютному времени. В комплекте с регистраторами Байкал-7HR применялись сейсмометры СМЕ-4211. Трехкомпонентный широкополосный молекулярно-электронный сейсмометр модели СМЕ-4211 предназначен для регистрации колебаний земной поверхности в трех ортогональных направлениях. Прибор может одинаково применяться как на стационарных сейсмических станциях, так и для временных установок при полевых исследованиях. Сейсмометр СМЕ-4211 имеет аналоговый выход (напряжение выходного сигнала пропорционально скорости внешнего воздействия) и при эксплуатации требует подключения к аналого-цифровым регистраторам.

Сейсмометр состоит из трех высокочувствительных молекулярно-электронных датчиковпреобразователей (один вертикальный и два горизонтальных), оси чувствительности которых ориентированы по трем ортогональным осям, и электронной платы, закрепленных на общем основании и помещенных в защитный внешний корпус. Измерительные каналы станции «Байкал-7HR+CME-4211» позволяют регистрировать скорости смещения почвы в полосе частот 0.33–50 Гц и в диапазоне амплитуд от ~0.002 мкм/с до 1.250 мм/с.

Перед началом работ проводилась проверка измерительных каналов на «идентичность» путем выполнения контрольной записи при установке станций в одном месте. Степень идентичности оценивалась по спектральным отношениям согласно:  $U=S_X \cdot S_Y / 2S_Z$ , где  $S_X$ ,  $S_Y$ ,  $S_Z$  – спектры по компонентам X, Y, Z.

На рисунке 1 приведены графики спектральных отношений на площадках Байтахской и Файнштейновской аномалий, а в таблице – данные по амплитудно-частотному составу микросейсм.

Как следует из таблицы, в зависимости от частотного диапазона и регистрируемой компоненты диапазон амплитуд скорости смещений составляет 0.024–0.250 мкм/с, что входит в диапазон измерительных каналов станции «Байкал-7HR».

Δ ΜΠΠΙΙΤΥΠΙΟ-ΠΩΟΤΟΤΙΙΙΙ	COCTAR	MUCHOCEUCM
	COULAD	MINDOCCHUM

Плошалка	Полоса час-	$V_{\rm X}$ ,	V <sub>Y</sub> ,	$V_{\rm Z}$ ,	
площадка	тот, Гц	мкм/с	мкм/с	мкм/с	
	0.1-5.0	0.107	0.111	0.109	
Байтахская	5-10	0.042	0.049	0.031	
	10-15	0.033	0.034	0.024	
Файнштей-	0.1-5.0	0.142	0.141	0.255	
новская	5-10	0.053	0.059	0.080	
	10-15	0.039	0.036	0.027	

В ходе полевых работ замеры микросейсмических колебаний проводились вдоль параллельных профилей, расположенных в северо-восточном простирании (рис. 2). Профили пересекали исследуемые площадки в субмеридиональном направлении, с шагом между пунктами замеров 50–100 м. Дистанция между профилями – 100–200 м, длина профилей составляла от 500 до 800 м. При проведении измерений одна из станций использовалась как опорная и оставалась на месте, время регистрации микросейсмических колебаний передвижными станциями составляло от 2 до 7 час.

Методика обработки и выделения полезной информации. Метод ММЗ относится к группе «статистических», и, следовательно, результаты наблюдений и обработки носят вероятностный характер. Основными затруднениями, которые возникают при применении данного метода, являются случайный состав микросейсмического поля и его временные вариации. Данные особенности преодолеваются, если исходить из того, что микросейсмы в основном состоят из поверхностных волн. При рассеянии волн Рэлея скоростными неоднородностями непосредственно вблизи этих неоднородностей понятие скорости теряет смысл, поскольку образующиеся (обменные, отраженные и пр.) волны при этом не разделены в пространстве по своим типам, а понятие скорости волны «усредненного» типа вряд ли можно считать корректным. В данной ситуации амплитуды остаются единственным измеряемым параметром, по которому можно оценивать взаимные свойства неоднородностей и среды [3].



Рис. 1. Проверка идентичности измерительных каналов: а – Байтайхская, б – Файнштейновская площадка.



Рис. 2. Расположение профилей, пунктов замеров микросейсмических колебаний на площадках: 1 – Байтахская, 2 – Файнштейновская.

В этой связи развиваемый в настоящее время метод микросейсмического зондирования применим к ситуации анализа волнового поля волн Рэлея вблизи рассеивающих неоднородностей, размер которых сравним или меньше длины волны. Метод опирается на использование естественного микросейсмического поля, вертикальная компонента которого преимущественно определяется суперпозицией цугов поверхностных волн Рэлея и для чего имеется простой прием инверсии измеряемого амплитудного микросейсмического поля в глубинный разрез среды, основанный на общих физических представлениях и проверенный в ряде тестовых полевых экспериментов.

Источниками поверхностных волн в низкочастотном диапазоне являются акватории морей и океанов, их влияние ощущается на удалении сотен километров [4]. Сама спецификация метода позволяет говорить о его применимости для выделения трубок взрыва, так как метод нацелен на выделение субвертикальных неоднородностей в силу того, что волны Рэлея распространяются параллельно поверхности. Приемами минимизации искажающего влияния являются накопление сигнала и отбраковка записей по спектральным характеристикам и волновым формам. В результате при правильной организации полевых работ и качественной отбраковке данных для анализа используются записи, представленные преимущественно волнами Релея. При этом влияние искажающих факторов (зашумленность записи микросейсмических колебаний волнами нерэлеевской природы) полностью не исключается. Как следствие, дополнительные приемы выделения полезной информации могут оказаться весьма полезными. К таким приемам относится обработка спектров, полученных в результате суммирования. Для проверки эффективности и выбора наиболее оптимального приема повышения информативности спектров, полученных в результате суммирования, рассматриваются профили в вариантах: с применением процедуры огибания спектров; с применением процедуры усреднения спектров и без применения дополнительных процедур. Процедура огибания спектров сводится к оценке пикового значения спектральных амплитуд в определенном окне частот с последующим соединением найденных пиковых значений. Процедура усреднения спектров подразумевает последовательный расчет среднего значения по определенному количеству смежных значений с последующим смещением на половину рассматриваемого окна. Как следствие, от использования процедуры огибания справедливо ожидать вычленения узкополосных пиков из общего набора значений. Использование процедуры усреднения позволяет выделить наиболее вероятное значение из набора соседних спектральных амплитуд. В результате предварительной подготовки, получаем набор амплитудных характеристик по всем точкам профиля (рис. 3), по которым далее выполняется построение разреза с помощью графических редакторов или специализированных программ. В данной работе использовалась программа GEOPSY [5], с помощью которой выполнялось построение разрезов.

Результаты по методу ММЗ. Для поиска изучения структуры кимберлитовых тел применяется ряд геофизических методов. При этом было установлено, что, хотя на сегодняшний день трубки взрыва достаточно хорошо изучены широко применяемыми геофизическими методами, такими как магнито- и электроразведка, они не всегда могут быть однозначно выделены. Факторами, препятствующими поиску кимберлитовых трубок взрыва, являются: эрозия наиболее намагниченной кратерной части трубок, слабая намагниченность наиболее продуктивных пород, возможные малые размеры трубок, наличие объектов «помех», вероятность пропуска слабых магнитных аномалий, даже при высокоточной магниторазведке, практическое отсутствие определенных параметров, свойственных именно трубкам взрыва.



Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики: а – Байтахская ПР-1, б – Файнштейновская ПР-2.

Существует еще и проблема, обусловленная выбором методики изучения земной коры. Эффективность традиционных методов зондирования земной коры во многом зависит от правильности выбора методики из существующего разнообразия геофизических методов изучения строения Земли. Подбор методики в каждом конкретном случае требует получения ряда априорных сведений об исследуемом объекте и вмещающей среде. Так, при изучении объектов со сложным строением (большие наклоны и несогласия отражающих границ) целесообразнее применять метод регулируемого направленного приема. При изучении криволинейных границ метод отраженных волн (MOB) позволяет получить более детальные данные, по сравнению с методом преломленных волн (МПВ); в свою очередь, горизонтально-слоистые среды благоприятны для применения МПВ. Комплексирование МПВ с другими геофизическими методами (МОВ, акустический каротаж, вертикальное сейсмическое профилирование) позволяет повышать точность интерпретации данных. Для изучения вертикально падающих границ с резкой дифференциацией скоростей применяется метод проходящих волн (МПП). Немаловажно и то, что в МПП приемник и источник должны располагаться по разные стороны от изучаемой границы.



Рис. 4. Обобщенный разрез Байтахской аномалии.

Приведенные факты говорят о том, что для корректного выбора традиционных, зарекомендовавших себя методов изучения геологической среды желательно применение простых в реализации методов, позволяющих получать требуемую априорную информацию об изучаемом объекте. Одним из таких методов является метод микросейсмического зондирования. Опираясь на результаты приведенных работ, выполним интерпретацию разреза по Байтахской аномалии (рис. 4, 5).

На рис. 5 можно выделить корневую, диатремовую, переходную и кратерную зоны. Мощность дайки варьируется в пределах 100–120 м. Дайка прослеживается до глубины ~1500 м. Можно отметить раздувы дайки в интервале глубин 300–800 м. Подобные раздувы характерны для даек корневых зон кимберлитовых тел.



Рис. 5. Интерпретация разреза Байтахской аномалии.

По Файнштейновской аномалии выполнить однозначную интерпретацию не представляется возможным. По-видимому, неоднородность здесь имеет слабую рассеивающую способность. Также вероятной причиной слабой контрастности могли стать помехи, связанные с метеоусловиями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66–84.

2. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // QR Railw. Tech. Res. Inst. 1989. V. 30. P. 25–33.

3. Горбатиков А.В., Ларин И.В., Моисеев Е.И., Беляшов А.В. Применение метода микросейсмического зондирования для изучения строения погребенной трубки взрыва // Доклады Академии наук. 2009. Т. 428, № 4. С. 526–530.

4. Табулевич В.Н. Комплексные исследования микросейсмических колебаний. Новосибирск: Наука. 1986. 151 с.

5. Geophysical signal database for noise array processing // Copyright 2002-2011 by Marc Wathelet.

### SEISMIC WAVEFIELD IMAGING OF KIMBERLITE BODIES

E.N. Chernykh<sup>1</sup>, S.A. Bornyakov<sup>1</sup>, A.A. Dobrynina<sup>1, 2</sup>, A.N. Shagun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Geological Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

*Abstract.* The areal measurements have been made of microseismic noise near the Baitakh and Fainshtein anomalies. Based on the method of microseismic sounding, estimates have been made of the deep sections located near the anomalies. The geological interpretation gas been given to the results obtained.

Keywords: microseismic sounding, kimberlite bodies, microseismic noise, Rayleigh wave

\*\*\*

# РАЗДЕЛ ІІІ

# СОВРЕМЕННАЯ И ПАЛЕОСЕЙСМИЧНОСТЬ КАК ОТРАЖЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ

УДК 550.34

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ИНТЕРНЕТ-РЕСУРС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В АКТИВНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ

### Л.П. Брагинская, А.П. Григорюк, В.В. Ковалевский

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены принципы организации интернет-ресурса для комплексных исследований в области активной сейсмологии. Интернет-ресурс представляет собой симбиоз научной информационной системы (НИС) по активной сейсмологии и портала знаний, созданных в ИВМиМГ СО РАН. НИС содержит большие объемы экспериментальных данных и сервисы для их обработки, базу теоретических сейсмограмм, базу снимков волновых полей, полученных в результате численного моделирования, тематическую библиотеку публикаций. Портал систематизирует информацию по активной сейсмологии и предоставляет содержательный доступ к ней. В качестве концептуальной основы и информационной модели портала знаний была использована разработанная авторами онтология предметной области «Активная сейсмология».

Ключевые слова: активная сейсмология, научная информационная система, онтология, портал знаний

Глубинное сейсмическое зондирование земной коры и верхней мантии, выросшее на базе сейсморазведки, связано с именем академика Г.А. Гамбурцева, который ввел в сейсмологию корреляционные принципы выделения и прослеживания отраженных и преломленных волн. С 60-х годов прошлого века в нефтяной сейсморазведке начинают применять метод непрерывного излучения от механических вибраторов. В 80-е годы совместными усилиями нескольких институтов СО РАН СССР были созданы мощные сейсмические вибраторы. При использовании накопительных систем регистрации они создают наблюдаемый волновой эффект, эквивалентный среднему землетрясению. Появление столь мощных источников сейсмических сигналов является не просто фактом развития технических средств, оно определило создание нового научного направления в геофизике – активной сейсмологии [1].

Инновационные технологии активной сейсмологии направлены на детальное изучение сейсмогенерирующих сред и контроль инженерных объектов. Последние три десятилетия работы по активной сейсмологии проводятся в России, Японии, Китае, США, европейских странах. К наиболее масштабным экспериментам по глубинному сейсмическому зондированию последних лет можно отнести работы, проводимые ИВМиМГ и ГИН СО РАН на 500километровом профиле Бабушкин, Байкал – Улан-Батор, Монголия с применением 100-тонного вибратора Южнобайкалького полигона [2] и Геофизической службой СО РАН на территории Восточной Сибири, на Дальнем Востоке и в Восточной Арктике с применением передвижных мощных вибраторов.

Интенсивное накопление информации по всем составляющим методов активной сейсмологии связано с тем, что современные высокоточные научные инструменты, применяемые при проведении натурных экспериментов, порождают все большие объемы данных. Также приходится работать с большими объемами синтетических данных, полученными при численном моделировании волновых процессов в сложнопостроенной среде. Проблема доступа к данным и знаниям в активной сейсмологии состоит в том, что при больших объемах экспериментальных данных и результатов исследований в сети Интернет, контент не структурирован, представлен различными форматами, информация размещена на различных сайтах научных организаций и подразделений, в материалах конференций, в электронных библиотеках и т.д.

В данной работе предлагается решение задачи интеграции данных и знаний в области активной сейсмологии путем создания интернет-ресурса, содержащего научную информационную систему (НИС) по активной сейсмологии и портал знаний для систематизации знаний и предоставления доступа к содержимому НИС.

Научная среда по активной сейсмологии образуется в результате симбиоза двух интернет-систем и имеет две точки входа.

Научная информационная система (НИС) [3] «Активная сейсмология» (http://opg.sscc.ru) организована для поддержки теоретических и экспериментальных исследований в рассматриваемой предметной области. Основными компонентами НИС являются информационно-вычислительные модули:

«Вибросейсмическое зондирование Земли», обеспечивающий пользователей многопараметрическим поисковым, вычислительно-аналитическим и ГИС сервисами для работы в режиме on-line с данными полевых экспериментов по вибросейсмическому мониторингу.

«Теоретические сейсмограммы», предоставляющий доступ к результатам численного моделирования сейсмических сигналов и обеспечивающий визуализацию синтетических сейсмограмм.

«Волновые поля», предоставляющий доступ к снимкам волнового поля, полученным в результате численного моделирования параметров волновых полей.



Рис 1. Страницы портала.



Рис. 2. Страницы НИС «Активная сейсмология».

Пополняемая пользователями НИС база данных научных работ – электронная библиотека, содержащая тезисы и тексты статей.

Портал знаний по активной сейсмологии (http://opg.sscc.ru/portal/) предназначен для систематизации как данной предметной области в целом, так и разнородных данных и средств их обработки, представленных в НИС.

Концептуальным базисом информационной модели портала знаний является разработанная авторами данной статьи онтология [4]. Онтология портала вводит формальные описания понятий предметной области в виде классов объектов и отношений между ними, тем самым задавая структуры для представления реальных объектов и их связей. В соответствии с этим данные на портале представлены в виде семантической сети, т.е. как множество разнотипных взаимосвязанных информационных объектов. Содержательный доступ к систематизированным знаниям и информационным ресурсам обеспечивается с помощью предоставляемых порталом развитых средств навигации и поиска, функционирование которых также базируется на онтологии.

На рис. 1 представлены страницы портала, иллюстрирующие связь объекта «в.Эльбрус», относящегося к классу «Объект исследования», с публикациями и объектом «Эксперимент Эльбрус-2010», относящимися к классу «Деятельность», связанному отношениями «имеет автора Персону, имеет автора Организацию», «использует Метод» с персонами, организациями, описанием методов исследования. Связь объекта «Эксперимент Эльбрус-2010» с базой данных экспериментов (БД) и информационновычислительной системой «Вибрационное просвечивание Земли», входящими в состав НИС «Активная сейсмология», осуществляется отношением «имеет Результат-Ресурс».

На рис. 2 представлены описание эксперимента «Эльбрус-2010», карта эксперимента, отображение зарегистрированных сейсмических событий и результатов их анализа в НИС «Активная сейсмология».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / Отв.ред. Г.М. Цибульчик. Новосибирск: Филиал «Гео» Издательства СО РАН, 2004. 382 с.

2. Ковалевский В.В., Тубанов Ц.А., Фатьянов А.Г., Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Базаров А.Д. Вибросейсмические исследования на 500-км профиле Бабушкин, Байкал–Улан-Батор, Монголия // Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: Сб. материалов. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. Т. 2. С. 186–190.

3. 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. Вып. 25. С. 94–98.

4. Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Загорулько Г.Б. Организация портала знаний «Активная сейсмология» // Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: Сб. материалов. Новосибирск: СГУГиТ, 2016. Т. 2. С. 19–24.

### INTELLIGENCE ONLINE RESOURCE FOR WAVE FIELD RESEARCH IN ACTIVE SEISMOLOGY

#### L.P. Braginskaya, A.P. Grigoryuk, V.V. Kovalevsky

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

*Abstract.* The paper discusses the principles of using the Internet as a source for comprehensive research of active seismology. The Internet resource is a symbiosis of Scientific Information System (SIS) on active seismology and knowledge portal created in ICM & MG SB RAS. SIS contains large amounts of experimental data and data processing services, theoretical seismogram database, numerically modeled wave-field image database, and thematic library. The portal presents substantive information on active seismology in an organized way and provides access to it. The authors' domain ontology on active seismology has been used as a conceptual framework and information model for the knowledge portal.

Keywords: active seismology, ontology, scientific information system, knowledge portal

\*\*\*

УДК 550.34

### ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ РАССТОЯНИЯ ДО БЛИЖАЙШИХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИХ ПРОГНОЗ

### В.И. Герман

Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья, Красноярск, Россия

Аннотация. Проведен анализ удаления в пространстве и времени сильных землетрясений от ранее зарегистрированных слабых событий. Для совместной функции распределения удаления сильных событий в пространстве и во времени получено простое аналитическое выражение. Оно использовано для построения формализованной оценки опасности возникновения сильных землетрясений вблизи ранее зарегистрированных слабых сейсмических событий. *Ключевые слова:* пространственно-временная метрика, прогноз землетрясений

Известно, что сильные землетрясения готовятся слабыми событиями. Наиболее естественно связать слабые события с сильными землетрясениями, произошедшими на минимальных пространственных и временных расстояниях. Оценка совместного пространственно-временного распределения минимальных расстояний до последующих сильных землетрясений позволяет прогнозировать их.

При этом ближайшим землетрясением за временной промежуток  $\Delta t$  является то, которое удалено на наименьшее расстояние от рассматриваемого землетрясения, в то же время ближайшим землетрясением в радиусе *r* является то событие, которое наименее удалено во времени. При изменении  $\Delta t$  и *r* можно найти набор событий, которые являются ближайшими к рассматриваемому землетрясению (рис. 1).

Будем обозначать землетрясение, имеющее магнитуду больше или равную M, координаты эпицентра (x, y), произошедшее в момент времени t, как E=E(M, x, y, t). Зафиксируем некоторое землетрясение  $E_i=E_i(M_i, x_i, y_i, t_i)$ . Далее рассмотрим другое зем-

летрясение  $E_j = E_j (M_j, x_j, y_j, t_j)$ , произошедшее позднее  $(t_i > t_i)$ .

Пусть  $\Delta t_{ij}=t_j-t_i$  – временной промежуток, разделяющий землетрясения  $E_i$  и  $E_j$ , а  $r_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_i - y_j)^2}$  – расстояние между их эпицентрами.

Важным понятием в дальнейшем исследовании будет понятие «запретной зоны» для возникновения землетрясений с магнитудой M и выше. Запретной зоной землетрясения  $E_i$  будем называть область, ограниченную кривой  $\Delta t=g(r)$ , такой, что если  $r < r_{ij}$ , то  $\Delta t < \Delta t_{ij}$  (рис. 1). Данная кривая, задающая запретную зону, определяет пространственное и временное расстояние до ближайших землетрясений, значения  $\Delta t_{ij}$  и  $r_{ij}$  которых лежат на кривой  $\Delta t=g(r)$  (рис. 1). Определение наличия связей между землетрясения совместного распределения величин  $\Delta t_{ij}$  и  $r_{ij}$ , найденных для ближайших землетрясений. Интервалы магнитуд  $M_i$  и  $M_j$  в данном исследовании фиксированы.



Рис. 1. Схема к определению ближайших землетрясений и выделению «запретной зоны» возникновения землетрясений (области влияния слабого события, которое расположено в начале координат); точки соответствуют сильным землетрясениям *E<sub>i</sub>*.

Исследование было проведено для случая, когда землетрясения  $E_i$  соответствуют слабой сейсмичности, а землетрясения  $E_j$  – сильной. Далее будет предполагаться, что землетрясения  $E_i$  имеют магнитуду в диапазоне ( $M_{tr}$ ,  $M_s$ ), а землетрясения  $E_j$ – магнитуду  $M_j \ge M_s$ , где  $M_{tr}$  – минимальная представительная магнитуда (землетрясения с меньшей магнитудой регистрируются с пропусками), а величина  $M_s$  определяет минимальную магнитуду относительно сильного землетрясения.

Для изучения совместного распределения величин  $\Delta t_{ii}$  и  $r_{ii}$ , найденных для ближайших сильных землетрясений Е<sub>i</sub> относительно всех рассматриваемых землетрясений Е<sub>i</sub>, использовалась соответствующая им эмпирическая функция распределения  $F(r, \Delta t | M_i \ge M_s)$ . Она формируется «запретными зонами» слабых событий (рис. 1) и равна вероятности того, что в области радиусом r вокруг слабого события  $E_i$  за промежуток времени  $\Delta t$  после его возникновения (( $r, \Delta t$ ) окрестность) произойдет относительно сильное землетрясения Е<sub>i</sub>. Таким образом, функция  $F(r, \Delta t | M_j \ge M_s)$  определяет связь события Е<sub>i</sub> с последующими землетрясениями Е<sub>i</sub>, попавшими в его  $(r, \Delta t)$  окрестность. В результате  $(r, \Delta t)$  окрестности с постоянным значением функции F $(r, \Delta t | M_i \ge M_s)$  можно рассматривать как область влияния слабого события Е<sub>i</sub>.

При анализе эмпирических функций распределения  $\widehat{F}(r, \Delta t | M_j \ge M_s)$  нужно учитывать неизбежное цензурирование данных как по времени, так и по расстоянию. Оно связано с тем, что в силу пространственно-временных рамок каталога возможен пропуск значений  $r_{ij}$ ,  $\Delta t_{ij}$ , соответствующих относительно сильным землетрясениям  $E_j$ , расположенным на большом пространственном удалении от  $E_i$  или произошедшим значительно позднее  $E_i$ . Тем не менее данный эффект не является определяющим в силу быстрого затухания соответствующей функции плотности вероятности  $f(r, \Delta t | M_i \ge M_s)$ .

Для изучения пространственно-временных связей между сейсмическими событиями был выбран участок Алтае-Саянской складчатой области. Был использован каталог землетрясений АСФ ГС СО РАН. Афтершоки были удалены согласно методике Молчана-Дмитриевой, с помощью программы, любезно предоставленной В.Б. Смирновым (ИФЗ РАН).

Для построения эмпирической функции распределения  $\widehat{F}(r, \Delta t | M_j \ge M_s)$  брались землетрясения  $E_i$ , попавшие в область с координатами 89.0...98 °в. д. и 50.5...57.0 °с. ш. (рис. 2) за период с 1963 по 1983 г. Использовались данные с магнитудой  $M_i \ge 2.5$ ( $M_{tr}=2.5$ ), этот уровень приблизительно соответствует представительности землетрясений, зарегистрированных за рассматриваемый период. В результате в анализе участвовало 600 слабых событий. В качестве относительно сильных землетрясений  $E_j$  были отобраны события с магнитудой  $M_j \ge 3.5$  ( $M_s = 3.5$ ). Более слабые события не имеют практического социально-экономического значения.



Рис. 2. Линии уровня эмпирических функций распределения  $\hat{F}(r, \Delta t | M_j \ge M_s)$  и их аппроксимация функцией распределения  $F(r, \Delta t)$  (серые пунктирные линии); область, где отсутствует цензурирование, выделена пунктирной линией.

Для уменьшения влияния цензурирования данных относительно сильные землетрясения  $E_i$  выбирались из области, границы которой шире границ области для землетрясений  $E_i$  не менее чем на 200 км, дополнительно временной промежуток для отбора был продлен на 6000 сут ( $\approx 16.5$  лет).

Результаты построения функции распределения  $\widehat{F}(r, \Delta t|M_j \ge M_s)$  для рассматриваемой области приведены на рис. 2. Полученная функция распределения хорошо аппроксимируется функцией  $F(r, \Delta t)=1-\exp(-\alpha(r^p\Delta t)^k)$ , где  $p=1.60, k=0.75, a \alpha=6\cdot10^{-6}$  (рис. 2). Наибольшие отклонения  $F(r, \Delta t)$  от эмпирической функции распределения имеются, как и ожидалось, в области, где возможно цензурирование. Некоторое расхождение в области малых значений  $F(r, \Delta t)$  может быть объяснено малым количеством данных в этой области. Вид аппроксимирующей функции  $F(r, \Delta t)$  хорошо согласуется с результатами, ранее полученными автором [1, 2] при изучении распределений временных интервалов и минимальных расстояний между сейсмическими событиями.

Используя разложение экспоненты в  $F(r, \Delta t)$  в ряд Тейлора с учетом малости величины  $\alpha (r^{p}\Delta t)^{k}$ , можно получить простое выражение для функции

плотности, определяющей силу связи событий  $E_i$  и  $E_i$ :

$$f(r, \Delta t | M_j \ge M_s) \approx \alpha k^2 p / (2\pi),$$
  
$$r^{pk-2} \Delta t^{k-1} \approx 8.6 \cdot 10^{-8} r^{-0.80} \Delta t^{-0.25}.$$

Как и ожидалось, наблюдается монотонное уменьшение силы связи с увеличением r и  $\Delta t$ .

В связи с тем, что в высокоактивных областях среднее пространственное расстояние и временной интервал между соседними событиями в среднем меньше, чем на слабоактивных участках, вид эмпирической функции распределения  $\widehat{F}(r, \Delta t | M_j \ge M_s)$  на различных пространственных участках может меняться. Тем не менее, согласно единой теории подобия структуры сейсмичности [2, 3], можно ожидать, что сам тип распределения останется постоянным и изменению будет подвержен только масштабный параметр  $\alpha$ , который будет зависеть от уровня сейсмической активности  $A_{10}=A_{10}(x, y)$ .

Нахождение зависимости масштабного параметра  $\alpha$  от уровня сейсмической активности  $A_{10}$  велось путем построения функций распределения  $\widehat{F}$  $(r, \Delta t | M_j \ge M_s)$  для слабых событий  $E_i$ , попавших в области с уровнем активности  $A_{10}$ , принадлежащим разным интервалам, содержащим достаточное число

данных для построения распределения  $\widehat{F}$ (r,  $\Delta t | M_j \ge M_s$ ). Для каждого такого распределения находилось такое значение  $\alpha$ , что функция  $F(r, \Delta t) =$  $=1-\exp(-\alpha (r^{1.60}\Delta t)^{0.75})$  наилучшим образом приближала эмпирическую функцию распределения  $\widehat{F}$ (r,  $\Delta t | M_j \ge M_s$ ). В результате было установлено, что  $\alpha = 10^{-5} h(A_{10}) \approx 10^{-5} (35A_{10}+0.07)$ .

Полученное выражение для параметра масштаба α можно использовать для масштабирования функции распределения

 $\widehat{F}$  ( $r, \Delta t | M_j \ge M_s$ ), одним из вариантов является использование вместо величины r ее масштабированной версии  $\widetilde{r} = r[h(A_{10})]^{1/(pk)} = r h^{0.83}$ . В результате получаемая эмпирическая функция распределения  $\widehat{F}$  ( $\widetilde{r}, \Delta t | M_j \ge M_s$ ), в случае верности выражения для  $h(A_{10})$ , должна не зависеть от параметра  $\alpha$ , а значит, и от активности  $A_{10}$ . Зависимость r и  $\Delta t$  от активности  $A_{10}$  будет учитываться в новой переменной  $\tilde{r}$ .

Построение эмпирических функций распределения  $\widehat{F}(\widetilde{r}, \Delta t | M_j \ge M_s)$  для участка с самой высокой сейсмической активностью, а также для обширной малоактивной области показало, что они хорошо аппроксимируются функцией распределения  $F(\widetilde{r}, \Delta t)$  равной 1–ехр(–10<sup>-5</sup>( $\widetilde{r}$  <sup>1.60</sup> $\Delta t$ )<sup>0.75</sup>).

Функция  $F(\tilde{r}, \Delta t)$  определяет вероятность того, что в течение времени  $\Delta t$  после возникновения слабого землетрясения  $E_i$  на расстоянии  $r = \tilde{r} / \alpha^{1/(pk)}$  от него не произойдет сильного сейсмического события  $E_j$ . В результате достаточно просто может быть определена функция плотности вероятности возникновения по крайней мере одного относительно сильного землетрясения  $E_j$  на расстоянии rот слабого землетрясения  $E_i$  в промежуток времени  $(t_1, t_2)$ , после возникновения события  $E_i$ . Соответственно

$$\begin{split} f(\mathbf{r}, t_1, t_2, x_i, y_i, t_i) &= \\ &= \left(\frac{1}{2\pi r} \frac{\partial (F(\widetilde{\mathbf{r}}, t_2 - t_i) - F(\widetilde{\mathbf{r}}, t_1 - t_i))}{\partial \widetilde{\mathbf{r}}}\right) \Big|_{\widetilde{\mathbf{r}} = r(h(A_{10}))^{1/(pk)}} \end{split}$$

Используя полученный на основании разложения в ряд Тейлора упрощенный вид функции  $F(\tilde{r}, \Delta t)=10^{-5} (\tilde{r}^{1.60}\Delta t)^{0.75}$ , получим, что  $f(r, t_1, t_2, x_i, y_i, t_i)=1.91\cdot 10^{-6} (35A_{10}(x_i, y_i)+0.07)^{0.2} \cdot [(t_2-t_i)^{0.75}-(t_1-t_i)^{0.75}]/r^{0.8}$ .

Значения  $f(r, t_1, t_2, x_i, y_i, t_i)$  были использованы для построения ежеквартальных карт опасности возникновения сильных землетрясений в Алтае-Саянской складчатой области в 2004–2009 гг. В результате в «высокоопасных» областях, занимающих 24 % площади, произошло более 80 % землетрясений с  $M \ge 3.5$  и более 90 % событий с  $M \ge 4.5$ .

Таким образом, в работе был установлен вид распределения минимальных пространственновременных расстояний между слабыми событиями и последующими относительно сильными землетрясениями, определяющий их связь. Получено выражение, позволяющее оценивать вероятность возникновения относительно сильного землетрясения в интересуемой точке в заданный временной интервал.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герман В.И. Самоподобие временной структуры сейсмических событий на разных масштабных уровнях // Вулканология и сейсмология. 2005. № 3. С. 66–74.

2. Герман В.И. Единая теория подобия структуры сейсмичности: статистический подход. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2010. 80 с.

3. German V.I. Unified scaling theory for distributions of temporal and spatial characteristics in seismology // Tectonophysics. 2006. V. 424, № 3–4. P. 167–175.

### SPATIOTEMPORAL DISTANCES TO THE NEAREST STRONG EARTHQUAKES AND THEIR FORECASTING

#### V.I. German

Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Mineral Resources, Krasnoyarsk, Russia

*Abstract.* Analysis has been made on spatiotemporal separation of strong earthquakes and previously recorded weak seismic events. Simple analytical expression has been obtained for joint distribution function of spatiotemporal separation of large earthquake events. This function is used to generate an explicit evaluation of hazards associated with large earthquakes that may occur near the previously recorded weak seismic events.

Keywords: spatiotemporal distance, earthquake forecasting

УДК 551.24 + 004.42

### ИНТЕРАКТИВНАЯ БАЗА ДАННЫХ СЕЙСМОГЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЮГА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

### А.А. Гладков

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Работа посвящена созданию интерактивной базы данных сейсмогенных источников юга Восточной Сибири, являющейся частью разрабатываемой при участии автора геоинформационной системы «ActiveTectonics», используемой для интегрирования данных по активной тектонике. На основе зарубежных и отечественных разработок предложена методика выделения и картирования сейсмогенных источников, отражающих трехмерное строение активных разработань системы «ActiveTectonics», используемой, способных инициировать умеренные и сильные землетрясения. Используемая инфологическая модель данных разработана с учетом мирового опыта и включает набор геометрических, кинематических и сейсмологических параметров для описания сейсмогенных источников. С использованием предложенной методики разработан модуль геоинформационной системы «ActiveTectonics», позволяющий пользователям работать с базой данных сейсмогенных источников в интерактивном режиме, а также получать детализированные HTML – отчеты по объектам, содержащие параметрические сведения, текстовые комментарии специалистов, а также ассоциированные с объектом иллюстрации и публикации. На основе ГИС «ActiveTectonics» и анализа литературных, картографических и сейсмологических материалов на изученной территории юга Восточной Сибири в рамках координат 50–57° с.ш. и 100–120° в.д. выделено 38 сейсмогенных источников протяженностью от 46 до 329 км с максимальным сейсмическим потенциалом большинства из них, соответствующим магнитудам от 6 до 8.

Ключевые слова: активная тектоника, сейсмогенный источник, активный разлом, геоинформационная система

Сейсмогенные источники и их характеристики. Согласно современным представлениям, эпицентры сильных землетрясений ассоциируются с зонами активных разломов [1-5 и мн. др.], которые на тектонических картах обычно изображаются в виде линий. Однако такие карты не отражают трехмерное строение разломов и положение плоскостей разрывных нарушений, к которым, обычно, и приурочены очаги землетрясений с магнитудами от 5.5. В некоторых зарубежных странах, например Италии и Греции, для решения этой проблемы используется понятие «сейсмогенный источник» («seismogenic source») [6-8]. В европейской терминологии под сейсмогенным источником понимается упрощенная модель (упрощенное представление) трехмерной структуры активного разлома или системы разломов. На картах такие источники изображаются в виде проекции их трехмерной структуры на земную поверхность. В России понятие сейсмогенного источника чаще используется в работах по детальному сейсмическому районированию для определения территорий, потенциально опасных с точки зрения возникновения сильных сейсмических событий.

Западные исследователи выделяют индивидуальные («individual seismogenic source») и композитные («composite seismogenic source») сейсмогенные источники. Первые представляют собой проекцию очагов землетрясений в виде разрывов, ассоциированных с одним сейсмическим событием, и характеризуются полным набором геометрических, кинематических и сейсмологических параметров [6]. Эта категория дает представление о трехмерной структуре очага и используется для наиболее полного описания достоверно установленных очагов сильных землетрясений. Для индивидуальных сейсмогенных источников могут быть оценены такие важные параметры, как период повторяемости, длина и ширина разрыва, амплитуда смещения за одно событие. Однако применение только этой категории сейсмогенных источников не позволяет гарантировать полноту учета всех сейсмогенерирующих структур [6]. Композитные сейсмогенные источники не ассоциированы с конкретным землетрясением или группой землетрясений, выделяются на основе анализа региональных геолого-геофизических данных и обычно включают в себя неопределенное количество индивидуальных сейсмогенных источников. Эта категория предназначена для достижения полноты учета всех возможных очагов землетрясений с магнитудой от 5.5 и представляет научный интерес с точки зрения их применения для моделирования распространения сейсмического эффекта, исследования крупномасштабных геодинамических процессов и при проведении работ по оценке сейсмической опасности.

Набор параметров, которыми характеризуются сейсмогенные источники, схож в различных известных мировых базах данных, однако не является строго формализованным. В процессе анализа известных информационных систем, включающих базы данных композитных и индивидуальных сейсмогенных источников, и изучения опубликованных материалов по активной тектонике юга Восточной Сибири, для детального описания сейсмогенерирующих структур нами предложена инфологическая модель базы данных сейсмогенных источников юга Восточной Сибири (рис. 1), включающая геометрические, кинематические и сейсмологические параметры, поля для указания качества данных, а также ссылки на ассоциированные иллюстрации и публикашии.



Рис. 1. Модель данных для сейсмогенных источников на логическом уровне в нотации IDEF1X.

Методика выделения сейсмогенных источников. В рамках развития геоинформационной системы «ActiveTectonics» автором предлагается методика выделения сейсмогенных источников на территории юга Восточной Сибири, в котором в качестве фактологической основы используется:

- база данных активных разломов юга Восточной Сибири [9], обобщающая большое количество информации по главным тектоническим нарушениям региона;

 каталог землетрясений Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН, содержащий информацию о землетрясениях, зафиксированных инструментальными методами на исследуемой территории;

- база данных сильных исторических землетрясений региона, а также информация об известных палеосейсмодислокациях [10, 11];

 - база данных мест проявления косейсмических эффектов землетрясений [12].

Использование данных материалов позволяет учесть как геолого-структурные и сейсмогеологические данные, так и информацию о землетрясениях в исторический и инструментальный периоды наблюдений.

Площади сейсмогенных источников, как и зон ВОЗ, по определению характеризуются сравнительно большой плотностью умеренных и сильных сейсмических событий. Для выявления таких территорий нами на основе каталога землетрясений с  $K \ge 10 \ (M \ge 3.3)$  за 1950–2015 гг. БФ ГС СО РАН были построены карты общей выделившейся сейсмической энергии и плотности эпицентров землетрясений. Анализ полученных карт позволяет выявить локальные максимумы, которые соответствуют зонам повышенной, относительно окружающей территории, сейсмической активности. Дальнейшее сопоставление этих карт с базой данных активных разломов позволило выявить разломы или системы разломов, с которыми могут быть ассоциированы максимумы плотности эпицентров землетрясений и выделившейся сейсмической энергии. Геометрические построения проекций плоскостей этих разломов на земную поверхность с учетом их простирания, глубины проникновения, азимутов и углов падения позволяют нанести на карту выделенные сейсмогенные источники.

Оценка максимальных глубин проникновения разломов, а соответственно и сейсмогенных источников, может быть дана в соответствии с глубиной сейсмогенерирующего слоя, т.е. по максимальным глубинам гипоцентров землетрясений, ассоциированных с ними. В работах [13–15] приводятся оценки глубин гипоцентров землетрясений Байкальской рифтовой зоны и средние характеристики земной коры. Также в работах [4, 16] установлены соотношения между длинами разломов и глубинами гипоцентров землетрясений. В итоге, используя эти данные, можно оценить максимальные глубины проникновения сейсмогенных источников, необходимые для отрисовки их проекций на земную поверхность.

Автоматизация картирования сейсмогенных источников. Для автоматизации процесса картирования сейсмогенных источников, начиная от построения верхней линии источника на карте, используется специально разработанный модуль геоинформационной системы «ActiveTectonics».

«ActiveTectonics» – специализированная геоинформационная система для интегрирования данных по активной тектонике, разработанная с использованием ГИС-платформы «MapInfo Professional», входящей в ее состав системы управления базами данных и среды разработки «МарBasic». Ранее нами опубликованы результаты разработки и развития этой ГИС применительно к созданию интерактивных геопространственных баз данных активных в плиоцен-четвертичное время разломов и косейсмических эффектов землетрясений [9]. Главное рабочее окно системы «ActiveTectonics» представляет собой интерактивную карту юга Восточной Сибири, на которой тематическими слоями представлены базы данных сейсмогенных источников, активных разломов и мест проявления косейсмических эффектов (в будущем планируется расширение количества слоев путем добавления баз данных индивидуальсейсмогенных источников ных И геологоструктурной информации).

В рамках настоящей работы в «ActiveTectonics» нами добавлен модуль для работы с сейсмогенными источниками, включающий интерфейсы ввода и вывода информации. После добавления верхней линии сейсмогенного источника на карту пользователю предлагается последовательно заполнить несколько экранных форм, введя параметры источника и связанную с ним текстовую и графическую информацию. После завершения ввода параметров системой «ActiveTectonics» будет произведен автоматический расчет некоторых геометрических параметров, и проекция сейсмогенного источника будет автоматически нанесена на карту.

Одной ИЗ основных функций ГИС «ActiveTectonics» является возможность генерации детальных HTML - отчетов по любому объекту из баз данных системы. Эта функция реализована как для активных разломов и мест проявления косейсмических эффектов, так и для сейсмогенных источников. Сгенерированный отчет состоит из четырех тематических блоков (основная параметрическая информация, текстовые комментарии специалистов, ассоциированные с объектом иллюстрации и научные публикации) и предоставляется пользователю в веб-браузере компьютера. Пример созданного отчета по сейсмогенному источнику приведен на рисунке 2.



Рис. 2. Пример фрагмента созданного отчета по сейсмогенному источнику.

На основе предложенного подхода к выделению сейсмогенных источников и разработанной специализированной ГИС «ActiveTectonics» нами создана геопространственная база данных сейсмогенных источников юга Восточной Сибири, доступная в виде интерактивной карты. На момент написания работы она содержит подробную информацию о 38 сейсмогенных источниках, информация в ней постоянно обновляется и актуализируется.

Созданная база данных визуализирует территории, потенциально опасные с точки зрения возникновения умеренных и сильных землетрясений. Она может использоваться для последующего, в том числе автоматизированного, моделирования распространения сейсмического эффекта и оценки возможных последствий землетрясений, при проведении работ по сейсмическому районированию, для создания, обработки и комплексного анализа интерактивных баз данных по активной тектонике различных регионов России. Для каждого из выделенных сейсмогенных источников, в соответствии с предложенной моделью данных, определены и занесены в информационную систему геометрические, кинематические и сейсмологические параметры.

На основе баз данных, входящих в состав ГИС «ActiveTectonics», разрабатывается картографический сервис, который позволит сделать все полученные результаты доступными в сети Интернет.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–35–00035-мол а).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ружич В.В. Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1997. 144 с.

2. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.

3. Стром А.Л., Никонов А.А. Соотношения между параметрами сейсмогенных разрывов и магнитудой землетрясения // Физика Земли. 1997. № 12. С. 55–67.

4. Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.

5. Wells D.L., Coppersmith K.J. New emprical relationship among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1994. V. 84, № 4. P. 974–1002.

6. Basili R., Kastelic V., Valensise G. and DISS Working Group. Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3.1.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5,5 in Italy and surrounding areas. http://diss.rm.ingv.it/diss. Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Sezione Romal. 2009. 16 p.

7. Haller K.M., Basili R. Developing seismogenic source models based on geologic fault data // Seismological Research Letters. 2011. V. 82(4). P. 519–525.

8. Sboras S., Pavlides S., Caputo R., Chatzipetros A., Michailidou A., Valkaniotis S., Papathanasiou G. Improving the resolution of seismic hazard estimates for critical facilities: the Database of Greek crustal seismogenic sources in the frame of the SHARE project // Proceedings of the 30° Convegno Nazionale GNGTS. 2011. P. 232–235.

9. Лунина О.В., Гладков А.С., Гладков А.А. Систематизация активных разломов для оценки сейсмической опасности // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 49–60.

10. Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Имаев В.С. Палеоземлетрясения Прибайкалья: методы и результаты датирования // Геотектоника. 2010. № 2. С. 77–96.

11. Чипизубов А.В. Оптимальная оценка сейсмической опасности Прибайкалья: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Ир-кутск: ИЗК СО РАН, 2007. 417 с.

12. Андреев А.В. Вторичные косейсмические деформации в геологической среде: Автореф. дис.... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2014. 19 с.

13. Гилева Н.А., Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Девершер Ж. Локализация землетрясений и средние характеристики земной коры в некоторых районах Прибайкалья // Геология и геофизика. 2000. Т. 41, № 5. С. 629–636.

14. Радзиминович Н.А. Глубины очагов землетрясений и реологическое состояние земной коры Байкальской рифтовой зоны // Геофизика на пороге третьего тысячелетия. Труды третьей Байкальской молодежной школы семинара (Иркутск–Черноруд, 20–25 августа 2001 г.) / Под ред. проф. А.Г. Дмитриева. Иркутск, 2002. С. 194–201.

15. Deverchere J., Houdry F., Diament M., Solonenko N., Solonenko A.. Evidence for a seismogenic upper mantle and lower crust in the Baikal rift // Geophysical Research Letters. 1991. V. 18 (6). P. 1099–1102.

16. Саньков В.А. Глубины проникновения разломов. Новосибирск: Наука, 1989. 136 с.

### INTERACTIVE DATABASE OF SEISMOGENIC SOURCES OF SOUTH OF EASTERN SIBERIA

#### Gladkov A.A.

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The work is dedicated to the creation of interactive database of seismogenic sources of south of Eastern Siberia, which is part of geoinformation system "ActiveTectonics", that used to integrate data on active tectonics. This information system is developed with the participation of the author. Based on the analysis of foreign and domestic developments proposed methodology of allocation and mapping seismogenic sources, reflecting the three-dimensional structure of the active faults that could trigger moderate and powerful earthquakes. Used infological data model designed to meet the international practices and includes a set of geometric, kinematic and seismological parameters to describe the seismogenic sources. Developed the module of geoinformation system «ActiveTectonics», which allows users to work with the database of the seismogenic sources in interactive mode and receive detailed HTML - reports on objects that contain parametric information, text comments of experts, as well as associated with the object illustrations and publications. Based on the GIS «ActiveTectonics» and analysis of literary, cartographic and seismic materials for the studied area of south of Eastern Siberia within the framework of coordinates 50–57 °N and 100–120 °E allocated 38 seismogenic sources which have a length from 46 to 329 km and maximum seismic potential of most of them, the corresponding magnitudes of 6 to 8.

Keywords: active tectonics, seismogenic source, active fault, geoinformation system

УДК 550.361.4+550.347.2+551.222(282.256.241)

# ПАРАДОКС ИЛИ НЕДОРАЗУМЕНИЕ В РЕЗУЛЬТАТАХ ИЗУЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА?

В.А. Голубев

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Теплопотери через поверхность Земли и диссипация ее упругой энергии посредством сейсмичности являются основными составляющими расходной части энергетического бюджета планеты. В сообщении дано сопоставление этих составляющих для Байкальского региона.

Ключевые слова: тепловой поток, энергия землетрясений, Байкальский регион

Количество энергии, высвобождаемой при сейсмическом событии, равно разности величин энергии упругой деформации Еупр., запасенной в горных породах в районе очага будущего землетрясения, и упругой энергии, оставшейся в районе очага после реализации этого события [1, 2]. Эта разность энергий  $\Delta E_{ynp.}$  расходуется на излучение энергии сейсмическими волнами (Еизл.), а другая - основная ее доля - остается в пределах самого очага (Еочаг.) [1-4]:

 $\Delta E_{\text{VIID}} = E_{\text{ИЗЛ.}} + E_{\text{ОЧАГ.}}$ (1)Величина Еочаг., в свою очередь, распределяется в основном между двумя составляющими:

 $E_{\text{очаг.}} \cong E_{\text{тепл.}} + E_{\text{трещ.}}$ (2)

Здесь Е<sub>тепл.</sub> – это перешедшая в тепловую механическая энергия по преодолению трения при взаимном смещении блоков горных пород, расположенных по разные стороны от разлома, образованного или обновленного в результате землетрясения;  $E_{\text{треш.}}$  – энергия трещинообразования, затраченная на создание новых поверхностей (на разрывы межмолекулярных связей) при образовании разломов в районе землетрясения [2-4]. Е<sub>трещ.</sub> в среднем составляет 1 Дж/м<sup>2</sup> [4]. Удельная площадь новых поверхностей, возникающих при сейсмическом дроблении горных пород, находится в пределах от 0.7 до 160 м<sup>2</sup>/г, а соответствующая этим значениям величина  $E_{\text{трени}}$  составляет небольшую прибавку к  $E_{\text{тепл}}$  [2–4], поэтому можно считать, что основная часть остающейся в зоне очага энергии идет на нагревание горных пород:

 $E_{\text{очаг.}} \approx E_{\text{тепл.}}$ 

(3)Равенства (2) и (3) приблизительные еще и потому, что в них не учтена энергия фазовых переходов, химических превращений и некоторые другие расходы и выделения энергии в очаге. Их доля в величине Еочаг. невелика, хотя и меняется в зависимости от района и силы землетрясения [2-4].

Из-за неравномерности сейсмического процесса величина Е<sub>изл.</sub> распределена очень неравномерно и, рассчитанная для Земли в целом, составляет около 1×10<sup>18</sup> Дж/год [5]. Эта энергия, в конечном счете, тоже почти вся тратится на нагрев недр планеты и, следовательно, увеличивает тепловой поток через ее поверхность. Ее вклад в тепловой бюджет Земли составляет менее 0.1 % от 1.4×10<sup>21</sup> Дж/год – суммарных годовых потерь тепла через поверхность планеты [5, 6]. Если разделить 1.4×10<sup>21</sup> Дж на 3.15×10<sup>7</sup> – число секунд в году, то «тепловая мощность Земли» составит 4.4×10<sup>13</sup> Вт. Менее определенным остается

второе слагаемое выражения (1) – энергия, остающаяся и тоже переходящая в основном в тепло непосредственно в самом очаге землетрясения.

В современной сейсмологии в качестве одного из энергетических параметров очага землетрясения рассчитывается его сейсмический момент  $M_0$  (H·м). Величина  $M_0$  определяется по сейсмограмме, а соответствующая ей энергия, согласно выражению:  $M_0 = \mu DS$ , (4)

тратится на макросейсмические смещения в очаге [1, 2]. Здесь и – модуль упругости сдвига (Па), D – средняя величина смещений по разрывам (м), S – площадь разрывов (м<sup>2</sup>). Считается, что величины  $M_0$ , рассчитанные по формуле (4) с использованием данных о реально наблюдаемых, возникающих при землетрясениях, смещениях D и S, и величины  $M_0$ , рассчитанные по сейсмограммам этих землетрясений, согласуются между собой [2-4]. Из этой согласованности и соотношений (1-3) следует приблизительное равенство  $E_{oчаг.} \approx M_0 \approx E_{тепл.}$ , которое, по сути дела, и было использовано в [7, 8] и ряде других публикаций этого автора для расчета энергии сейсмотектонических деформаций (ЭСД) Байкальского региона (БР). Далее дается сравнение этой энергии с суммарным расходом геотермического тепла через земную поверхность БР. Тепловой поток к настоящему времени здесь достаточно хорошо изучен и его величины могут служить независимым критерием в оценках ЭСД [9, 10].

В работе [7, рис. 1] были приведены эпицентры и соответствующие им магнитуды М сильнейших землетрясений (*M*≥6), произошедших в БР в период инструментальных наблюдений 1950-2002 гг. и исторический период 1740-1949 гг., то есть за 262 года, а затем, по формуле:

$$\lg M_0 \pm 0.6 = 8.4 + 1.6M$$
 (5)

рассчитаны  $lg M_0$ , а по ним и сами значения  $M_0$ . Соотношение (5) получено на основе статистической обработки мировых данных [2]. Известно и другое соотношение:

$$\lg M_0 \pm 0.6 = 7.63 + 1.75 M_L,$$
 (6)

установленное для умеренных землетрясений БР [11]. Оно, по-видимому, может быть применено и для наших сравнительных оценок, если вместо локальных магнитуд *M*<sub>L</sub> использовать магнитуды *M*.

Расчеты, выполненные автором данного сообщения с использованием соотношения (5) для 42 обсуждаемых в [7] сейсмических событий, показывают, что  $M_0$  сильных землетрясений БР меняется в пределах  $6.10^{18}$ -3.31 $\cdot$ 10<sup>21</sup> H·м, а их сумма (Q) со-
ставляет  $5.33 \cdot 10^{21}$  Н·м, что совпадает с расчетами [7]. Следует отметить, в указанной работе величине  $M_0$  впервые приписывается размерность Дж, что формально, по-видимому, верно (ведь Н·м=Дж!) и позволяет рассчитать ЭСД Байкальского региона. Как уже было сказано выше, эта рожденная на глубине энергия выделяется в очагах в виде тепла и медленно передается вышележащим слоям земной коры и ее поверхности. Плотность потока этой тепловой энергии  $q_{oчаr.}$  можно рассчитать, используя выражение:

 $q_{\text{очаг.}}=Q/st$ , (7) в котором *s* – площадь земной поверхности, составляющая для БР 6·10<sup>5</sup> км<sup>2</sup>; *t* – время выделения энергии, в нашем случае *t*=262 года (8.25·10<sup>9</sup> с). Подстановка этих величин и *Q*=5.33·10<sup>21</sup> Дж в формулу (7) дает для  $q_{\text{очаг.}}$ =1.08 Вт/м<sup>2</sup>. Если повторить эти оценки, используя те же магнитуды и формулу (6), то  $q_{\text{очаг.}}$  составит 2.87 Вт/м<sup>2</sup>.

С использованием литературных данных о сейсмодислокациях и палеоземлетрясениях БР расчет ЭСД в [8] продлен в прошлое на период до двух тысяч лет, и, кроме того, в этой публикации даны «плотности потока энергии сейсмотектонических деформаций». При этом авторы приходят к заключению о стационарности сейсмического процесса в этом регионе. В целом выводы статьи не отличаются от приведенных в [7]. Вопросы о вкладе сейсмической энергии очагов землетрясений в суммарную энергетику БР рассматривались и ранее [6, 12 и др.], но, к сожалению, в современных статьях об этом не упоминают.

Данные о фактически измеренном в БР тепловом потоке (q) в виде карты его изолиний приведены в [9, 10]. Согласно этим картам, максимальные значения q, достигающие  $0.06-0.08 \text{ Bt/m}^2$ , приурочены к рифтовым впадинам БР, где сосредоточена и основная часть сильных землетрясений. К северозападу и юго-востоку от них тепловой поток снижается до  $0.04-0.06 \text{ Bt/m}^2$ . С некоторым завышением, примем, что средняя величина q в БР составляет  $0.07 \text{ Bt/m}^2$ .

Согласно закону сохранения энергии, при постоянстве мощности внутренних источников тепла Земли, в том числе и сейсмических, величина q, интегрирующая в себе все их тепловые вклады, не должна быть меньше  $q_{oчаr}$  – одной из своих составляющих. Сравнение же среднего для БР теплового потока, величину которого мы приняли даже с некоторым завышением (0.07 Вт/м<sup>2</sup>), с величинами  $q_{oчаr}$ . (1.08 и 2.87 Вт/м<sup>2</sup>) показывает, что генерируемый в течение последних почти трех столетий в очагах землетрясений БР тепловой поток в 16–41 раз превышает реально измеренные здесь потери тепла через земную поверхность. Этот парадоксальный результат, или недоразумение, согласно которому  $q_{oчаr}$ . в десятки раз превышает реально измеренные теплопотери земной коры в этом регионе, нуждается в истолковании. В качестве такого истолкования, или хотя бы некоторого отношения к истолкованию, можно привести следующее.

Сравниваемые значения тепловых потоков q и *q*<sub>очаг.</sub> получены по данным о современных теплопотерях и современной сейсмичности земной коры БР. Расчеты показывают, что из-за медленности процесса теплопередачи генерируемая в последние столетия на глубинах 15-20 км (средняя глубина гипоцентров землетрясений БР) тепловая энергия проявится в наблюдаемом у земной поверхности тепловом потоке только через несколько миллионов лет. По этой же причине основной вклад сейсмичности в современное близповерхностное тепловое поле региона должен обеспечиваться энергией сейсмических событий, происходивших здесь миллионы лет назад [6]. Отсутствие заметного вклада  $q_{0yar}$  в q может указывать на то, что в то отдаленное время сейсмичность здесь была в сотни и тысячи раз ниже современной. Однако подтверждений такому снижению сейсмичности в прошлом пока не выявлено, а более вероятным является обратное [13].

В работе Ю.В. Ризниченко [2] впервые дается статистическое (не аналитическое) выражение (3) и отмечается, что значения  $M_0$ , вычисленные: 1) по сейсмограммам и 2) по геометрическим размерам вновь образованных поверхностей сейсмогенных разломов (по которым рассчитывается площадь S этих поверхностей) и величинам смещений по ним D, будут близки в том случае, если жесткость геологической среды µ принять близкой к 3·10<sup>11</sup>  $дин/см^2 = 3 \cdot 10^{10} \Pi a = 3 \cdot 10^5$  бар. При этом он отмечает, что это значение и чрезвычайно велико, близко к жесткости стали и может соответствовать жесткости, например, гранитов лишь в том случае, если в них отсутствуют какие-либо нарушения кристаллической решетки. Реальные же горные породы всегда содержат такие микро- и макронарушения, поэтому их жесткость на несколько порядков ниже указанной и, соответственно, величины М<sub>0</sub> должны быть на несколько порядков меньше.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 175 с.

2. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике очага землетрясения. М.: Наука, 1976. С. 9–27.

3. Kanamori H., Rivera L. Energy partitioning during earthquake // Earthquakes: Radiated energy and the physics of faulting.Geophysical Monograph 170. American Geophysical Union, Washington, DC. 2006. P. 3–14.

4. Shipton Z.K., Evans J.P., Abercrombie R.E., Brodsky E.E. The missing sinks: slip localization in faults, damage zones, and the seismic energy budget // Earthquakes: Radiated energy and the physics of faulting. Geophysical Monograph 170. American Geophysical Union, Washington, DC. 2006. Editors: R. E. Abercrombie et al., P. 217–222.

5. Монин А.С. История Земли. Л.: Наука, 1977. 340 с.

6. Голенецкий С.И., Голубев В.А. О связи сейсмичности с тепловым потоком в районе впадины озера Байкал // Геология и геофизика. 1985. № 6. С. 87–96.

7. Ключевский А.В., Демьянович В.М. Байкальская рифтовая зона: область повышенной энергии сейсмотектонических деформаций литосферы // Доклады Академии наук. 2009. Т. 428, № 5. С. 663–666. 8. Ключевский А.В., Демьянович В.М., Джурик В.И. Оценки энергии сейсмотектонических деформаций литосферы Байкальской рифтовой зоны // Вулканология и сейсмология. 2013. № 4. С. 40–56.

9. Лысак С.В. Тепловой поток континентальных рифтовых зон. Новосибирск: Наука, 1988. 197 с.

10. Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2007. 222 с.

11. Добрынина А.А. Очаговые параметры землетрясений Байкальской рифтовой зоны // Физика Земли. 2009. № 12. С. 60–75.

12. Голубев В.А. О вкладе энергии землетрясений в теплопотери земной коры Байкальского региона // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы: Материалы Второго Всероссийского симпозиума, посвященного памяти академиков Н.А. Логачева и Е.Е. Милановского (август 2013 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. Т. 1. С. 83–85.

13. Чипизубов А.В. Реконструкция и прогноз изменений сейсмичности Земли. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008. 239 с.

### IS IT A PARADOX OR MISUNDERSTANDING IN THE STUDY OF ENERGETICS OF STRONG EARTHQUAKES IN THE BAIKAL REGION?

### V.A. Golubev

Institute of Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The loss of heat through the Earth's surface and elastic energy dissipation during an earthquake are the major components of the total energy output. The paper is concerned with the comparison of these energies in the Baikal region. *Keywords:* heat flow, seismic energy, Baikal region

\*\*\*

УДК 551.24+550.34

# ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ОБЛАСТЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ РАЗЛОМОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ С УЧЕТОМ РЕДКИХ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Е.А. Горбунова

Институт земной коры СО РАН, Россия, Иркутск

Аннотация. Закон Гутенберга–Рихтера показывает связь между магнитудой и количеством землетрясений, зафиксированных в определенном регионе за заданный период времени. На графике повторяемости землетрясений этот закон представляется в виде линейной регрессии – количество событий уменьшается с увеличением магнитуды. Однако замечено, что в некоторых случаях линейная модель графика повторяемости нарушается в области сильных магнитуд – правая часть графика (иначе хвост распределения) становится положе или круче. Известно, что одним из определяющих структурных факторов контролирования очагов землетрясений (особенно сильных) являются разломы разных иерархических уровней. В работе предпринята попытка оценки сейсмической опасности крупных разломов Центральной Азии на основе закона Гутенберга–Рихтера. При этом для построения графиков повторяемости использовались землетрясения, зафиксированные в областях активного динамического влияния конкретных разрывных структур. Показано, что изменение линейности графиков наблюдается на уровне магнитуд M=5.5-6.5. Степень нелинейности графиков повторяемости, а также тип хвоста распределения различны для отдельных разломов Центральной Азии, но в целом зависят от геодинамической активности зоны, в которой располагается разрыв, и от квазивязкости вмещающей среды. *Ключевые слова:* активный разлом, сейсмичность, повторяемость землетрясений

Закон Гутенберга–Рихтера показывает распределение числа землетрясений N за определенный интервал времени по их магнитуде M:

lgN=a-bM, (1)где a – теоретическое значение lgN при M=0, а b – угол наклона графика повторяемости, показывающий соотношение между долями сильных и слабых событий [1]. В работах [2-5 и мн. др.] обращается внимание на то, что в области сильных магнитуд линейная модель (1) графика повторяемости нарушается – правая часть графика (иначе хвост распределения) становится положе или круче. Уравнение (1) не всегда адекватно отражает распределение сильных событий и частоту их возникновения по отношению к более слабым. Известно, что очаги сильных землетрясений контролируются крупными разломами, а потому традиционные методы построения и анализа графиков, базирующиеся на исследовании сейсмического процесса в отдельных регионах, требуют определенных изменений. В настоящей работе на примере Центральной Азии сделана попытка исследования закономерностей развития сейсмического процесса в зонах крупных разломов с использованием закона Гутенберга-Рихтера. По событиям, зафиксированным в областях динамического влияния (ОАДВ) конкретных разрывов, строились кумулятивные графики повторяемости землетрясений. Ширина ОАДВ разломов принималась равной 50 км в каждую сторону от их осей. Для анализа использовались землетрясения из каталога NEIC с магнитулами M>4 за 1900-2014 гг. Анализ изменения угла наклона графиков повторяемости проводился путем выделения совокупностей значений lgN(M) с ярко выраженным последовательным линейным распределением. Значения, не вошедшие в основную совокупность и располагающиеся в области сильных магнитуд, рассматривались как хвост распределения.

Оказалось, что в характере поведения хвоста распределения относительно распределения общей

совокупности значений lgN(M) можно выделить четыре типа (рис. 1). Первый и второй тип графиков повторяемости схожи (рис. 1, *а* и *б* соответственно) – при переходе в область сильных магнитуд угол наклона хвоста распределения становится положе относительно основной совокупности значений lgN(M). Следовательно, в зонах данных разломов фиксируется больше сильных землетрясений, чем этого следовало бы ожидать, исходя из распределения по слабым событиям. А потому данные разломы можно считать наиболее сейсмически опасными. На

графиках повторяемости третьего типа нелинейность выражена слабо или отсутствует вовсе – угол наклона сохраняется на любом магнитудном уровне (рис. 1, в). Для графиков четвертого типа характерно уменьшение угла наклона при переходе в область сильных магнитуд (рис. 1, г), что свидетельствует о снижении доли сильных событий по отношению к слабым. Сильные события происходят реже, чем следовало бы ожидать из распределения слабых, а потому разломы с четвертым типом графиков можно считать менее опасными.



Рис. 1. Примеры разных типов графиков повторяемости, построенных по землетрясениям, зафиксированным в областях динамического влияния отдельных разломов Центральной Азии: *a*, *б*, *в*, *с* – первый, второй, третий и четвертый тип соответственно. Цифрами показаны номера разломов по авторскому каталогу.



Рис. 2. Карта разломов Центральной Азии по типам графиков повторяемости землетрясений, зафиксированных в областях влияния конкретных дизьюнктивов. *1* – Гималайский надвиг; 2–5 – разломы с первым, вторым, третьим и четвертым типом графиков повторяемости соответственно, серым цветом показаны разломы со слабовыраженной тенденцией; *6* – разломы, исключенные из анализа в связи с недостаточным количеством данных. Цифрами показаны номера разломов по авторскому каталогу.

Графики с первым и вторым типом распределения характерны для разломов Алтае-Монгольской сейсмической зоны, Тянь-Шаня, разломов, протягивающихся вдоль северной границы Тибетского плато (рис. 2), а также субмеридиональных разломов, которые подчеркивают выделенную в работе [6] глобальную трансрегиональную геодинамическую структуру, проходящую примерно по 105 °в.д. Появление катастрофических событий с М≥7.5 и их высокая частота относительно слабых землетрясений, отмеченные в областях влияния перечисленных выше разломов, могут быть объяснены локализацией разрывных структур в зоне схождения Памира, Тянь-Шаня и Казахской глыбы. По своему положению в этой группе разломов выделяется Гималайский надвиг, его повышенная активность связана с влиянием Индостанской коллизии. Разломы с графиками третьего типа на территории Центральной Азии распространены слабо – в особую совокупность выделяется только Каракорумский разлом и оперяющий его субширотный разлом. Графики четвертого типа характерны преимущественно для разломов Таджикского и Туранского блоков, разломов восточной части Центральной Азии и представлены единичными разломами на юго-восточной границе Тибетского плато.

Установлено, что изменение линейности графиков повторяемости землетрясений, зафиксированных в областях динамического влияния разломов, наблюдается на уровне магнитуд М=5.5-6.5. При значениях М≥6 происходит изменение физики очага разрушения (землетрясения) [7], важнейшее значение приобретает амплитуда смещения, величина которой зависит от прочности сцепления блоков, которая, в свою очередь, определяет квазивязкость трещиноватой среды. Отсюда, получаемые сложные окончания линий регрессии на графиках повторяемости землетрясений отражают вариации квазивязкой характеристики среды при формировании очагов и реализации в них напряжений. В целом можно отметить, что сейсмическая опасность разлома и поведение хвоста распределения на графиках повторяемости землетрясений зависят от геодинамической активности зоны, в которой локализуется конкретный дизъюнктив, и квазивязкости вмещающей среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-55-53023).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of earthquakes in California // Bulletin of Seismologhical Society of America. 1944. V. 34. P. 185-188.

2. Кузнецова К.И. Особенности графика повторяемости землетрясений и поведение горных масс // Региональные исследования сейсмического режима. Кишенев: Штиница, 1974. С. 100-108.

3. Purcaru G. A new magnitude-frequency relation for earthquakes and a classification of relation types // Ceophys. J. R. astr. SOC. 1975. V. 42. P. 61-79.

4. Востриков Г.А. Связь параметров графика повторяемости, сейсмического течения и очага землетрясения. М.: ГИН РАН, 1994. 292 с.

5. Родкин М.В., Писаренко В.Ф., Нго Тхи Лы, Рукавишникова Т.А. О возможных реализациях закона распределения редких сильнейших землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 4. С. 893–904.

6. Шерман С.И., Дзинь Ма, Горбунова Е.А. Главные геодинамические факторы локализации сильных землетрясев структуре литосферы Центральной Азии // Геодинамика и тектонофизика. 2015. № 4. С. 409-436.

7. Шерман С.И., Бержинский Ю.А., Павленов В.А., Аптикаев Ф.Ф. Региональные шкалы сейсмической интенсивности (опыт создания шкалы для Прибайкалья). Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 189 с.

### SEISMIC HAZARD ASSESSMENT MADE FOR ZONES OF DYNAMIC INFLUENCE EXERTED BY CENTRAL ASIA FAULTS WITH REGARD TO RARE BUT STRONG EARTHQUAKES

### E.A. Gorbunova

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. The Gutenberg-Richter law expresses the relationship between the magnitude and total number of earthquakes recorded in a certain region and over a certain period. The plot of Gutenberg Richter earthquake recurrence law shows a linear regression line - the number of events decreases with increasing magnitude. However, the deviation from the linearity of earthquake recurrence curve can sometimes be observed in a high-magnitude range - the right side of the curve (tail of distribution) becomes either flatter or steeper. It is known that one of the major factors controlling the sources of earthquakes (especially of large) is large faults of different hierarchical levels. This paper attempts to use the Gutenberg-Richter law for seismic hazard assessment of faults in Central Asia. To do this, the earthquake recurrence curves were plotted based on seismic events recorded in zones of dynamic influence of certain faulting structures. It has been shown that the curves deviate from the linearity at magnitudes of M=5.5-6.5. The linearity of the curves and the type of tail distribution differ for certain faults of Central Asia but generally depend on geodynamic activity of the fault location area and quasi-viscosity of the host medium.

*Keyword:* active fault, seismicity, earthquake recurrence

\*\*\*

УДК 550.34.094+097

# ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ЗАТУХАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ЛИТОСФЕРЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ И ИХ СВЯЗЬ С ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СРЕДЫ

А.А. Добрынина<sup>1, 2</sup>, В.А. Саньков<sup>1, 3</sup>, В.В. Чечельницкий<sup>4</sup>, Ж. Девершер<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

<sup>3</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>4</sup> Байкальский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Иркутск, Россия

<sup>5</sup> Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), Université de Bretagne Occidentale (UBO), Domaines Océaniques-UMR 6538, Брест, Франция

Аннотация. Получены оценки затухания сейсмических волн в литосфере и верхней мантии Байкальской рифтовой системы. По записям прямых и кода-волн региональных землетрясений рассчитаны значения сейсмической добротности  $(Q_C)$ , частотного параметра (n), коэффициента затухания  $(\delta)$ , общего затухания  $(Q_T)$ , а также проведена оценка вклада двух компонент затухания – внутреннего затухания (Qi) и затухания вследствие рассеяния на неоднородностях среды (Qsc) – в общее затухание. Латеральные вариации затухания сейсмических волн коррелируют с геологическими и геофизическими характеристиками региона, при этом затухание зависит в первую очередь от сейсмической активности и теплового потока региона. Геологическая неоднородность среды и возраст консолидации коры являются факторами второго порядка. Расчет внутреннего затухания (Qi) и затухания вследствие рассеяния сейсмических волн на неоднородностях среды (Qsc) показал, что наибольший вклад в общее затухание дает внутреннее затухание.

*Ключевые слова*: Байкальская рифтовая система, добротность, кода, затухание, внутреннее затухание, затухание на неоднородностях среды

Энергия сейсмических волн при распространении в геологической среде с расстоянием постепенно падает. Это явление связано с несколькими факторами - геометрическим расхождением волнового фронта, внутренним затуханием (intrinsic attenuation, Qi), вызванным неупругими свойствами реальной среды, и затуханием на неоднородностях среды (scattering attenuation, Qsc), на которых происходит преломление, отражение и дифракция сейсмических волн. Затухание сейсмических волн зависит от многих параметров – механической неоднородности среды, теплового потока, содержания флюидов и др. Кроме этого, сведения об относительном вкладе двух компонент затухания (Qi и Qsc) в общее затухание  $(Q_{\rm T})$  могут дать дополнительную информацию для верной тектонической интерпретации полученных данных и понимания процессов, происходящих в литосфере. В работе исследуются факторы, влияющие на затухание сейсмических волн в Байкальской рифтовой системе (БРС).

Для оценки факторов, влияющих на затухание сейсмических волн в литосфере континентальных рифтовых систем, проведены расчеты сейсмической добротности по кода-волнам ( $Q_{\rm C}$ ), рассчитано общее затухание и определен вклад внутреннего затухания и затухания вследствие рассеяния на неоднородностях среды в общее затухание с использованием гибридной модели [1] и подхода, предложенного в работе [2]. Для расчета затухания использовались данные постоянной сети сейсмических станций Байкальского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (274 землетрясения с магнитудами  $M_{\rm L}=3.1-5.4$ ).

В результате получены значения сейсмической добротности по кода-волнам  $Q_{\rm C}$  в частотном диапазоне от 0.2 до 16 Гц. Величина общего затухания  $Q_{\rm T}$  оценивалась по прямым поперечным волнам для событий с эпицентральными расстояниями не более 75

км. Значения  $Q_{\rm T}$ ,  $Q_{\rm SC}$  и  $Q_{\rm i}$  составляют:  $Q_{\rm T}$ =98 $f^{0.83}$ ,  $Q_{\rm SC}$ =266 $f^{0.62}$ , Qi=158 $f^{0.99}$ .

Полученные оценки  $Q_{\rm C}$  показывают сильную зависимость сейсмической добротности от частоты и длины окна:  $Q_{\rm C}$  возрастает от 43 ± 48 до 944 ± 178 для центральных частот 0.3 и 12.0 Гц при длине окна обработки коды W=20 с и от 97 ± 49 до 1767 ± 560 на тех же частотах при W=80 с; значения  $Q_0$  возрастают от 53±4 до 335±33, а частотного параметра – от 0.84±0.07 до 0.77±0.07 в зависимости от длины окна W.

Объяснением вариаций затухания с увеличением длины окна обработки коды W могут служить несколько факторов: (1) неоднородное распределение «рассеивателей» в объеме среды, (2) вклад в формирование коды многократно рассеянных сейсмических волн и (3) непостоянное значение внутреннего затухания Qi [2]. В работах [3-5] показано, что теория однократного рассеяния хорошо работает на малой длине окна обработки коды (W<100 c), так как для такой длины окна рассеянное волновое поле слишком слабо и не дает вторичного рассеяния на неоднородностях [6-8]. В нашем случае используются длина окна обработки коды <100 с, что дает возможность применять для интерпретации полученных результатов модель однократного рассеяния, в рамках которой есть возможность оценить объем и глубину формирования коды [9]. В представленной работе мы попытались также оценить влияние скоростной модели на глубинные вариации характеристик затухания. С этой целью были рассчитаны объем и глубина формирования коды для двух случаев: «модель 1» - однородное полупространство с постоянной скоростью сейсмических волн и «модель 2» - слоистая модель среды, учитывающая изменение скорости сейсмических волн на границе Мохо. В зависимости от использованного подхода размеры осей эллипсоида значительно меняются – разница может составлять до 103 км. По-

скольку коэффициент затухания также зависит от скорости распространения сейсмических волн, его значения были пересчитаны согласно представленным моделям. Изменение коэффициента затухания в зависимости от применяемой скоростной модели составляет в среднем 22 %. Для обеих используемых моделей среды при анализе глубинных вариаций затухания (частотного параметра и коэффициента затухания) наблюдается нелинейность изменения частотного параметра с глубиной – при общей тенденции к понижению наблюдаются участки с постоянными значениями частотного параметра, с относительно высокими и низкими скоростями уменьшения параметров затухания. Сопоставление глубинных вариаций затухания и скоростного строения исследуемого региона показало, что изменения коэффициента затухания и частотного параметра приурочены к скоростным границам в среде [10].

Помимо расчета сейсмической добротности для всей территории, сделана попытка оценить вариации затухания в отдельных тектонических блоках, составляющих БРС: значения Q<sub>C</sub> рассчитывались для отдельных тектонических единиц – рифтовых впадин, горных поднятий, междувпадинных перемычек и Сибирской платформы. По простиранию рифтовой системы добротность Q<sub>0</sub> меняется в пределах от 72 до 109, а показатель неоднородности среды *п* изменяется в пределах от 0.87 до 1.22. В целом, минимумы Q<sub>C</sub> приурочены к впадинам, в максимумы - к перемычкам и плечам рифтов. Параметры затухания  $Q_0$  и *n* для различных областей рифтовой системы сопоставлялись также с картами реализации суммарного сейсмического момента, плотности разломов и теплового потока. В общем, области с высокими значениями суммарного сейсмического момента, высокой плотностью разломов и повышенным тепловым потоком отличаются высоким затуханием сейсмических волн и высоким значением показателя неоднородности среды. Вместе с тем, при детальном рассмотрении соотношений параметров затухания  $Q_0$  и *n* для отдельных тектонических блоков отмечаются некоторые важные особенности. Одна из наблюдаемых тенденций состоит в том, что как затухание, так и частотный параметр снижаются для древних стабильных областей, то есть зависят от возраста консолидации земной коры. Также наблюдаются две контрастные аномалии – Муйский район и Северо-Байкальская впадина. Для Муйского района (включает Верхнеангарско-Муйскую междувпадинную перемычку, Верхнемуйскую и Ципа-Баунтовскую впадины) отмечается минимальное значение добротности  $Q_0=72$ , в то время как частотный параметр имеет максимальное значение во всей рифтовой системе -n=1.22, что согласуется с высокой сейсмической активностью этой части рифта. Однако поверхностная плотность разрывов здесь относительно невелика (~70) в противоположность высокому значению п. Вместе с тем, здесь наблюдается локальная аномалия теплового потока (147 мB/м<sup>2</sup>), что может объяснить высокое затухание

сейсмических волн в этой локальной области [11, 12]. Другой аномалией является Северо-Байкальская впадина, которая характеризуется достаточно высоким затуханием ( $Q_0$ =109, n=0.88). При этом известно, что уровень сейсмической активности и плотность разрывов здесь низкие, в то время как значения теплового потока достаточно велики – до 474 мВ/м<sup>2</sup>. Можно заключить, что тепловой поток имеет доминирующее влияние на затухание сейсмических волн относительно других геолого-геофизических характеристик среды. Расчет величин *Qi* и *Qsc* показал, что наибольший вклад в общее затухание дает внутреннее затухание. Соотношения между компонентами затухания: *Qi*~62 % и *Qsc*~37 %.

В результате проведенных работ получены оценки затухания сейсмических волн в литосфере и верхней мантии Байкальской рифтовой системы. По записям прямых и кода-волн региональных землетрясений с использованием теории однократного рассеяния [6], гибридной модели [1] и подхода [2] рассчитаны значения сейсмической добротности  $(Q_{\rm C})$ , частотного параметра (n), коэффициента затухания ( $\delta$ ), общего затухания  $(Q_{\rm T})$ , а также проведена оценка вклада двух компонент затухания – внутреннего затухания (Qi) и затухания вследствие рассеяния на неоднородностях среды (Qsc) – в общее затухание.

Значения  $Q_{\rm C}$  показывают высокую зависимость от частоты в диапазоне 0.2–16.0 Гц и длины окна обработки коды. Наблюдаемое увеличение  $Q_{\rm C}$  с увеличением длины окна обработки коды может быть интерпретировано как проявление уменьшения затухания с глубиной. Сопоставление глубинных вариаций коэффициента затухания  $\delta$  и частотного параметра *n* со скоростным строением региона говорит о приуроченности изменений в затухании сейсмических волн к скоростным границам в среде. Вместе с тем, опыт такого сопоставления показывает, что результаты оценки глубинных вариаций параметров затухания в значительной степени зависят от применяемой скоростной модели среды.

Латеральные вариации затухания сейсмических волн коррелируют с геологическими и геофизическими характеристиками региона, при этом затухание зависит в первую очередь от сейсмической активности и теплового потока региона. Геологическая неоднородность среды и возраст консолидации коры являются факторами второго порядка.

Расчет внутреннего затухания (Qi) и затухания вследствие рассеяния сейсмических волн на неоднородностях среды (Qsc) показал, что для всех трех регионов наибольший вклад в общее затухание дает внутреннее затухание.

В работе использовались каталоги и бюллетени землетрясений, составленные Байкальским филиалом ФИЦ ЕГС РАН (http://seis-bykl.ru).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Иркутской области (проект № 14-45-04157-р Сибирь а).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Zeng Y. Compact solutions for multiple scattered wave energy in time domain // Bulletin of Seismological Society of America. 1991. V. 81. P. 1022–1029.

2. Wennerberg L. Multiple-scattering interpretation of coda-Q measurements // Bulletin of Seismological Society of America. 1993. V. 83. P. 279-290.

3. Abubakirov I.R., Gusev A.A. Estimation of scattering properties of lithosphere of Kamchatka based on Monte-Carlo simulation of record envelope of a near earthquake // Physics of Earth and Planetary Interiors. 1990. V. 64. P. 52–67.

4. Hoshiba M. Simulation of multiple scattered coda wave excitation based on the energy conservation law // Physics of Earth and Planetary Interiors. 1991. V. 67. P. 123–136.

5. Mayeda K., Koyanagi S., Hoshiba M., Aki K., Zeng Y. A comparative study of scattering, intrinsic, and coda Q-1 for Hawaii, Long Valley, and central California between 1.5 and 15.0 Hz // Journal of Geophysical Research. 1992. V. 97(B5). P. 6643–6659.

6. Aki K., Chouet B. Origin of the coda waves: source, attenuation and scattering effects // Journal of Geophysical Research. 1975. V. 80. P. 3322–3342.

7. Rautian T.G., Khalturin I. The use of coda for determination of the earthquake source spectrum // Bulletin of Seismological Society of America. 1978. V. 68. P. 923–948.

8. Копничев Ю.Ф. Новые данные о строении верхней мантии Байкальской рифтовой системы // Доклады Академии наук. 1991. Т. 325, № 5. С. 944–949.

9. Pulli J.J. Attenuation of coda waves in New England // Bulletin of Seismological Society of America. 1984. V. 74. P. 1149–1166.

10. Dobrynina A.A., Sankov A.V, Chechelnitsky V.V., Déverchère J. Spatial changes of seismic attenuation and multiscale geological heterogeneity in the Baikal Rift and surroundings from analysis of coda waves // Tectonophysics. 2016. V. 675. P. 50–68. doi: 10.1016/j.tecto.2016.03.010.

11. Аптикаева О.И., Копничев Ю.Ф. Тонкая структура литосферы и астеносферы Гармского района и ее связь с сейсмичностью // Доклады Академии наук СССР. 1991. Т. 317, № 2. С. 326–330.

12. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня // Физика Земли. 2003. № 7. С. 35–47.

### SPATIAL VARIATIONS OF SEISMIC WAVE ATTENUATION IN THE LITHOSPHERE OF THE BAIKAL RIFT SYSTEM AND THEIR RELATIONSHIP WITH GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE MEDIUM

A.A. Dobrynina<sup>1, 2</sup>, V.A. Sankov<sup>1, 3</sup>, V.V. Chechelnitsky<sup>4</sup>, J. Déverchère<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Geological Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

<sup>3</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>4</sup> Baikal Branch of the Geophysical Survey, the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>5</sup> Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), Université de Bretagne Occidentale (UBO), Domaines Océaniques - UMR 6538, Place Copernic, 29280-Plouzané, Brest, France

Abstract. The values have been obtained for seismic wave attenuation in the lithosphere and upper mantle of the Baikal rift system. The records of direct and coda-waves from 274 regional earthquakes provided a basis for calculating seismic quality factor  $(Q_C)$ , frequency parameter (n), attenuation coefficient  $(\delta)$ , and total attenuation  $(Q_T)$ ; estimations have also been obtained for the contribution made by two attenuation components – intrinsic attenuation  $(Q_i)$  and scattering attenuation (Qsc) – in total attenuation. Lateral variations of seismic wave attenuation correlate with geological and geophysical characteristics of the region, with attenuation primarily dependent on regional seismic activity and heat flow. Geological inhomogeneity and the age of crustal consolidation are the second-order factors. Estimation of intrinsic attenuation (Qi) and scattering attenuation (Qsc) values has shown that the largest contribution to total attenuation comes from intrinsic attenuation.

Keywords: Baikal rift system; quality factor; coda-waves; attenuation; intrinsic attenuation; scattering attenuation

\*\*\*

УДК 550.34

# ОБЗОР СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУРИЛО-ОХОТСКОГО И ЯПОНСКОГО РЕГИОНОВ ЗА 2001–2016 ГОДЫ

## Т.К. Злобин, А.Ю. Полец

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Аннотация. В последнее время во всем мире наблюдается увеличение сейсмической активности. В работе представлен обзор сильнейших землетрясений, произошедших в Курило-Охотском и Японском регионах в начале XXI в., с 2001 по 2016 г.: катастрофическое землетрясение Токачи-оки 2003 г. ( $M_W$ =8.3), юго-восток о. Хоккайдо, Япония; катастрофические Симуширские землетрясения 2006 и 2007 гг. ( $M_W$ =8.3 и  $M_W$ =8.1, соответственно), Россия; Великое Японское землетрясение Тохоку ( $M_W$ =9.0), восточное побережье о. Хонсю, Япония; сильнейшее глубокофокусное Охотоморское землетрясение 2013 г. ( $M_W$ =8.3), западное побережье полуострова Камчатка, Россия, и сильное глубокофокусное землетрясение у Бонинских островов 2015 г. ( $M_W$ =7.9), Япония. Анализ сильнейших сейсмических событий Курило-Охотского и Японского регионо также указывает на повышение тектонической активности Земли, и в ча-

стности на повышение тектонической активности Тихоокеанской плиты, в исследуемых регионах. Повышение тектонической активности планеты, связанное с активностью литосферных плит, видимо, обусловлено глубинными процессами на границе нижней мантии и ядра или изменением скорости вращения Земли. *Ключевые слова:* Курило-Охотский регион, Японский регион, землетрясение

В начале XXI в. в Курило-Охотском и Японском регионах произошел целый ряд сильных землетрясений (рисунок). В Курило-Охотском регионе - Симуширские землетрясения 15.11.2006 Г., *M*<sub>w</sub>=8.3, 13.01.2007 г., *M*<sub>w</sub>=8.1 [1-4, 7] и глубокое Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г., M<sub>w</sub>=8.3 [6]. В Японском регионе – землетрясение Токачиоки 25(26).09.2003 г., Mw=8.1, северная часть Японского региона, близ острова Хоккайдо, мегаземлетрясение Тохоку 11.03.2011 г., *М*<sub>W</sub>=9.0, восточное побережье острова Хонсю 11.03.2011 г. [8, 9] и глубокофокусное землетрясение 30.05.2015 г. с моментной магнитудой M<sub>w</sub>=7.9, район Бонинских островов (префектура Токио).

Курило-Охотский регион. Землетрясениядуплеты 2006 и 2007 гг. на Средних Курилах, район о-ва Симушир, произошли одно за другим с интервалом около трех месяцев. Первое из Симуширских событий, 15.11.2006 г., обусловлено пологим надвигом (рисунок) в западной прикурильской части сейсмофокальной зоны (СФЗ). После вышеназванного пологого надвига 13.01.2007 г. произошел сброс (рисунок) в центральной части СФЗ под осью глубоководного желоба на расстоянии 90–100 км. Сопоставление местоположения очагов землетрясений с тектоникой района показало их соответствие зонам региональных разломов и областям аномального строения земной коры.

Следующим сильным землетрясением в регионе явилось глубокое Охотоморское землетрясение 24 мая 2013 г. Очаг располагался на глубине h=608.9±6.2 км в верхней мантии в северовосточной части Охотского моря, вблизи западного побережья полуострова Камчатка. По данным USGS NEIC [11], координаты его эпицентра  $\phi$ =54.874 °с.ш.,  $\lambda$ =153.281 °в.д., моментная магнитуда  $M_W$ =8.3. Землетрясение 24.05.2013 г. являлось сильнейшим глубокофокусным землетрясением за весь период сейсмологических наблюдений не только в Охотоморском регионе, но и в мире. Механизм очага сброс (рисунок). Уникальность события 24.05.2013 г. проявилась в дальности регистрации колебаний на эпицентральных расстояниях до 9470 км. Причинами подобного макросейсмического эффекта, по нашему мнению, были, прежде всего, большая магнитуда землетрясение (8.3), глубина очага (609 км) и его положение в тонких слоях верхней мантии.



Карта эпицентров сильнейших землетрясений Курило-Охотского и Японского регионов с 2001 по 2016 г. [10].

Японский регион. Сильное землетрясение Токачи-оки произошло 25(26) сентября 2003 г. на юговостоке от Хоккайдо, около мыса Эримо на глубине 28.2 км. В результате землетрясения два человека погибли и свыше 400 получили ранения. Механизм очага землетрясения Токачи-оки – пологий надвиг (рисунок).

11 марта 2011 г. восточнее о. Хонсю произошло одно из мощнейших в истории Японии землетрясений магнитудой 9.0, относящееся к классу мегасобытий. Механизм очага – пологий надвиг (рисунок). Землетрясение сопровождалось катастрофическим по своим последствиям цунами. Высота волн достигала 10-15 м, в отдельных пунктах - 20 м. В результате мегаземлетрясение Тохоку и вызванное им цунами привели к гибели более 26 тыс. человек, взрыву реактора атомной станции в провинции Фукусима, затоплению и радиоактивному заражению побережья Японии и другим последствиям, которые полностью не ликвидированы до сих пор. Изучение напряженного состояния региона перед землетрясением Тохоку показало, что очаг землетрясения находился в области сочленения участков коры с высоким и низким уровнем эффективного давления, в зоне максимального градиента напряжений [8, 9].

30 мая 2015 г. у Бонинских островов (или островов Огасавара) в Тихом океане произошло силь-

ное глубокофокусное землетрясение с моментной магнитудой  $M_{\rm W}$ =7.9. Эпицентр подземных толчков находился в акватории Тихого океана у побережья японского острова Титидзима, примерно в 1000 км к югу от Токио. Очаг землетрясения залегал на глубине 680.7 км [10]. Механизм очага – сброс (рисунок). Землетрясение было очень мощным и ощущалось практически на всей территории Японии, в Южной Корее и юго-восточных регионах Китая.

Рассмотренные землетрясения в Курило-Охотском и Японском регионах свидетельствуют о повышении тектонической активности Земли в последнее время. Повышение тектонической активности планеты связано с активностью литосферных плит, и в частности с повышением тектонической активности Тихоокеанской плиты, двигающейся со скоростью около 80 мм/год на запад под Евразийский материк. Тектоническая активность плит, в свою очередь, видимо, обусловлена глубинными процессами в ядре, мантии и между ним или изменением скорости вращения Земли, а также другими причинами, названными нами в работе [5].

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15–05–08903\_а) и гранта Президента РФ (проект № МК– 6640.2015.5).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Злобин Т.К., Левин Б.В., Полец А.Ю. Первые результаты сопоставления катастрофических Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. (М=8.3) и 13 января 2007 г. (М=8.1) и глубинного строения земной коры Средних Курил // Доклады РАН. 2008. Т. 420, № 1. С. 111–115.

2. Злобин Т.К., Поплавская Л.Н., Полец А.Ю. Серия сильных и катастрофических Симуширских землетрясений 2006–2009 годов: основные особенности и сейсмотектоника очаговых зон // Доклады РАН. 2009. Т. 428(4). С. 531–535.

3. Злобин Т.К., Полец А.Ю. Геодинамические процессы и природные катастрофы: классификация, проявления в литосфере Курило-Сахалинского региона // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31, № 6. С. 97–108.

4. Злобин Т.К., Полец А.Ю. Особенности пространственно-временных распределений очагов сильных землетрясений и типов сейсмодислокаций перед катастрофическими Симуширскими землетрясениями 2006–2007 гг. // Доклады РАН. 2013. Т. 450, № 4. С. 460–464.

5. Злобин Т.К. Геодинамические процессы и природные катастрофы: Учебное пособие. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2014. 232 с.

6. Злобин Т.К., Полец А.Ю. Возможные причины макросейсмических проявлений Охотоморского землетрясения 24.05.2015 г. (Мw=8.3) // Всероссийская научная конференция с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска». Владивосток: Дальнаука, 2015. Т. 1. С. 92–95.

7. Полец А.Ю., Злобин Т.К. Реконструкция тектонических напряжений до и после катастрофических Симуширских землетрясений 2006 и 2007 гг. // Доклады РАН. 2012. Т. 445, № 1. С. 90–93.

8. Полец А.Ю. Реконструкция параметров поля тектонических напряжений перед Японским землетрясением 11 марта 2011 г. // Вестник ДВО РАН. 2013. № 3. С. 26–31.

9. Ребецкий Ю.Л., Полец А.Ю. Напряженное состояние литосферы Японии перед катастрофическим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 2. С. 469–506.

10. Global CMT. Global Centroid Moment Tensor. http://www.global.org/.

11. NEIC. National Earthquake Informational Center. http://erthquake.usgs.gov/earthquakes/search/.

# 2001–2016 SURVEY OF THE LARGEST EARTHQUAKES OF THE KURIL-OKHOTSK AND JAPAN REGIONS

### T.K. Zlobin, A.Yu. Polets

Institute of Marine Geology and Geophysics, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Abstract. Over the last years, there has been a global increase in seismic activity. The paper deals with the largest earthquakes in the Kuril-Okhotsk and Japan regions since the beginning of the XXI century (from 2001 to 2016): the catastrophic 2003 Tokachioki earthquake ( $M_W$ =8.3), southeast of Hokkaido, Japan; the catastrophic 2006 and 2007 Simushir earthquakes ( $M_W$ =8.3 and  $M_W$ =8.1, respectively), Russia; the 2011 Great Japan earthquake, or the Tohoku earthquake ( $M_W$ =9.0), the east coast of Honshu, Japan; the largest ever recorded 2013 deep Okhotsk earthquake ( $M_W$ =8.3), the west coast of the Kamchatka Peninsula, Russia, and the largest 2015 deep-focus earthquake at the Bonin Islands ( $M_W$ =7.9), Japan. Analysis of the largest seismic events that have occurred in the Kuril-Okhotsk and Japan regions since the beginning of the XXI century also shows an increase in the Earth's tectonic activity and, in particular, an increase in tectonic activity of the Pacific plate within the studied regions. An increase in the Earth's tectonic activity due to movement of the lithospheric plates is supposedly associated with deep-seated processes at the core-mantle boundary or changes in the Earth's rotational rate. *Keywords:* Kuril-Okhotsk Region, Japan Region, earthquake

\*\*\*

УДК 550.348.436

# О ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СВЯЗИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ЭЛЕМЕНТАМИ НОВЕЙШЕЙ СТРУКТУРЫ НА ЮГО-ВОСТОЧНОМ ФЛАНГЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЯСА ЧЕРСКОГО

Л.Ю. Калинина<sup>1, 2</sup>, В.Н. Смирнов<sup>1, 2</sup>, Н.К. Гайдай<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан, Россия <sup>2</sup> Северо-Восточный государственный университет, Магадан, Россия

Аннотация. Представлены результаты количественного анализа связи сейсмичности с элементами новейшей структуры юго-восточной части сейсмического пояса Черского, основанного на сопоставлении нормированных показателей сейсмической активности с относительной амплитудой поднятия или опускания блоков поперек разлома. Установлено, что в пределах участков с определенными значениями относительных амплитуд может происходить разное количество землетрясений различных энергетических классов, но выделившаяся сейсмическая энергия остается величиной постоянной для данного значения относительной амплитуды.

Ключевые слова: землетрясение, элемент новейшей структуры, относительная амплитуда поднятия блоков

Для понимания закономерностей возникновения и пространственного распределения землетрясений важно выявление связи сейсмичности с неотектонической структурой региона. В пространственном размещении землетрясений решающую роль играют кайнозойские орогенические движения и структуры и в первую очередь неотектонические разломы, многие из которых проявляют признаки сейсмической активности и в настоящее время.

В данной работе представлены результаты количественного анализа связи землетрясений с элементами новейшей структуры юго-восточной части сейсмического пояса Черского, ограниченного координатами 58.5-65.0 °с.ш. и 145-158 °в.д. (рис. 1).

Сейсмическая активность территории рассматривалась за период с 1968 (год создания сети сейсмостанций на территории Магаданской области) по февраль 2013 г. Пространственно-энергетические параметры землетрясений получены на основании каталогов Геоинформационной системы «Сейсмичность Магаданской области» [1, 2], первичными материалами которой являлись данные Магаданского филиала Геофизической службы РАН.



Рис. 1. Неотектоническая карта района исследования. *1* – относительная амплитуда новейших движений блоков поперек разлома (штрихи направлены в сторону опускания блоков); 2 – разрывные нарушения.

За данный период на рассматриваемой территории зарегистрировано более 4300 землетрясений различных энергетических классов. Однако для значительной части землетрясений малых энергетических классов координаты эпицентров определены с большими ошибками, что вносит существенную погрешность и при определении показателей сейсмичности территории, поэтому при количественном анализе учитывались только землетрясения энергетического класса  $K \ge 8$  [3]. Землетрясений энергетического класса  $K \ge 8$  зарегистрировано 3031, из них 140 – сейсмические события энергетического класса  $K \ge 11$ .

Основой исследования является карта неотектоники северо-востока России, составленная В.Н. Смирновым. На карте показаны изолинии суммарных амплитудных новейших движений (в сотнях метров), а также крупнейшие активные разломы региона. Среди рассматриваемых неотектонических разломов выделяют новообразованные, наложенные на предшествующий структурный план, и древние разрывные структуры, играющие существенную роль в геологическом строении территорий и унаследованно активизированные на новейшем этапе [4– 6].

Методика исследования включала несколько этапов. На первом этапе определялись изменения поперечной амплитуды новейших тектонических движений вдоль разлома. Для этого вдоль разлома на основании изолиний суммарных тектонических движений определялись относительные амплитуды поднятия или опускания блоков поперек разлома  $\Delta h$ (рис. 1). При количественном анализе рассматривались наиболее крупные (рельефообразующие) разломы, вдоль которых относительные амплитуды движений блоков максимальны. Значения  $\Delta h$  изменяются от 0 до 11 сотен метров. Наибольшее количество блоков (51) характеризуются минимальной относительной амплитудой поднятий (или опусканий) ( $0 \le \Delta h \le 1$  ( $\cdot 100$  м)), значительно меньше (9) блоков имеют амплитуду  $\Delta h \ge 9$  (·100 м).

На втором этапе карта неотектоники региона с относительными амплитудами новейших движений блоков поперек разлома соотносилась со схемой пространственного распределения эпицентров землетрясений, после чего определялись количество (N) и энергия землетрясений (E), приуроченных к участкам разломов с конкретным значением  $\Delta h$ . При этом землетрясение учитывалось в количественных расчетах, если его эпицентр располагался в пределах 10 км от осевой линии разлома. Всего в пределах рассмотренных зон зафиксировано 866 землетрясений энергетического класса  $K \ge 8$ . Максимальное количество (531) – это землетрясения энергетического класса  $8 \le K < 9$ .

Далее определялись нормированные значения показателей сейсмической активности. те количество lg энергии землетрясений, и приходящихся на один блок с определенным значением  $\Delta h$ . Значения данных величин определялись по формулам:

$$\delta N = \frac{N}{n}; \ \delta E = \frac{1}{n} \lg \sum_{i=1}^{N} E_i , \qquad (1)$$

где  $N, E_i$  – соответственно, число и энергия землетрясений, эпицентры которых расположены в пределах участков (блоков) с определенными значениями  $\Delta h, n$  – количество данных участков.

Полученные таким образом распределения нормированных количества ( $\delta N$ ) и логарифма энергии землетрясений ( $\delta E$ ) по участкам с определенными значениями  $\Delta h$  представлены на рис. 2.



Рис. 2. Распределение нормированных значений количества ( $\delta N$ ) (A) и lg энергии землетрясений ( $\delta E$ ) (E) по участкам с определенными значениями  $\Delta h$ .

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

Значения нормированного числа землетрясений  $\delta N$  не зависят от величины относительной амплитуды поднятия или опускания блоков поперек разлома  $\Delta h$  (рис. 2, A).

Выявлена зависимость нормированного значения lg энергии землетрясений ( $\delta E$ ) от амплитуды  $\Delta h$ .  $\delta E$  увеличивается с ростом  $\Delta h$ , принимая максимальное значение на участках  $7 \leq \Delta h < 9$  (·100 м), вновь снижаясь при дальнейшем увеличении  $\Delta h$ . Данная зависимость практически одинакова для землетрясений разных энергетических классов (рис. 2, *Б*).

Таким образом, в пределах участков с определенными значениями относительных амплитуд вертикальных смещений блоков поперек разлома может происходить разное количество землетрясений различных энергетических классов, но выделившаяся сейсмическая энергия остается величиной, постоянной для данного значения Δh.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15–05–05055).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шарафутдинов В.М. Разработка и формирование геоинформационной системы «Сейсмичность Магаданской области», возможности ее применения // Геоинформатика. 2009. № 3. С. 52–56.

2. Шарафутдинов В.М., Малиновский С.Б. Свидетельство о государственной регистрации Геоинформационной системы «Сейсмичность Магаданской области» № 2011615022. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2011.

3. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстояниях до 3000 км // Труды ИФЗ АН ССР. 1964. № 32 (199). С. 88–93.

4. Калинина Л.Ю., Смирнов В.Н., Кондратьев М.Н. Анализ пространственной связи землетрясений с сетью рельефообразующих разрывных нарушений на юго-западном фланге сейсмического пояса Черского // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2013. № 3. С. 18–23.

5. Смирнов В.Н., Глушкова О.Ю. Неотектоника и сейсмическая активность бассейна верхнего течения р. Колымы // Геофизические модели геологических процессов на северо-востоке России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1996. С. 122–134.

6. Смирнов В.Н. Активные структуры и сейсмичность Охотско-Колымского региона // Строение, геодинамика и металлогения Охотского региона и прилегающих частей Северо-Западной Тихоокеанской плиты: Материалы международного симпозиума. Южно-Сахалинск, 2002. С. 236–240.

# ABOUT SPATIAL RELATIONSHIP BETWEEN EARTHQUAKES AND NEOSTRUCTURAL ELEMENTS ON THE SOUTHEASTERN FLANK OF THE CHERSKY SEISMIC BELT

L.Yu. Kalinina<sup>1, 2</sup>, V.N. Smirnov<sup>1, 2</sup>, N.K. Gaidai<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> North-East Interdisciplinary Science Research Institute, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia

<sup>2</sup> North-East State University, Magadan, Russia

*Abstract.* Presented here are the results of the quantitative analysis of the relationship between seismicity and neostructural elements on the southeastern flank of the Chersky seismic belt, based on comparison of normalized seismic activity indicators with relative amplitude of uplift or subsidence of blocks across the fault. It has been found that the areas with certain relative amplitudes may experience different number of earthquakes of different energy classes, though the released seismic energy remains constant for the relative amplitude.

Keywords: earthquake, neostructural element, relative amplitude of block uplift

\*\*\*

УДК 550.34

# ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЮЖНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ

В.В. Ковалевский<sup>1</sup>, Ц.А. Тубанов<sup>2</sup>, А.Г. Фатьянов<sup>1</sup>, Л.П. Брагинская<sup>1</sup>, А.П. Григорюк<sup>1</sup>, А.Д. Базаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия <sup>2</sup> Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Ключевые слова: активная сейсмология, сейсмовибратор, математическое моделирование

Приведены результаты исследований характеристик волнового поля сейсмовибратора Южнобайкальского полигона на 500-километровом региональном профиле: Бабушкин–Сухэ-Батор–Дархан– Улан-Батор. Выполнено математическое моделирование волнового поля на профиле регистрации для сравнения с экспериментом и верификации существующей скоростной модели земной коры Прибайкалья и Северной Монголии. Приведены результаты анализа вариаций волнового поля и времен вступления волн при многолетнем вибросейсмическом мониторинге Байкальской рифтовой зоны с использованием виброисточника ЦВО-100. Выполнена коррекция сезонных изменений сейсмограмм, и исследованы вариации времен вступлений для трасс вибратор – сейсмостанция Тырган и вибратор – сейсмостанция Хурамша.

# VIBROSEISMIC RESEARCH IN SOUTH BAIKAL

V.V. Kovalevsky<sup>1</sup>, Ts.A. Tubanov<sup>2</sup>, A.G. Fatyanov<sup>1</sup>, L.P. Braginskaya<sup>1</sup>, A.P. Grigoryuk<sup>1</sup>, A.D. Bazarov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Geological Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

*Abstract.* Presented here are the research results for the characteristics of the wave field generated by the seismic vibrator at the South Baikal test site along a 500-km regional profile: Babushkin–Sukhe-Bator–Darkhan–Ulaanbaatar. Mathematical modeling has been made for the wave field along the recording profile for comparing with the experiment and verifying the existing crustal velocity model for Pribaikalye and North Mongolia. Consideration is being given to the analysis results for the wave field varia-

tions and wave arrival times from the multi-year vibroseismic monitoring of the Baikal rift zone with the use of vibration source TSVO-100. Seasonal variations in seismograms have been corrected and arrival time variations have been studied for the «vibra-tor–seismic station Tyrgan» and «vibrator–seismic station Khuramsha» traces. *Keywords*: active seismology, seismic vibrator, mathematical modeling

\*\*\*

УДК 550.344+550.34

# НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ *S*-ВОЛН И КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Ю.Ф. Копничев<sup>1</sup>, И.Н. Соколова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт геофизических исследований МЭ РК, Алматы, Казахстан

Ключевые слова: поле поглощения S-волн, кольцевая структура сейсмичности

Рассматривается корреляция между неоднородностями поля поглощения *S*-волн и кольцевыми структурами сейсмичности в районе Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Поглощение в литосфере оценивалось по отношению амплитуд в волнах *Sn* и *Pn*. Обработано около 140 записей землетрясений, полученных станцией ULN на расстояниях ~400–1300 км. Выделены зоны высокого поглощения на крайнем юго-западе и северо-востоке оз. Байкал. Самая большая область промежуточного поглощения, расположенная в рифтовой зоне, находится в центральной части озера. После 1975 г. в районе БРЗ сформировались три кольцевые структуры сейсмичности с пороговыми значениями магнитуды  $M\pi$ =4.2–4.7. Эти структуры проходят через зоны повышенного и промежуточного поглощения в районе оз. Байкал. По размерам колец сейсмичности (L=150–310 км) и величинам  $M\pi$  оценены магнитуды возможных сильных землетрясений в областях кольцевых структур.

## HETEROGENEITIES OF S-WAVE ATTENUATION FIELD AND RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES NEAR THE BAIKAL RIFT ZONE: THE PROBABILITY OF LARGE EARTHQUAKES

Yu.F. Kopnichev<sup>1</sup>, I. N. Sokolova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Physics of the Earth, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Geophysical Research ME RK, Almaty, Kazakhstan

*Abstract.* Consideration is being given to the correlation between heterogeneities of *S*-wave attenuation field and ring-shaped seismicity structures near the Baikal rift zone (BRZ). Attenuation in the lithosphere has been estimated using Sn/Pn amplitude ratios. The processing has been done to about 140 seismograms recorded at ULN at distances of ~400-1300 km. High attenuation zones have been identified in the extreme southwest and northeast of Lake Baikal. The largest area of intermediate attenuation in the rift zone is located in the central part of the lake. Three ring-shaped seismicity structures with threshold magnitude values Mt=4.2-4.7 have been formed in the BRZ since 1975. These structures pass through the zones of high and intermediate attenuation near Lake Baikal. Based on dimensions of the longer axes of the seismicity rings (L=150-310 km) and Mt values, the magnitudes of probable large earthquakes have been estimated within the ring-shaped structures ( $M_w=6.8-7.2$ ). *Keywords:* S-wave attenuation field, ring-shaped seismicity structure

\*\*\*

УДК 551.243:553.065.2

# ВЛИЯНИЕ ПАЛЕОСЕЙСМОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЗОНАХ ДИСЛОКАЦИЙ

А.А. Котов, В.Ю. Прокофьев, Т.М. Злобина, К.Ю. Мурашов

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

Аннотация. На примере золоторудного месторождения Вернинское-Первенец, размещенного в зоне сдвиго-надвиговых дислокаций, рассматривается влияние сейсмогенных факторов на формирование структуры при участии флюидов. Модель нелинейного развития системы учитывает параметры нестабильности динамического и флюидного режима, полученные по результатам реконструкции локальных динамических обстановок по рудным прожилкам и изучения флюидных включений.

Ключевые слова: месторождение золота, сейсмический механизм, структура, флюид

Формирование структуры эндогенных месторождений отличается от образования обычных структур, не связанных с процессами гидротермального рудообразования. Появляется все больше данных, указывающих на то, что структуры рудных полей не возникают задолго до отложения в них руд. как считали ранее, а формируются почти одновременно с процессами рудообразования и активно контролируют как перенос, так и отложение рудного вещества. Чаще всего это связано с сейсмическими эффектами. По результатам лабораторного и полевого моделирования получены данные о том, что сейсмические события вызывают поступление воды в систему через несколько минут после генерации сейсмоисточника [1]. Показано, что водный флюид является наиболее активным триггером сейсмического процесса, развивающегося в нелинейном режиме самоорганизующейся критичности с увеличением магнитуды [2]. При изучении жильнопрожилковой структуры месторождения Вернинское-Первенец мы исходили из того, что показателем влияния палеосейсмогенных факторов на процессы ее формирования является нестабильность параметров динамической системы и флюидного режима, адекватная развитию сейсмического процесса. Переменные азимутальных ориентировок главных нормальных векторов деформаций (А, В, С) и напряжений (σ<sub>1</sub>, σ<sub>2</sub>, σ<sub>3</sub>) реконструированы по сопряженным тангенциальным сколам [3], выполненным минеральными индикаторами рудообразования [4]. Процесс прогрессивного деформирования показан на сферограммах в виде изолиний плотности распределения векторов А, В, С (в %). Изолинии рассматриваются нами как фазовые траектории изменения ориентировок векторов деформаций. Тип изменчивости оценивался параметрической статистикой осевого типа [5]. Параметры вида напряженного состояния определялись по вариациям собственных значений  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  матрицы тензора девиатора [6]. В качестве параметров неравновесного развития динамической системы использованы значения коэффициентов асимметрии тензоров k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub> [6]. Состояния флюидного режима характеризуют переменные параметров: температуры, давления, солехимического состава рудообразующих ности флюидов. Они получены при исследовании флюидных включений (ФВ) в жильном кварце, захваченных в процессе минералообразования. Исследования ФВ проводились на установке THMSG-600 фирмы «Linkam». Солевой состав растворов определялся по температурам эвтектик [7], концентрация солей в растворе ФВ – по температурам плавления газогидратов [8]. Концентрации углекислоты и метана в растворе оценивались также из объемных соотношений фаз и плотностей углекислоты и метана в газовой фазе. Давление оценивалось для гетерогенного флюида по пересечению изохоры и изотермы. Оценка концентраций солей и давлений флюида проводилась использованием с программы FLINCOR [9]. Валовый анализ состава флюидов ФВ был выполнен из мономинеральных фракций кварца в ЦНИГРИ (аналитик Ю.В. Васюта) по методике [10]. Методом газовой хроматографии определяли количество воды для расчета концентраций химических элементов в гидротермальном растворе. Анализировались также углекислота, метан и углеводороды. В растворе из водных вытяжек определяли методом ионной хроматографии Cl, SO<sub>4</sub> и F, а методом ICPMS – K, Na, Ca, Mg и другие элементы. Поведение параметров флюидной системы исследовалось по графикам зависимостей: «температура – давление», «температура – соленость», «характер изменения химического состава».

Месторождение Вернинское-Первенец размещено в терригенной песчано-сланцевой толще покровно-складчатого чехла рифеид Бодайбинского синклинория, сформированного в байкальские циклы орогенеза над СВ палеорифтом. Месторождение локализовано в ритмично переслаивающихся метаморфизованных отложениях аунакитской свиты верхнего протерозоя в пределах Вернинской антиклинали. Формирование его структуры обусловлено синрудными деформациями покровно-складчатой толщи, вызванными активизацией глубинных ССЗ разломов основания. Субширотные надвиги по крыльям субширотных складок чехла активизировались в синрудный период в режиме сдвигонадвигов, что вызвало образование пологих и крутопадающих нарушений двух ортогональных дуплексных систем (на фронте сдвиго-надвигов и в пластинах между ними, поперек простирания надвиговой зоны). Сдвиги по нарушениям дуплексных систем сопровождались широким развитием макро- и микротрещин, согласных со сланцеватостью и секущих ее. Контролирует размещение рудных тел разрывная тектоника. 3D-модель морфологии прожилково-вкрапленных рудных тел согласуется с развитием разрывных деформаций [11].

На сферограммах векторы А, В, С деформаций (рис. 1) имеют непрерывное поясное распределение максимумов, согласующееся с простиранием надвигов. Оценки вида напряженного состояния указывают на вариации ориентировок осей А, В, С, а инверсия векторов С и В свидетельствует о возвратной малоамплитудной кинематике в рудный период по стрендам генеральных сдвиго-надвиговых нарушений. Возвратный («маятниковый») механизм качания плана ВС деформаций вокруг пологой оси А обусловил: 1) изменение направления сдвиговой компоненты с левой на правую, 2) вращение (подвороты) надвиговой компоненты, 3) подкачку флюидов в зоны дилатансионной декомпрессии. Асимметрия тензоров напряжений – показатель проявления объемных напряжений на локальном уровне [12]. Ее значения (k<sub>1</sub><k<sub>2</sub><<0, k<sub>1</sub><<k<sub>2</sub><0) в целом невелики, но указывают на наличие объемно распределенных сил, действующих из центра масс флюидного потока на поверхности бортов активного разрывного нарушения.

Фазовый состав флюидов – водно-солевые растворы и газы. Среди солей в растворах преобладали хлориды натрия, магния и железа. Концентрация солей в растворе углекислотно-водных флюидных включений составляет 6.1–4.0 мас. %-экв NaCl. Концентрация углекислоты в рудообразующем флюиде достигала 8.6–1.4 моль/кг р-ра, а метана – 1.0–0.6 моль/кг р-ра. Плотность углекислотноводного флюида 1.05–0.87 г/см<sup>3</sup>. Газовые включения заполнены плотной углекислотой. Гомогенизация углекислоты происходит в жидкую фазу при температурах от +2.1 до +30.8 °C, а ее плавление наблюдается в интервале температур от -56.9 до -64.7 °C, что связано с наличием в ней примесей метана или азота. Плотность газовой фазы достаточно велика и изменяется от 0.54 до 0.92 г/см<sup>3</sup>. Давление, оцененное для гетерогенного флюида, изменяется от 2590 до 720 бар при изменении температуры от 356 до 246 °C (рис. 2, *a*).



Рис. 1. Сферограммы распределения главных нормальных векторов деформаций А, В, С в изолиниях плотности распределения 0.5, 1.1, 1.5, 2.0, 2.5 % на верхней полусфере сетки Шмидта. Число замеров – 63 пары в карьере месторождения Вернинское-Первенец. Здесь вектор А коллинеарный  $\sigma_1$ , В –  $\sigma_2$ , С –  $\sigma_3$ ,  $\sigma_3$  – максимальное сжатие. По дугам большого круга – проекции кварцевых жил и крупных прожилков.



Рис. 2. Диаграммы, характеризующие параметры флюидной системы месторождения Вернинское-Первенец: *a* – «температура – давление»; *б* – «температура – концентрация солей»; *в* – вариации химического состава.



Рис. 3. Золотоносные жилы и прожилки в филлитовых сланцах жильной зоны Первенец. Месторождение Вернинское-Первенец, северная стенка карьера.

Изменение температуры практически не влияет на изменение концентрации солей (рис. 2, б). Большие перепады давлений (1870 бар) и температур (110 °C) флюидной системы – это показатели дилатансионной декомпрессии, на которую указывает также резкое снижение плотности газовой

фазы от 0.92 до 0.54 г/см<sup>3</sup>. Такие явления (скачки параметров) флюидо-динамической системы, вероятно, связаны с достижением критического состояния и проявлением триггерного эффекта флюидов, усилившим процесс сейсмогенного разрушения. Во флюиде среди катионов главную роль выполняет (г/кг H<sub>2</sub>O): Na (6.7–3.1), a K (0.22–0.08), Ca (0.26) и Мд (0.33-0.11) находятся в подчиненном количестве. Установлены заметные количества таких компонентов, как (г/кг H<sub>2</sub>O): Cl<sup>-</sup> (1.2), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (16.5-8.6), CO<sub>2</sub> (265-209) и CH<sub>4</sub> (0.18-0.16), а также В (0.28-0.27) и Br (0.46-0.85). Кроме того, в составе флюида выявлены многие микрокомпоненты. Направление изменчивости химического состава растворов из ФВ приведено на диаграмме (рис. 2, в). Изменчивость химического состава флюида может быть связана с изменением кислотно-щелочного баланса флюидной системы, что соответствует условиям неустойчивого развития процесса в режиме самоорганизации системы, свойственной сейсмическому процессу. Из графиков, характеризующих состояния флюидной системы (рис. 2), и данных по развитию прогрессив-

ных деформаций очевидны выводы о нелинейном совместном развитии этих процессов. При этом набор образованных трещинных структурнопарагенетических ассоциаций отличается от парагенезисов, образованных в соответствии с моделями Риделя [13], Сильвестера [14]. Ранее считалось, что вмещают рудные тела месторождения Вернинское трещины четырех линейных систем. Распределение на сферограммах проекций жил и прожилков, выполняющих трещины (см. рис.1), показывает хаотичное, на первый взгляд, образование трещин, не создающих четко определенных максимумов нормалей. Поясное распределение векторов А, В, С деформаций отражает, в какой-то мере, скольжение по плоскостям нарушений во флюидизированной среде (за счет снижения трения), которое приводит к образованию трещин, часто вергентно расходящихся, быстро заполняющихся флюидами. На всех этапах нелинейного развития сейсмического процесса они сохранились. Жильные тела, выполняющие такие трещины, представлены на рис. 3.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Динамика разрушения моделей геологической среды при триггерном влиянии жидкости // Физика Земли. 2011. № 10. С. 48–63.

2. Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений / Отв. ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 15–43.

3. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.

4. Малиновский Е.П., Чернышев В.Ф. Эндогенные рудные месторождения. М.: Наука, 1980. С. 215–229.

5. Bingham Ch. An antipodally symmetric distribution on the sphere // Annals of Statistics. 1974. V. 2. P. 1201–1225.

6. Bingham Ch., Mardia K. V. A small circle distribution on the sphere // Biometrika. 1978. V. 65. P. 379–389.

7. Борисенко А.С. Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.

8. Collins P.L.P. Gas hydrates in CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity // Economic Geology, 1979. V. 74. P. 1435–1444.

9. Brown P. FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // Amer. Mineralogist. 1989. V. 74. P. 1390–1393.

10. Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Использование метода ICP MS при анализе состава рудообразующих флюидов // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2006. № 4. С. 30–36.

11. Мурашов К.Ю., Котов А.А. 3D моделирование в исследованиях структурного контроля жильной и прожилково-вкрапленной золоторудной минерализации на примере месторождения Вернинское, Восточная Сибирь // Металлогения древних и современных океанов–2014: Материалы XX научной молодежной школы. Миасс: ИМинУрО РАН, 2014. С. 112–116.

12. Николаевский В.Н. Собрание трудов. Геомеханика. Т. 2. Земная кора. Нелинейная сейсмика. Вихри и ураганы. М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2010. 560 с.

13. Riedel W. ZurMechanikgeologischerBrucherschei-nungen // Zbl. Mineralogie, Geol. Und Palaentol. 1929. Abt. B, 30. P. 354–368.

14. Sylvester A.G. Strike-slip faults // Geol. Soc. Amer. Bull.1988. V. 100, № 11. P. 1666–1703.

### THE EFFECT OF PALEOSEISMIC FACTORS ON THE FORMATION OF GOLD ORE DEPOSITS IN FAULT ZONES

### A.A. Kotov, V.Yu. Prokofyev, T.M. Zlobina, K.Yu. Murashov

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Abstract.* The effect of seismic factors on structure formation involving fluids is illustrated by the example of the Verninskoye-Pervenets gold deposit located in the strike-slip and thrust fault zone. Non-linear system evolution model incorporates dynamic and fluid regime instability parameters estimated from local paleogeodynamic reconstructions based on ore veinlets and fluid inclusion data.

Keywords: gold deposit, seismic mechanism, structure, fluid

УДК 550.348.64(571/55)

# ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЮЖНОМ ПРИБАЙКАЛЬЕ В СВЯЗИ С ПОИСКАМИ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

M.H. Лопатин<sup>1</sup>, P.M. Семенов<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия

Аннотация. Приведены результаты по изучению вариаций концентраций растворенного гелия в подземных водах Южного Прибайкалья, обусловленные сейсмическим процессом. В отличие от ранее проведенных подобных исследований, рассмотрены данные, полученные не только в глубинной воде Байкала, но и в артезианских скважинах Южного Прибайкалья. При этом рассчитывались коэффициенты корреляции концентраций между полученными данными в этих пунктах наблюдений, а также индикаторные функции и интегрированная индикаторная функция, которые позволяют объективно оценивать изменения концентраций во времени, обусловленные изменениями напряженно-деформированного состояния земной коры и, как следствие этого, подготовкой очагов землетрясений, и тем самым прогнозировать время возникновения землетрясений.

*Ключевые слова:* Южное Прибайкалье, подземные воды, концентрация растворенного гелия, коэффициент корреляции, интегрированная индикаторная функция, очаг землетрясения, предвестник землетрясения

К настоящему времени известно множество различных геолого-геофизических, гидрогеологических, геодезических и других данных, которые могут использоваться в качестве предвестников землетрясений [1, 2]. Наиболее информативными в этом отношении являются гидрогеохимические исследования. Именно с них еще в 60-х годах прошлого столетия начались широкомасштабные поиски предвестников землетрясений не только в Советском Союзе, но и в других странах. Одними из основных данных стали гидрогеохимические, сыгравшие роль в успешном предсказании известного во всем мире Хайченского землетрясения 1975 г. в Северо-Восточном Китае [3].

Не стало исключением в этом отношении и Прибайкалье - один из наиболее сейсмоактивных регионов на территории России. Подобные исследования здесь начались еще в 70-е годы прошлого столетия, причем гидрогеохимические наблюдения проводились как на естественных очагах разгрузки подземных вод, так и в скважинах. Так, например, накануне Уоянского землетрясения 2 ноября 1976 г. были отмечены изменения концентраций гелия в воде Окусиканского источника, расположенного на юго-восточном склоне Северо-Муйского хребта Байкальской рифтовой зоны [4]. В скважине глубиной 750 м в г. Иркутске было зафиксировано понижение, а затем резкое повышение концентраций гелия за несколько суток перед некоторыми землетрясениями. хотя энергия подземных толчков была невысока, а эпицентральные расстояния до водозабора значительны [5].

Наблюдения за водопроявлением в разведочнодренажной штольне (РДШ) Северо-Муйского тоннеля позволили оценить влияние сейсмической активности на изменение содержания того или иного параметра состава воды [6].

Сравнительная кратковременность тех мониторинговых исследований, а также отсутствие в это время относительно сильных подземных толчков с эпицентрами близ пунктов наблюдений не позволили прийти к сколько-нибудь ощутимым результатам по поиску краткосрочных предвестников землетрясений. С целью поиска предвестников времени возникновения землетрясений, нами с 2005 г. проводятся исследования содержаний растворенного гелия в глубинной воде оз. Байкал. Наблюдения были предопределены тем, что здесь проходит юговосточная часть Главного Саянского разлома, а также разломы Обручевский и Черского, в зоне которых неоднократно происходили как слабые, так и довольно сильные землетрясения. Последнее сильное землетрясение произошло здесь в 2008 г. с M=6.3 и интенсивностью в эпицентре 8 баллов [7, 8].

По полученным данным строились графики изменений концентраций гелия во времени, рассчитывались среднефоновые значения и их среднеквадратичные отклонения. Ранее было установлено, что под временем возникновения предвестника землетрясения понимается временной интервал от начала устойчивого превышения измеряемой гидрогеохимической величиной порога предвестника до момента землетрясения: порог предвестника – два среднеквадратичных отклонения от среднефонового значения гидрогеохимических данных [9-11]. На основании этого подхода был определен предвестник сильного Култукского землетрясения (М=6.3), произошедшего 27 августа 2008г. в акватории Южного Байкала [12, 13]. Тогда за полтора месяца до подземного толчка содержание растворенного гелия в глубинной воде Байкала постепенно снижалось, и за два дня до землетрясения оно опустилось ниже двух среднеквадратичных отклонений его фоновых значений, после чего начался его подъем и произошел основной толчок Култукского землетрясения. В дальнейшем этот предвестник подтвердился еще на нескольких менее сильных землетрясениях Южного Прибайкалья.

Однако дальнейшие исследования показали, что иногда падение концентраций гелия происходит и без подземных толчков.

Поиски гидрогеохимических предвестников в других сейсмоактивных регионах позволили сделать заключение о том, что для более объективной оценки прогноза, наблюдения желательно вести не на одном, а, по крайней мере, на трех пунктах наблюдений, расположенных вдоль разлома в одном направлении к очагу землетрясения [14], причем величины времен предвестников времени возрастают с ростом магнитуд и уменьшаются с ростом эпицентрального расстояния пункта измерения [9]. Более того, достоверность выделения предвестников землетрясений при этом существенно возрастает [15].

С этой целью в Южном Прибайкалье, в отличие от ранее проводимых исследований содержания гелия только в глубинной воде Байкала, мы начали изучать концентрации гелия и их вариации в подземных водах, обусловленные сейсмическими процессами, еще на двух самоизливающихся скважинах, которые расположены от Байкала на расстоянии 30 и 80 км. При анализе полученных данных использовались не абсолютные значения амплитуд концентраций гелия, а их нормированные значения, которые позволяют устранить влияние тензочувствительности при сравнении полученных данных на разных пунктах наблюдений [16]. Необходимым условием при этом должно быть то, чтобы в расчет принимались лишь те землетрясения, условная энергетическая характеристика которых во всех трех пунктах превышала K > 5.0.

Как показали наблюдения за содержанием гелия в подземных водах, на концентрацию гелия помимо напряженно-деформированного состояния земной коры могут влиять и другие факторы, среди которых выделяются «астрономически точные» приливные процессы, «менее точные» - сезонные колебания и «весьма случайные» - колебания, связанные с изменением погоды [10]. Но они, как правило, оказывают краткосрочные изменения в концентрациях гелия, выражающиеся в их единичных отклонениях в сторону повышения или понижения значений содержаний. В связи с этим было предложено удалять одиночные выбросы высокоградиентных вариаций и тем самым приводить последовательности временных отсчетов к равномерной дискретности [17]. Колебания концентраций, связанные с вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры, обычно продолжаются в течение определенного времени, а влияние случайных факторов на вариации гелия исключается путем расчетов индикаторных функций при обработке полученных данных.

В ходе проведенных исследований была выполнена оценка коэффициентов корреляции показаний концентрации гелия между пунктами измерения Листвянка – Зеленый Мыс, Листвянка – К-ГИС и Зеленый Мыс – К-ГИС, а также парных индикаторных функций и интегрированной индикаторной функции.

По сути, индикаторные функции – это текущие значения коэффициента корреляции, отличающиеся тем, что  $\tilde{m}$  и  $\tilde{\sigma}$  вычислены для них по всей выборке измерений, а не для окна. Индикаторные функции показывают взаимосвязь между точками измерения концентрации гелия, они не зависят от погодных, сезонных и других случайных факторов, действующих на каждую точку измерения концентрации гелия независимо друг от друга. Физический смысл индикаторных функций заключается в том, что количественно они обратно пропорциональны интенсивности сейсмотектонических процессов на

территории, охваченной наблюдениями. Три пункта измерения концентрации гелия в подземных водах в Южном Прибайкалье образуют единую измерительную систему, своеобразный «манометр» с базой измерения длиной примерно 80 км.

Согласно анализу сейсмической обстановки в Южном Прибайкалье, пожалуй, наибольший теоретический и практический интерес представляет парная индикаторная функция  $I_{JI-3}(\Delta t_i)$ . Наблюдения за этой функцией в период с 24.01.2008 г. по 20.06.2008 г. позволили выделить несколько периодов, когда отрицательные значения этой функции представлены в виде четко выраженных треугольных импульсов со средней продолжительностью примерно 20-30 суток. В целом эти импульсы отражают колебания концентраций гелия, связанные с вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры (повышения давления и дилатансии), и свидетельствуют о накоплении энергии в очаге будущего землетрясения. Однако признаками сильных землетрясений они не являются. Их отличительной чертой можно считать малое значение интегрированной индикаторной функции  $I(\Delta t_i)$ , которое в редких случаях достигает 1.

Результаты наблюдения показывают, что среднесрочным признаком сильных землетрясений в зоне наблюдения за концентрацией гелия в подземных водах являются большие (более 2.5) показания интегрированной индикаторной функции  $I(\Delta t_i)$  на протяжении не менее месяца.

С начала наблюдения 24.01.2008 г. и до 16.06.2008 г. в Южном Прибайкалье была спокойная сейсмическая обстановка, хотя в очаге будущего землетрясения отмечалось накопление тектонических напряжений. Об этом свидетельствуют формы кривых парной индикаторной функции  $I_{\Pi-3}(\Delta t_i)$  и интегрированной индикаторной функции  $I(\Delta t_i)$ , обусловленные изменением напряженнодеформированного состояния земной коры. С 16.06.2008 г. продолжилось повышение напряжений в земной коре и в очаге будущего землетрясения; согласно дилатантно-диффузионной модели образовалась зона трещинной дилатансии. Вследствие этого произошло снижение тектонических напряжений, а величина интегрированной индикаторной функции  $I(\Delta t_i)$  стала нарастать и 01.07.2008 г. за 57 дней до Култукского землетрясения достигла абсолютного максимума ( $I(\Delta t_i)=3.5884$ ).

После этого напряжения в земной коре и в очаге будущего землетрясения вновь стали нарастать и 27.07.2008 г. достигли локального максимума, а интегрированная индикаторная функция – минимума  $(I(\Delta t_i)=1.0221)$ .

Можно предположить, что после этого напряжения в земной коре продолжали возрастать и достигли предела прочности горных пород еще на одном участке очага будущего землетрясения, что привело к повторному возрастанию интегрированной индикаторной функции  $I(\Delta t_i)$ , которая 04.08.2008 г. достигла значения 3.1179.

Синхронно с интегрированной индикаторной функцией  $I(\Delta t_i)$  изменялась парная индикаторная функция  $I_{\Pi-3}(\Delta t_i)$ , которая 01.08.2008 г. достигла своего абсолютного максимума 5.6143 за весь пери-

од наблюдений. Эти данные можно принимать за предвестник близкого по времени разрыва горных пород в очаге будущего землетрясения.

08.08.2008 г. началось новое нарастание напряжений в очаге готовящегося землетрясения, которые достигли максимума 24.08.2008 г. В этой точке, которую можно рассматривать как самый мощный импульс растяжения за весь период наблюдений, индикаторная функция  $I_{\Pi-3}(\Delta t_i)$  составила 1.8616, а нормированное показание гелия в этой точке  $H_{\Pi 602} / \tilde{m}_{H_{\pi}}$  составило 0.89051.

За день до землетрясения краткосрочный признак  $H_{\pi 604} / \tilde{m}_{H_{\pi}}$  достиг своего минимума, равного 0.82029, начиная с 01.07.2008 г. 27.08.2008 г. произошел разрыв горных пород в южной части Байкала, сопровождающийся землетрясением с М=6.3.

Как показал анализ наблюдения за выделением гелия перед Култукским землетрясением, максимум интегрированной индикаторной функции в точке измерения 548  $I(\Delta t_i)$  составил 3.6450, и мог быть получен за 52 дня до землетрясения, что дало бы гарантированный среднесрочный прогноз сильного землетрясения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14–05–00245).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Rikitake I. Classification of earthquake precursors // Tectonophysics. 1979. V. 54. P. 293-309.

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

3. Haicheng earthquake 1975.2.4. Shenyong, 1982. 80 p.

4. Киссин И.Г., Пиннекер Е.В., Ясько В.Г. Подземная гидросфера и сейсмические процессы // Основы гидрогеологии. Новосибирск: Наука, 1982. С. 57–77.

5. Пиннекер Е.В., Ясько В.Г., Шкандрий Б.О. Результаты изучения гидрогеологических предвестников землетрясений в Байкальской рифтовой области // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. С. 259– 265.

6. Шабынин Л.Л. Гидрогеологические условия Северо-Муйского тоннеля БАМ. Иркутск: ИрГТУ, 2004. 94 с.

7. Семенов Р.М., Имаев В.С., Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Оргильянов А.И. Сильное землетрясение на Байкале 27 августа 2008 г. (геологические условия его возникновения, предвестники и макросейсмические последствия) //

кале 27 августа 2008 Г. (Геологические условия его возникновения, предвестники и макроссисмические последствия) // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 1 (21). С. 51–56.

8. Semenov R.M. Earthquake of 27 August 2008 in the Southern Baikal area and its precursors // Geodynamics & Tectonophysics. 2010. V. 1, № 4. P. 441–447.

9. Зубков С.И. Времена возникновения предвестников землетрясений // Физика Земли. 1987. № 5. С. 87–91.

10. Барсуков В.Л., Беляев А.А., Серебренников В.С. Вестники беды (о поиске средств геохимического прогноза землетрясений). М.: Наука, 1989. 136 с.

11. Барсуков В.Л., Беляев А.А., Бакалдин Ю.А., Игумнов В.А., Ибрагимова Т.Л., Серебренников В.С., Султанходжаев А.Н. Геохимические методы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1992. 213 с.

12. Семенов Р.М., Имаев В.С., Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Оргильянов А.И. Гелий в глубинной воде Байкала – предвестник землетрясений // Доклады академии наук. 2010. Т. 432, № 4. С. 533–536.

13. Семенов Р.М., Смекалин О.П. Сильное землетрясение на Байкале 27 августа 2008 г. и его предвестники // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 4. С.521–528.

14. Султанходжаев А.Н. Гидрогеосейсмологические предвестники землетрясений // Узб. геол. журнал. 1979. № 2. С. 3–13.

15. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты / Отв. ред. Ю.Г. Леонов. М.: Наука, 2009. 328 с.

16. Киссин И.Г. Высокоамплитудные предвестники землетрясений и «чувствительные зоны» земной коры // Физика Земли. 1988. № 6. С. 3–13.

17. Рябинин Г.В., Кузьмин Ю.Д. Гидрогеохимический мониторинг сейсмотектонических процессов на Камчатке. Современное состояние, результаты, перспективы развития // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2012. С. 211–235.

## HYDROGEOCHEMICAL INVESTIGATIONS IN THE SOUTH PRIBAIKALYE IN CONNECTION WITH THE SEARCH FOR EARTHQUAKE PRECURSORS

# M.N. Lopatin<sup>1</sup>, R.M. Semenov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk , Russia

*Abstract.* Results are presented for the variations of helium concentration in underground waters of South Pribaikalye, which are caused by seismic process. Unlike the previously done detailed research, consideration is being given to the data obtained not only in deep water of the Baikal but also in the artesian wells of South Pribaikalye. Calculations have been made of the coefficients of correlation between concentrations obtained in these sites, indicator functions and the integer indicator function, thus providing objective assessment of the variation in concentration with time in relation to changes in the stress-strain state of the Earth's crust and, therefore, to earthquake generation, and giving the possibility to predict the time of occurrence of an earthquake. *Keywords:* South Pribaikalye, underground waters, concentration of dissolved helium in water, correlation coefficient, integrated indicator function, earthquake source, earthquake precursor

УДК 551.243+551.222+550.349

# КРИТЕРИИ ВЫДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИ ИНДУЦИРОВАННЫХ ИНЪЕКЦИОННЫХ ДАЕК И ИХ ПАЛЕОСЕЙСМИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

О.В. Лунина, А.С. Гладков

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. В результате изучения кластических даек, индуцированных современными и историческими землетрясениями на юге Сибири, предложены критерии выделения инъекционных структур сейсмогенного генезиса. Показано, что их параметры и закономерности пространственного расположения могут быть использованы для идентификации сейсмогенерирующего разлома и/или эпицентра палеоземлетрясения, а также для определения пороговой магнитуды землетрясения и макросейсмической интенсивности в пункте наблюдения.

Ключевые слова: разжижение, кластическая дайка, землетрясение, юг Сибири

С недавнего времени большое внимание уделяется изучению кластических даек и их использованию при исследовании землетрясений. Среди них по происхождению выделяется две группы [1]. К первой относятся инъекционные дайки, сформированные в результате внедрения (снизу вверх) разжиженного кластического материала в осадочные слои вследствие действия аномально высокого порового давления и разрывообразования. Вторая группа включает нептунические дайки, которые образуются за счет заполнения осадками (сверху вниз) ранее существующих трещин либо под давлением, либо без него. Для палеосейсмогеологического анализа рассматривают в основном инъекционные дайки, поскольку их связь с землетрясениями практически бесспорна. Однако для регионов, для которых характерно сезонное промерзание и оттаивание грунтов или испытавших потепление климата в течение голоцена, весьма актуальны вопросы идентификации таких структур. Существующие критерии выделения сейсмитов не всегда убедительны, например для территории Южной Сибири, где в разрезах иногда наблюдаются псевдоморфозы по повторножильным льдам, песчаные жилы, клинья и конусы, многие из которых могут быть приняты за дайки сейсмогенного генезиса. Напротив, сейсмогенные дайки ошибочно могут быть определены как несейсмогенные образования. Обзор, приведенный в работе [2], показывает, что немногие критерии для сейсмически индуцированных структур в рыхлых осадках могут вообще диагностироваться независимо от ландшафтно-климатических условий их формирования, а некоторые из них неприменимы в масштабе обнажения. В связи с этим нами была поставлена цель на примере изучения разрезов в эпицентральных зонах недавних, преимущественно инструментальных, землетрясений установить дополнительные критерии, которые позволили бы сразу на местности идентифицировать сейсмогенную природу инъекционных даек.

В качестве эталонной площади для исследований выбрана эпицентральная зона Чуйского землетрясения ( $M_{\rm S}$ =7.5, 27.09.2003), во время которого произошли массовые излияния песков и песчановалунно-галечных отложений [3]. Кроме того, следы разжижения были обнаружены и описаны в эпицентральных зонах Мондинского ( $M_{\rm S}$ =7.0, 04.04.1950) [4], Среднебайкальского ( $M_{\rm S}$ =6.8, 29.08.1959) и Цаганского (*M*~7.4–7.5, 12.01.1862) сейсмических событий [5].

Полевые структурно-геологические и палеосейсмогеологические исследования косейсмических деформаций показали, что среди всех пластичных и хрупкопластичных деформаций в рыхлых осадках инъекционные дайки являются наиболее надежными индикаторами палеосейсмичности (рисунок). Зачастую вместе с ними в разрезах присутствуют разрывы, а преимущественная ориентировка даек близка к ориентировке главного сейсмогенерирующего разлома или вторичных разрывных нарушений, участвующих в строении земной коры исследуемого района. В случае недавно произошедших землетрясений места их проявлений на поверхности могут идентифицироваться по просадочным воронкам, длинные оси которых в большинстве случаев совпадают с простиранием даек. Нам удалось выделить некоторые отличительные признаки их сейсмогенного генезиса, которые могут присутствовать в строении тела дайки или на ее контакте с вмещаюшими отложениями:

1. Выдвинутый вверх блок пород внутри тела дайки (рисунок, *A*).

2. Закономерно неровные границы даек с вмещающими отложениями, свидетельствующие об условиях циклического нагружения толщ под воздействием сейсмических волн, проходящих через среду (рисунок, *А–Б*).

3. Смещение вдоль контактов дайки по типу сброса за счет гравитации (рисунок, *E*).

4. Слой осадков, излитых на поверхность или между толщами, по составу аналогичный вещественному строению тела дайки (рисунок, *А-Ж*), и отсутствующий в смежных коррелируемых разрезах; в выброшенной массе песчано-гравийно-галечного состава снизу вверх может меняться размер обломков от крупных до мелких (рисунок, *Ж*).

5. Задранные вверх слои вмещающих отложений на контакте с дайкой (рисунок, *E*). В мерзлотных клиньях прилегающие к клину слои направлены вниз по направлению движения воды при оттаивании грунта у поверхности.

6. Строение дайки по типу диапира (рисунок, 3).

7. Наполнение инъекционной дайки по фракции более крупнозернистое, чем вмещающие рыхлые породы.



Инъекционные дайки в эпицентральных зонах Чуйского (А-Ж) и Мондинского (З) землетрясений.

Из теории фильтрационной консолидации [6] следует, что чем больше напряжения, тем больше разность напоров в поровой воде и интенсивнее происходит ее отжатие в менее нагруженные области массива, а чем выше скорость деформации грунта, тем выше скорость фильтрации в нем поровой воды. Следовательно, чем выше пиковые ускорения, скорости и смещения грунта, тем больше вероятность образования инъекционных даек и шире масштабы разжижения осадков при прочих равных условиях. Уменьшение их пористости (уплотнение) пропорционально расходу воды (оттоку воды из пор), что объясняет признак № 7 сейсмогенности инъекционных даек. Находит свое объяснение и признак № 4: уменьшение интенсивности сейсмических колебаний в течение землетрясения приводит к уменьшению размеров выбрасываемых на поверхность осадочных обломков.

Особенности проявления форм и типов специфических сейсмогенных деформаций зависят от состава и строения осадочного разреза, что было отмечено в экспериментах [7], а также от глубины залегания зеркала грунтовых вод [8] и от того, излилась ли флюидизированная масса на открытую поверхность или внедрилась между слоями. В связи с этим при пространственном анализе распределения косейсмических деформаций необходимо изучать комплекс дислокаций, включающих как различные типы пластических и хрупкопластических деформаций, так и разрывы. Опираясь на это заключение и представление о том, что чем больше интенсивность деформаций, тем ближе к ним эпицентр, можно перейти к его реконструкции [5, 9, 10]. Не менее важное значение кластические дайки имеют для установления минимально возможной магнитуды и локальной макросейсмической интенсивности землетрясений. Сравнительно недавно были получены первые уравнения, связывающие магнитуду и локальную макросейсмическую интенсивность с такими параметрами даек, как мощность, видимая высота и интенсивность их проявления в разрезе [11]. Таким образом, структуры разжижения имеют значительный потенциал для их использования в решении палеосейсмогеологических задач.

Исследование выполнено в Институте земной коры СО РАН при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14–17– 00007).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Montenat C., Barrier P., d'Estevou P.O., Hibsch C. Seismites: An attempt at critical analysis and classification // Sedimentary Geology. 2007. V. 196. P. 5–30.

2. Owen G., Moretti M. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands // Sedimentary Geology. 2011. V. 235. P. 141–147.

3. Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., Ushanova E.A. Tectonic setting and geological manifestations of the 2003 Altai Earthquake // Geotectonics. 2007. V. 41. P. 87–104.

4. Lunina O.V., Andreev A.V., Gladkov A.S. The 1950 Mw=6.9 Mondy earthquake in southern East Siberia and associated deformations: facts and uncertainties // Journal of Seismology. 2015. V. 19. P. 171–189.

5. Lunina O.V., Andreev A.V., Gladkov A.S.. The Tsagan earthquake of 1862 on Lake Baikal revisited: a study of secondary coseismic soft-sediment deformation // Russian Geology and Geophysics. 2012. V. 53. P. 571–587.

6. Пьянков С.А., Азизов З.К. Механика грунтов: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 103 с.

7. Moretti M., Alfaro P., Caselles O., Canas J.A. Modelling seismites with a digital shaking table // Tectonophysics. 1999. V. 304. P. 369–383.

8. Obermeier S.F., Olson S.M., Green R.A. Field occurrences of liquefaction-induced features: a primer for engineering geologic analysis of paleoseismic shaking // Engineering Geology. 2005. V. 76. P. 209–234.

9. Obermeier S.F. Liquefaction evidence for strong earthquakes of Holocene and latest Pleistocene ages in the states of Indiana and Illinois, USA // Engineering Geology. 1998. V. 50. P. 227–254.

10. Green R.A., Obermeier S.F., Olson S.M. Engineering geologic and geotechnical analysis of paleoseismic shaking using liquefaction effects: field examples // Engineering Geology. 2005. V. 76. P. 263–293.

11. Lunina O.V., Gladkov A.S. Seismically induced clastic dikes as a potential approach for the estimation of the lowerbound magnitude/intensity of paleoearthquakes // Engineering Geology. 2015. V. 195. P. 206–213.

# CRITERIA FOR THE RECOGNITION OF SEISMICALLY INDUCED INJECTION DIKES AND THEIR PALEOSEISMIC SIGNIFICANCE

### O.V. Lunina, A.S. Gladkov

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Based on the study of clastic dikes, formed by recent and historical earthquakes in southern Siberia, seismogenic injection dikes recognition criteria have been proposed. It is shown that their parameters and spatial pattern can be used to identify a seismogenerating fault and/or an epicenter of a paleoearthquake as well as to estimate the threshold magnitude of an earthquake and local macroseismic intensity.

Keywords: liquefaction, clastic dike, earthquake, southern Siberia

\*\*\*

УДК 551.24:551.796(571.54)

## СЛЕДЫ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В РЫХЛЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ТУНКИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ

С.А. Макаров, А.А.Черкашина

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Рассмотрены результаты изучения разрезов рыхлых отложений со следами сейсмогенных деформаций, расположенных в Тункинской котловине Байкальской рифтовой зоны. В результате прохождения сейсмической волны на расстоянии от 24 до 27 км от эпицентра землетрясения образовались системы складчатости, которые в дальнейшем были перекрыты рыхлым материалом. Выявленные типы деформаций указывают на то, что сейсмическое событие произошло в конце весны. Радиоуглеродное датирование деформированных гумусовых горизонтов почв на восточном участке Аршанской палеосейсмогенной структуры позволило получить интервал сейсмического события равный 6733–7120 календ. л. н.

*Ключевые слова:* рыхлые отложения, сейсмогенная деформация, складчатая структура, погребенная почва, радиоуглеродные данные

При изучении следов сейсмогенных деформаций в Байкальской рифтовой зоне возникают сложности в понимании процессов, зафиксированных в разрезах рыхлых отложений. Если методические подходы реконструкции палеособытий в коллювиальных отложениях (модель коллювиальных клиньев) были уже достаточно хорошо разработаны [1, 2], то проблемы интерпретации деформаций, сохранившихся в аллювиальных и делювиальных отложениях, так и не нашли единого понимания.

Следы деформаций сейсмогенного происхождения были обнаружены в разрезах рыхлых отложений на расстоянии от 24 до 27 км от предполагаемого эпицентра землетрясения (рис. 1). Сейсмическая волна на отдельных участках земной поверхности образовала волнистую поверхность, экранированную с поверхности почвенным слоем, перекрытым в дальнейшем осадками эолового и делювиального происхождения.



Рис. 1. Местоположение разрезов со следами деформаций рыхлых отложений. *А* – эпицентральная область предпоследнего Аршанского землетрясения [3]; *Б* – разрез и его номер: *I* – Еловский (51°46'24.0", 102°41'42.9"), *2* – терраса р. Иркут (51°41'39.1", 102°34'21.4"), *3* – Бого Горхон (51°41'20.5", 102°27'29.6").

Следы складчатости сохранились в разрезе конуса выноса р. Бого Горхон (рис. 2). В этом месте залегание отложений близко к горизонтальному. Отмечаются следующие особенности:

1. Ниже следов складчатости залегание слоев горизонтальное, что свидетельствует о том, что сейсмическая волна поставила на "дыбы" оттаявший грунт (мощностью около 110 см), ниже грунт был мерзлый, поэтому деформаций в нем не наблюдается. Можно предположить, что сейсмическое событие произошло в конце весны.

2. Три слоя смяты в складки, которые далее перекрылись горизонтальными толщами отложений.

 Оси складок ориентированы в восточном направлении, что может свидетельствовать о подходе сейсмической волны со стороны Аршанской палеосейсмогенной структуры.

Аналогичная складчатость была встречена на пологом водоразделе Еловского отрога (рис. 3).

Отмечено три вида сейсмогенных деформаций:

1. В верхней части разреза наблюдаются структуры сжатия, что свидетельствует о том, что отложения были оттаявшими. Мощность слоя не менее 50 см.

2. В нижней части – простые структуры сдвига, характерные для мерзлых, не обладающих пластическими свойствами грунтов.

3. Общее понижение с пологими крыльями, объединившее все слои.

Следы складчатости в массовом количестве были встречены также в супесчано-суглинистых отложениях надпойменной террасы р. Иркут (см. рис. 1, разрез 2). Мощность деформированного слоя составила около 1 м.



Рис. 2. Складчатая структура в разрезе конуса выноса по левому берегу р. Бого Горхон (п. Жемчуг, Тункинская котловина, 51°41'20.5", 102°27'29.6"). *1* – радиоуглеродный / календарный (cal BP) возраст образца и его номер; 2 – разломы. Возраст образца под номером СОАН-7521 взят из работы [4].



Рис. 3. Складчатая структура в рыхлых отложениях (Еловский отрог, 51°46'24.0", 102°41'42.9"). Условные обозначения см. на рис. 2.

Можно предположить, что все виды деформаций сформировались над тектоническим разломом, который является источником сейсмического возбуждения. Аналогичные сейсмические деформации рыхлых отложений над тектоническими разломами наблюдались в районе г. Усолье-Сибирское [5]. На момент образования деформаций рыхлые отложения были не полностью протаявшими, что может свидетельствовать о том, что землетрясение произошло в весеннее время (май – начало июня).



Рис. 4. Схема корреляции радиоуглеродных (калиброванных) возрастов сейсмических событий. *1* – нижняя и верхняя граница календарного возраста деформированного погребенного гумусового горизонта почвы; *2* – интервал предпоследнего сейсмического события; *3* – скорректированный интервал. Стрелка показывает, что сейсмическое событие моложе или одновозрастно ему.

Для установления возраста образования сейсмогенных деформаций сравнивался календарный возраст погребенных почв из разреза с возрастом землетрясений, произошедших в голоцене на восточном участке Аршанской палеосейсмогенной структуры. По данным О.П. Смекалина [3], предпоследнее землетрясение произошло в интервале 6733-7867 календ. л. н. Возраст верхней деформированной почвы в разрезе (см. рис. 2) составляет 6840-7120 (ЛУ-7862) календ. л. н. Таким образом, наша датировка укладывается в ранее установленный интервал предпоследнего землетрясения. Объединив календарные даты, получаем суженный интервал предпоследнего сейсмического события на восточном участке Аршанской палеосейсмогенной структуры, равный 6733–7120 календ. л. н. (рис. 4).

Для предпоследнего Аршанского землетрясения отмечен сбросовый тип подвижки. Вертикальная амплитуда смещения равнялась 0.7 м, а магнитуда 6.9 [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Палеосейсмология. Т. 1. М.: Научный мир, 2011. 560 с.

2. Палеосейсмология. Т. 2. М.: Научный мир, 2011. 400 с.

3. Смекалин О.П. Изучение палеосейсмогенных деформаций Южного Прибайкалья. М.: ИФЗ РАН, 2008. 102 с.

 Данько Л.В. Эоловые отложения межгорных котловин юга Сибири // Палеоландшафтные индикаторы опустынивания. Новосибирск, 2009. С. 174–176.

5. Рященко Т.Г., Макаров С.А. Палеогеографическая реконструкция возраста сейсмогенных деформаций // География и природные ресурсы. 1996. № 1. С. 102–107.

### TRACES OF DISASTROUS EARTHQUAKE IN LOOSE SEDIMENTS OF THE TUNKA DEPRESSION

### S.A. Makarov, A.A. Cherkashina

V.B. Sochava Institute of Geography, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The paper presents the results of investigation of loose-sediment sections with traces of seismogenic deformations in the Tunka depression of the Baikal Rift Zone. Seismic waves that travel 24-27 km away from the earthquake epicenter formed the fold systems, which were subsequently overlain by loose material. The identified types of deformations show that the earthquake occurred in the late spring. Radiocarbon dating of deformed humus soil horizons on the eastern Arshan paleoseismogenic structure has provided the possibility to determine an earthquake recurrence interval between 6733 and 7120 cal. years BP. *Keywords:* loose sediment, seismogenic deformation, fold structure, buried soil, radiocarbon date

\*\*\*

УДК 550.34+551.242

## СТРОЕНИЕ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЕЙСМИЧНОСТИ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ МОНГОЛО-ОХОТСКОГО, ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКОГО И ТИХООКЕАНСКОГО ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПОЯСОВ

### Т.В. Меркулова, А.А Степашко

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация. Исследования особенностей строения и анализ рельефа зоны сочленения Монголо-Охотского, Центрально-Азиатского и Тихоокеанского тектонических поясов показали, что концентрация напряжения сжатия по сдвиговым разломам Тан-Лу в палеогене привела к формированию Буреинского орогена, в котором горизонтальные перемещения трансформировались в вертикальное поднятие. Буреинскому орогену отвечает крупная область литосферного разуплотнения, отмеченная интенсивной аномалией гравитационного поля. Ороген испытывает современное воздымание, формируя сводовое поднятие, в котором сосредоточены горные вершины высотой больше 2000 метров. Сжатие на фронте Амурской плиты приводит к современной активизации орогенеза, формируя над его сводом «Буреинскую» сейсмическую зону, в которой происходят сильные землетрясения. Для периода 1982–2009 гг. наблюдалась миграция очагов с *М*≥5 от центра сейсмической зоны к ее периферии – центробежное развитие сейсмического процесса. Более слабые землетрясения диапазона магнитуд 4.5–4.9 демонстрировали противоположную по направлению миграцию – «центростремительную миграцию». Центробежная миграция землетрясений от центра к периферии зоны доказывает прямую связь региональных деформаций с активизацией орогенной структуры.

*Ключевые слова:* сочленение тектонических поясов, Буреинский ороген, центробежная и центростремительная миграция землетрясений

В центре Нижнего Приамурья сочленяются три крупных тектонических пояса – Центрально-Азиатский, Монголо-Охотский и Тихоокеанский. Западную часть зоны сочленения формирует древний Буреинский массив – микроконтинент Центрально-Азиатского аккреционно-складчатого пояса. Восточный сегмент Монголо-Охотского пояса определяет строение северной части зоны сочленения. Границу этих двух поясов в современной структуре трассирует Пауканский разлом (рисунок). На востоке Нижнего Приамурья при воздействии современного Тихого океана на окраину Азии сформировались аккреционные комплексы Тихоокеанского пояса, меридиональная граница которого с Центрально-Азиатским поясом проходит вдоль восточного края Буреинского массива, где следует предполагать другой пограничный раздел.

На современном этапе область сочленения главных тектонических поясов окраины континента представлена Буреинским орогеном, выраженным в рельефе Турано-Буреино-Баджальской горной страной, где располагаются пятнадцать вершин, высота которых превышает 2000 м. Принципиальное значение для понимания природы геодинамических процессов, вызвавших формирование Буреинского орогена в Нижнем Приамурье, имеют данные и результаты региональных геофизических исследований. Известной особенностью поля силы тяжести является крупная региональная аномалия отрицательного знака, в пределах которой гравитационное поле асимметрично в направлении с запада на восток. Положение и контур гравитационной аномалии идеально вписываются в веерный рисунок региональных разломов северо-восточного простирания. Это ясно указывает на генетическую связь региональной аномалии гравитационного поля и самого Буреинского орогенного сооружения, глубинные корни которого она фиксирует с тектоникой сдвиговой системы Тан-Лу.



Позиция Буреинского орогена в тектонической структуре юга Дальнего Востока. 1 – Сибирский кратон; 2–4 – тектонические пояса: 2 – Центрально-Азиатский, 3 – Монголо-Охотский, 4 – Сихотэ-Алиньский; 5 – район тройного сочленения тектонических поясов; 6 – окраинно-континентальные вулканические пояса; 7 – осадочные впадины обрамления орогена: (СА) Среднеамурская, (ЭЧ) Эворон-Чукчагирская, (У) Удская, (Б) Буреинская; 8 – региональные разломы: (1) Илань-Итунский (Тан-Лу), (2) Центрально-Сихотэ-Алиньский, (3) Куканский, (4) Сюньхэ-Бирский, (5) Хинганский, (6) Тастахский, (7) Мельгинский, (8) Западно-Туранский, (9) Дукинский, (10) Пауканский, (11) Лимурчанский, (12) Тугурский, (13) Улигданский, (14) Северо-Тукурингрский; 9 – региональная аномалия гравитационного поля (темным выделены наиболее интенсивные части); 10 – главные горные вершины и их высота в метрах.

Позиция и структурные особенности Буреинского орогена находят отражение в рельефе региона, которому отвечает горное сооружение [1]. На западе доминируют крупные протяженные горные хребты северо-восточного направления, в то время как в восточной части высокие, но короткие хребты имеют меридиональную и северо-западную ориентировку. Вместе они формируют общее Ямалинское сводовое поднятие [1]. В пределах свода находятся 12 главных горных вершин Нижнего Приамурья, высота которых превышает 2000 м, причем высота пяти из них больше 2300 м. Именно здесь расположен центр Буреинского орогена, в котором происходит наиболее интенсивное поднятие и сосредоточена современная геодинамическая активность. Южный минимум региональной аномалии приурочен к центральным частям Буреинского и Баджальского хребтов. В этом районе находятся три других вершины орогенного сооружения высотой выше 2000 м и выделяется второй свод в центральной части орогена. В целом морфотектоника демонстрирует несомненную асимметрию горного сооружения с пологим западным крылом и высоким восточным сводом. Такая же асимметрия в направлении с запада на восток наблюдается в густоте расположения аномалий гравитационного поля. Эта особенность имеет принципиальное значение, по нашему мнению, для понимания как генезиса, так и современной геодинамики Буреинского орогена.

Установленные особенности строения и связь с разломами Тан-Лу позволяют предполагать, что Буреинский ороген образовался в палеогене на завершающем этапе перемещений вдоль тихоокеанской окраины по северо-восточным сдвигам суперсистемы Тан-Лу. С этим же трансформным режимом связан генезис осадочных впадин Нижнего Приамурья, которые объединяются с орогеном в общую морфологическую и тектоническую систему, сформированную при горизонтальном сжатии в процессе литосферной складчатости [2]. Деформации на завершающем этапе сдвиговых перемещений по разломам Тан-Лу концентрировались именно там, где расположена область тройного сочленения главных тектонических поясов: Монголо-Охотского, Центрально-Азиатского и Тихоокеанского (рисунок). В этом, видимо, кроется главная причина того, что сжатие не рассеивалось относительно равномерно в региональной структуре, а концентрировалось в фокальной области, с формированием орогенного сооружения.

Эпицентральное поле Нижнего Приамурья демонстрирует выраженный рассеянный характер. На схеме общей сейсмичности, очевидно, не выделяется никаких сейсмоактивных разломов, ни любых других сейсмогенерирующих структур, способных объяснить повышенную активность в регионе. По распределению землетрясений с  $M \ge 4.0$  в регионе обнаруживаются четыре сейсмических зоны, две из которых расположены в Нижнем Приамурье. Первая из них, «Приамурская», по [3, 4], хорошо известна, протягивается вдоль мегаразлома Тан-Лу и, несомненно, связана с ним генетически. Положение второй сейсмической зоны Нижнего Приамурья, удобно называть ее «Буреинской», очевидно, прямо связано с главным северным центром орогена. Распределение сильных землетрясений в регионе по годам показывает, что с начала XX в. в сейсмических зонах юга Дальнего Востока России сменилось три цикла сейсмической активности, интервалы между которыми составляли приблизительно ~50 лет. В Приамурской зоне, составной частью которой является Буреинская сейсмоактивная зона, землетрясения в каждом из циклов мигрируют с запада на восток, что подтверждает доминирующее значение Амурской плиты в современной геодинамике. Надежные и полные данные по параметрам землетрясений Буреинской зоны имеются только для событий последнего сейсмического цикла. Первые сильные землетрясения магнитудой М≥5 здесь произошли в 1985-1986 гг. Эпицентры всех событий начала цикла сосредоточены в узкой полосе, положение которой совпадает с центром Буреинского орогена. Все более поздние землетрясения 1994-2007 гг. демонстрируют миграцию очагов от центра сейсмической зоны к ее периферии. Это центробежное развитие сейсмического процесса. Более слабые землетрясения следующего диапазона магнитуд, М=4.5-4.9, начались в 1983-1984 гг. Расположение эпицентров всех толчков цикла наглядно демонстрирует противоположную по направлению миграцию, которая может быть названа «центростремительной миграцией». Ранние землетрясения восьмидесятых годов происходили на периферии Буреинской зоны, затем они мигрировали к ее центру. Эпицентры землетрясений с магнитудой М=4.5-4.9, которые произошли в период 2005-2009 гг., сосредоточены на ограниченной площади в центре Буреинской зоны и точно над центром орогенного сооружения. В рамках цикла вся сейсмическая область остается активизированной и по всей ее площади происходят толчки магнитудой М≥4.5.

Таким образом, на палеогеновом этапе перемещений вдоль тихоокеанской окраины Азии по мегасистеме северо-восточных сдвигов Тан-Лу в район пересечения литосферных разделов транслировалось горизонтальное сжатие, которое привело к образованию Буреинского орогена. Сжатие на фронте Амурской плиты приводит к современной активизации орогена, формируя над его сводом «Буреинскую» сейсмическую зону, в которой происходят сильные землетрясения магнитудой  $M \ge 4.5$ . Центральный характер миграции землетрясений указывает на то, что зона сжатия орогена трансформирует горизонтальное давление в вертикальный подъем, что вызывает резкое возрастание сейсмичности в центральной части Нижнего Приамурья.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Уфимцев Г.Ф. Тектонический анализ рельефа. На примере востока СССР. Новосибирск: Наука, 1984. 183 с.
- Никишин А.М. Тектонические обстановки. Внутриплитные и окраинноплитные процессы: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2002. 366 с.

3. Сейсмотектоника и сейсмическое районирование Приамурья / В.В. Николаев, Р.М. Семенов, Л.С. Оскорбин и др. Новосибирск: Наука, 1989. 128 с.

4. Степашко А.А. Глубинные основы сейсмотектоники Дальнего Востока: Приамурская и Приморская зоны // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30, № 1. С. 3–15.

# STRUCTURE AND SESMICTY REGULARITIES OF THE MONGOLO-OKHOTSK, CENTRAL ASIAN AND PACIFIC TECTONIC BELT JUNCTION AREA

T.V. Merkulova, A.A. Stepashko

Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

*Abstract.* The studies of the structural features and relief analysis of the Mongolo-Okhotsk, Central Asian and Pacific tectonic belt junction area have shown that the concentration of compressional stresses along the Tan Lu strike-slip fault system in the Paleogene resulted in the formation of the Bureya orogen, in which horizontal displacements transformed into a vertical uplift. The Bureya orogen encompasses a large area of the unconsolidated lithosphere characterized by intense gravity anomaly. The modern orogenic upwarping occurs in the form of a dome that is home to the concentration of peaks over 2000 meters in height. The compression at the Amur plate front results in activation of modern orogenesis, forming the «Bureya» seismic zone above its dome, where large earthquakes occur. During 1982–2009, there was a  $M \geq 5$  earthquake foci migration from the center to the periphery of the seismic zone providing evidence of the centrifugal character of the seismic process development. The weaker earthquakes with magnitudes ranging between 4.5 and 4.9 demonstrated the opposite, centripetal character of migration. The centrifugal migration of earthquakes from the center to the periphery of the seismic zone indicates a direct relationship between the regional deformations and activation of the orogenic structure.

Keywords: tectonic belt junction, Bureya orogen, centrifugal and centripetal earthquake migration

\*\*\*

УДК 550.34+551.242+551.248

# КОМПЛЕКСНЫЕ ПАЛЕОСЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА КЛЮЧЕВОМ УЧАСТКЕ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ (В СВЯЗИ С ОЦЕНКОЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА РАЙОНА КОЛЬСКОЙ АЭС)

С.Б. Николаева<sup>1</sup>, А.А. Никонов<sup>2</sup>, С.В. Шварев<sup>2</sup>, М.В. Родкин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты детальных палеосейсмогеологических исследований на ключевом участке в бортовой зоне впадины озера Имандра (Кольский регион, северо-восток Фенноскандинавского щита). Изучение различных групп палеосейсмодеформаций, развитых в зоне разлома, применение новых методов и подходов позволили выделить крупную сейсмотектоническую зону, в которой в конце позднеледниковья и в голоцене возникали мощные землетрясения, что заставляет иначе оценивать сейсмический потенциал района Кольской АЭС.

*Ключевые слова:* палеосейсмодеформация, палеосейсмичность, палеоземлетрясение, сейсмотектоническая зона, Кольский регион, Фенноскандинавский щит, Кольская АЭС

В последние десятилетия в разных частях Кольского полуострова независимыми группами исследователей обнаружены многочисленные следы древних землетрясений. Результаты этих исследований, однако, до сих пор не учитываются в оценке сейсмической опасности региона в целом и особо ответственных объектов в его границах. Так произошло, в частности, с участком, расположенным в 15 км к северу от площадки Кольской АЭС (КоА-ЭС), где около 20 лет назад были обнаружены палеосейсмодеформации в скальных породах [1, 2]. Позже получены свидетельства о пликативных деформациях в тонкодисперсных осадках низких террас оз. Имандра и о нарушениях в виде уступов на поверхности этих террас. Эти факты интерпретировались как показатели интенсивных дифференцированных тектонических смещений в позднем плейстоцене – голоцене [3]. Сейсмичность площадки КоАЭС, оцененная без учета голоценовых палеосейсмических событий, была определена в пределах V баллов [4]. Полученные авторами в 2011-2013 гг. результаты о возрасте и характере землетрясений дают основу для существенной коррекции этих оценок.

Объектом специального изучения стало сейсмотектоническое ущелье в кристаллических породах докембрия и его ближайшие окрестности. Исследование включало рассмотрение тектонической структуры и разного рода нарушений в теле массива, на бортах ущелья и за его пределами, распределение и строение рыхлых отложений, нарушений нормальной литолого-стратиграфической последовательности в них, в том числе и аналитическими методами. Для параметризации породивших нарушения воздействий (интенсивность, магнитуда и время сейсмических событий) авторы применили разрабатываемый ими вариант палеосейсмогеологического метода [5].

Деформации в скальном субстрате представлены двумя сейсморазрывами длиной до 0.5 км, образующими субмеридиональную эшелонированную систему сегментов зоны разлома с признаками новейшего обновления (рисунок, *A*).



Сейсмотектоническое разрывное нарушение в районе западного борта Имандровской неотектонической впадины (A) и направления смещений глыбового материала в районе ущелья (Б). A: 1 - разлом с признаками новейшего обновления, 2 – детальный участок работ. Б: <math>1 - сейсмотектонический ров («ущелье»); 2 – направление импульсных смещенийглыб (а), направление обвальных шлейфов (б); 3 – изолинии распространения максимальных объемов смещенных блоков; 4 – изогипсы рельефа через (а – 10 м, б – 50 м, в – 5 м).

Детальные исследования осуществлены на северном сегменте разрыва, выраженном в рельефе ущельем глубиной до 27 м и шириной поверху до 43 м, секущим вкрест простирания субширотную гряду гранитогнейсов позднего архея. На бортах ущелья развиты скальные обвалы, ориентировка шлейфов которых подчиняется двум направлениям (генерациям): 1) широтному (с обоих бортов навстречу по аз. 80-105° и 260-305°) и 2) СВ (30-40°). Обвалы каждой генерации, судя по наложению обвальных тел, развиты последовательно, причем субширотные являются более ранними. Систематическое отклонение шлейфов обвалов второй генерации (СВ) от нормали к западной стенке ущелья однозначно свидетельствует о их сейсмогравитационном характере. На прилегающих к ущелью вершинных поверхностях и пологих склонах обследованы десятки (>60) отколотых, отодвинутых, отброшенных от «гнезд» в материнском субстрате глыб и блоков. Средние величины глыб колеблются в диапазоне 1.5-2.0 м, при характерных смещениях по основанию на 0.3-0.4 м. Максимальные размеры перемещенных глыб локализуются вблизи сейсморазрыва с тяготением к его западному крылу в южном замыкании (рисунок, Б). В смещениях глыб преобладают три направления -СВ, В и ЮВ (рисунок, Б, вставка), свидетельствуя о соответствующих импульсах. последовательность которых установлена по взаимной ориентировке, наложению (набросу) глыб друг на друга. Установлена последовательность: 1) ЮВ импульс (130°); 2) В импульс (80°) при взбросе западного крыла разрыва; 3) СВ импульс (30°). Для последнего характерно различие согласных и противонаправленных смещений глыб на крыльях разрыва, что позволяет принимать сдвиговую (правый сдвиг) составляющую разрыва с горизонтальным смещением бортов ущелья. Распределение глыбовых смещений с тремя импульсными генерациями хорошо согласуется с последовательностью и направленностью скальных обвалов внутри ущелья. Первый из импульсов (ЮВ), не отраженный в обвалах, возник до образования ущелья, второй (В) – привел к его образованию и появлению субширотных коллювиальных шлейфов, а третий (СВ) реализовался со сдвиговой составляющей и с косо направленными шлейфами.

Деформации в рыхлых отложениях. На восточном борту ущелья шурфом вскрыты залегающие на морене пески и супеси. В средней части толщи песков и супесей обнаружены различные деформации, в том числе микроскладки и проявления вертикально направленных воздействий. Это можно рассматривать как признак подъема песчаного материала в вышележащие отложения, т.е. спонтанного разжижения песков, как это часто случается при сильных сейсмических сотрясениях [6]. Обнаруженные микроскладки имеют наклон крыльев до 40-50°, местами со сдваиванием маркирующего прослоя с перекрытием 5 – 7 см по плоскости, наклоненной на ЮВ - 140°(±20°) под углом 20°(±5°), что определяет импульсную деформацию СЗ-ЮВ направления. Результаты диатомового, спорово-пыльцевого и OSLдатирования указывают на образование толщи в самом конце позднеледниковья.

В керне озерной котловины зоны оперяющего разлома в толще гиттии (сапропеля) обнаружены два аномальных горизонта, на 90 % состоящих из растительных остатков и торфа, т.е. нетипичных для подобных разрезов. Не исключается вероятность их возникновения в результате как минимум двух сейсмических событий в голоцене. Последующее датирование радиоуглеродным методом позволит более точно определить время образования этих интервалов.

Параметры выявленных землетрясений определялись по размерам скальных сейсмодеформаций аналоговым методом и на основе механической модели [5]. В последнем случае при этом обычно решалась механическая задача по инерционному смещению скального блока, получившего начальную скорость V=PGV движения по субгоризонтальному основанию с трением. Средние рассчитанные значения V=PGV аналогичны максимально наблюденным значениям и типичным величинам скоростей скольжения (peak slip velocity) бортов разломов при землетрясении (1-3 м/с) [7]. Оценка магнитуды события не однозначна, так как смещение зависит и от самой величины M, и от расстояния R. Значения PGV для выявленных трех событий существенно не различаются. Отсюда, за возможные пары значений M и R, согласно приведенной в [5] номограмме, можно

ориентировочно принять следующие: (M=6, R~1 км), (M=7, R=2–5 км), (M=8, R=5–20 км). Первая пара значений представляется наиболее вероятной, по крайней мере для последнего события, с разным направлением преимущественного смещения на разных крыльях разлома. Судя по фиксированной локализации сейсмодеформаций вблизи разрыва, события, вероятно, имели местный характер и, соот-

ветственно, их оценка принимается по нижнему пределу магнитуды.

Время событий определялось по радиоуглеродным датировкам образцов захороненного под обвалами торфа, OSL-датированию и комплексу геолого-геоморфологических и палеогеографических данных. Основные характеристики сейсмических событий приведены в таблице.

			С	Определяемые параметры сейсмических событий				
	Установленные по полевым данным			Установленные расчетным путем				
Π.	направление	возраст,	кинематика	<i>V</i> , м/с		Балльность (I) по		
per	импульса	тыс. л.н.				McGuire,	Wald, 1999,	
нос					[7]	Barnhard,	[7]	
						1979 [7]		
1	ЮВ	13 (кал.)	-	1.5±0.7	IX–X	VII–VIII	IX–X	
	(120–140°)							
2	B (70–90°)	(11.5–10.3) –	взброс	1.6±0.7	IX–X	VII–VIII	IX–X	
		7.1 ( <sup>14</sup> C)	(западное крыло)					
3	CB (20-40°)	2.5 (кал.)	сдвиг	1.9±0.9	IX–X	VII–VIII	IX–X	

Детальное исследование ключевого участка позволило выделить элемент крупной сейсмотектонической зоны к западу от впадины оз. Имандра, активизация которой происходила на протяжении всего поздне- и послеледникового времени, что выразилось в трех, как минимум, землетрясениях силой ≥VII–IX баллов, *М*≥6, сопровождавшихся сейсмодеформациями разных типов. Полученные результаты указывают на необходимость оценки сейсмической опасности в центре Кольского полуострова как существенно более высокой, чем это принято в настоящее время.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 14–09– 98806\_р север а, 14–05–00866).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Николаева С.Б. Палеосейсмодислокации южной части Кольского полуострова // Четвертичные отложения и новейшая тектоника ледниковых областей Восточной Европы. Апатиты: КНЦ РАН, 1993. С. 69–81.

2. Николаева С.Б. Палеосейсмические проявления в северо-восточной части Балтийского щита и их геологотектоническая позиция // Геоморфология. 2001. № 4. С. 66–74.

3. Шварев С.В. Послеледниковые тектонические движения и формирование террас оз. Имандра (Кольский полуостров) // Геоморфология. 2003. № 4. С. 97–105.

4. Бугаев Е.Г. Уточнение сейсмических условий площадки Кольской АЭС // Глубинное строение и геодинамика Фенноскандии, окраинных и внутриплатформенных транзитных зон: Материалы Восьмой междун. конференции. Петрозаводск, 2002. С. 34–35.

5. Родкин М.В., Никонов А.А., Шварев С.В. Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. С. 203–237.

6. Obermeier S.F., Olson S.M., Green R.A. Field occurrences of liquefaction-induced features: a primer for engineering geologic analysis of paleoseismic shaking // Engineering Geology. 2005. V. 76. P. 209–234.

7. Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: «Наука и образование», 2012. 176 с.

### INTEGRATED PALEOSEISMOGEOLOGICAL STUDIES CONDUCTED AT THE KEY-SITE IN THE MURMANSK REGION (IN CONNECTION WITH ASSESSING SEISMIC POTENTIAL OF THE KOLA NUCLEAR POWER PLANT)

# S.B. Nikolaeva<sup>1</sup>, A.A. Nikonov<sup>2</sup>, S.V. Shvarev<sup>2</sup>, M.V. Rodkin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Geological Institute of the Kola Science Centre, the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

<sup>2</sup> Schmidt Institute of Physics, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup> International Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Abstract.* Presented here are the results of detailed palaeoseismological studies at the key-site in the Lake Imandra basin flank (Kola region, northeastern Fennoscandian shield). Study of different types of paleoseismic deformations in fault zones and use of new methods and approaches have made it possible to identify a large seismotectonic zone wherein large late-glacial and Holocene earthquakes occurred that necessitates another way of assessing seismic potential of the neighboring area at the Kola Nuclear Power Plant.

Keywords: paleoseismic deformation, paleoseismicity, paleoearthquake, seismotectonic zone, Kola region, Fennoscandian Shield, Kola Nuclear Power Plant

\*\*\*

УДК 550.348.436 1

# СВОЙСТВА МЕДЛЕННЫХ МИГРАЦИЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

### А.В. Новопашина

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Возникновение миграций определяется особыми геодинамическими условиями в зонах сочленения крупных тектонических разломов. Направление упорядоченного распространения землетрясений совпадает с простиранием крупных разломов или примыкающих к ним разломов другого порядка. Пространственно-временная визуализация суммарной сейсмической энергии позволяет предположить, что скорость распространения миграционных цепочек связана со скоростями межплитных движений. Анализ активных фрагментов различных сейсмических поясов показывает зависимость скорости миграции сейсмической активности от скорости развития геодинамических процессов. Ключевые слова: сейсмическая активность, землетрясение, миграция, скорость, активный разлом

Динамика сейсмического процесса в зонах сочленения крупных тектонических разломов характеризуется прохождением медленных миграций сейсмической активности. Ранее на основе пространственно-временного анализа суммарной энергии землетрясений была установлена взаимосвязь миграционного явления с зонами сочленения разломов для многих активных фрагментов сейсмических поясов (Центрально-Азиатского, Тихоокеанского и Альпийского): Байкальской рифтовой системы (БРС) [1], разломной зоны Сан-Андреас (Калифорния) [1], Альпийского разлома (Новая Зеландия) [2], Северои Восточно-Анатолийского разломов (Турция) [3]. Сложное распределение упругого напряжения в местах взаимодействия разломов создает условия для возникновения последовательностей землетрясений разной силы, которые предшествуют сильным сейсмическим событиям, проявляясь в периоды их подготовки, а также в афтершоковых последовательностях, вызывающих сильные землетрясения. В этом случае на пространственно-временной диаграмме наблюдается устойчивая тенденция медленного смещения проекции сейсмической активности на поверхность от главного толчка к последующим сильным событиям - протяженный пространственно-временной максимум суммарной энергии, наклон

которого изменяется в зависимости от скорости миграции (рисунок).

Цепочки миграций в разных сейсмических поясах имеют некоторые общие черты, к которым можно отнести совпадение направлений миграций с простиранием активного сегмента разлома, часто колебательный характер процесса миграции, проявляющийся на разных этапах развития разломной зоны и области очага крупного землетрясения.

Наличие сильных событий в миграционных цепочках характерно для высокосейсмичных разломных зон с высокой скоростью межплитных движений, например активных разломов центральной части Байкальской рифтовой системы, разлома Сан-Андреас в Калифорнии и прилегающих к нему разломных зон, фрагментов «Огненного кольца» (рисунок), зоны Северо-Анатолийского разлома в Турции, активных разломов Новой Зеландии. В высокосейсмичных областях, таких как фрагменты «Огненного кольца» и Альпийского разлома (Новая Зеландия), миграции не могут являться предвестником из-за большого количества сильных землетрясений, но здесь можно получить скоростные характеристики миграционного процесса, сопоставление которых со скоростью межплитного движения позволит понять механизм явления в целом.



Пространственно-временные диаграммы Филиппинской зоны субдукции. *А* – диаграмма зоны длиной 1450 км; *Б* – детализационная диаграмма для зоны длиной 650 км. Шкала суммарной энергии градуирована для интерполированных значений.

На рисунке представлено пространственновременное распределение суммарной энергии для фрагмента «Огненного кольца» (Филиппинская зона субдукции, 7 °с.ш., 126 °в.д., АЗ – 350°), где линиями выделены явные миграции сильных землетрясений – А (период 1974–2011 гг.), смещения суммарной энергии в диапазоне магнитуд от двух до шести включительно – Б (период 2003–2004 гг.), которые не видны при визуализации землетрясений больших магнитуд. На диаграмме Б можно наблюдать причинно-следственную связь сильных событий и афтершоков. Наклон цепочек соответствует скоростям от 100 до 700 км/год с преобладанием цепочек 250-300 км/год. В среднем, скорости миграций в таких активных сегментах как Сан-Андреас (спектр скорости широк: 7-250 км/год, мода скорости 50-70 км/год) и Байкальская рифовая система (спектр 5-70 км/год, мода скорости 30 км/год), в разы и на первые порядки ниже. Сравнивая миграционные эпизоды в разных регионах, можно видеть, что моды скоростей миграций увеличиваются с увеличением значений скоростей межплитных движений. Так, в БРС скорости перемещения плит - первые миллиметры/год, в центральной части достигают 3.4 мм/год [4], в разломной зоне Сан-Андреас – около 30 мм/год в наиболее активных сегментах [5], в Филиппинской зоне поддвига – 80 мм/год (7.5–9.0 см/год) [6].

Тектонические процессы зон субдукции являются в большей степени пластичными, чем в континентальных зонах разломов, из-за особых температурных и барических условий, а также наличия на контакте плит осадочной прослойки. Так же велико значение вертикальной составляющей движения погружающейся плиты, из-за чего скорость развития разломов может быть намного выше, чем скорость горизонтальных движений в регионе. Таким образом, тектонические процессы, происходящие в рассматриваемых зонах континентальных сдвигов и зон субдукции, различаются по своей природе, но приводят к одному результату – проявлениям сейсмичности. В работе предпринята попытка соизмерения только порядков горизонтальной скорости тектонических процессов со скоростями сопутствующих им миграций сейсмической активности. Скорости перемещений блоков (плит) могут определять значения скоростей миграций, имеющих широкий спектр; мода скорости миграций, скорее всего, соответствует скорости развития разломов в регионе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Новопашина А.В., Саньков В.А. Особенности миграции сейсмической активности сдвиговых разломных зон на примере границ Североамериканской и Тихоокеанской плит // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34, № 2. С. 67–81.

2. Новопашина А.В. Пространственно-временная связь сильных сейсмических событий на примере серии землетрясений Крайстчертч 2010–2011 гг. // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: Материалы совещания. Вып. 13. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015. С. 171–174.

3. Новопашина А.В. Результаты изучения миграции сейсмической активности Турции // Вестник ИрГТУ. 2014. № 94. С. 88–92.

4. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Кале Э. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 7. С. 785– 793.

5. Wallage R.E. The San Andreas fault system, California. Washington, 1990. 283 p.

6. Hall R., Ali J.R., Anderson C.D., Baker S.J. Origin and motion history of the Philippine Sea plate // Tectonophysics. 1995. V. 251(1-4). P. 229-250.

### SLOW MIGRATION OF SEISMIC ACTIVITY

### A.V. Novopashina

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Migration occurrence conditions are determined by special geodynamic conditions in the conjunction zones between tectonic faults. The direction of sequential seismic wave propagation coincides with the strike of large faults or with that of adjacent faults of another order. Spatiotemporal total seismic energy visualization implies that the velocities of migration chain propagation are connected with the rates of intraplate movement. Comparative analysis between the fragments of seismically active zones shows the dependence of seismic activity migration rate upon the rates of geodynamic processes. *Keywords:* seismic activity, earthquake, migration, rate, active fault

\*\*\*

УДК 551.550.34

# СЛЕДЫ И ВОЗРАСТ ПАЛЕОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ОЧАГОВОЙ ОБЛАСТИ ТУВИНСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2011–2012 ГГ.

А.Н. Овсюченко<sup>1</sup>, Е.А. Рогожин<sup>1</sup>, А.В. Мараханов<sup>1</sup>, Ю.В. Бутанаев<sup>2</sup>, А.С. Ларьков<sup>1</sup>, С.С. Новиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия

Аннотация. Изложены результаты палеосейсмологических исследований в эпицентральной зоне двух Тувинских землетрясений – 2011 (*M*=6.7) и 2012 (*M*=6.8) гг. Относительно слабые события, подобные Тувинским 2011–2012 гг., за последнее тысячелетие повторялись раз в 300–500 лет.

Ключевые слова: землетрясение, активная тектоника, палеосейсмология, сейсмический режим, Тува

Землетрясения 27.12.2011 г. ( $M_S$ =6.7) и 26.02.2012 г. ( $M_S$ =6.8) стали сильнейшими за всю историю сейсмологических наблюдений в Туве. Они произошли в осевой части горной цепи Академика Обручева, которая возвышается над прилегающими межгорными впадинами – Тувинской и Тоджинской. На рассматриваемом отрезке осевая часть горной цепи «нанизана» на зону Каахемского разлома и состоит из ряда узких хребтов с абсолютными высотами до 2500–2890 м, разделенных внутригорными впадинами. Каахемский разлом представляет собой крупнейшую зону смятия, шириной 15–20 км, которая играла структурообразующую роль на протяжении всех тектономагматических активизаций с конца докембрия.

В районе эпицентров землетрясений 2011-2012 гг. общее простирание Каахемской системы нарушений постепенно меняется с субмеридионального на субширотное. Очаги землетрясений 2011-2012 гг. вышли на поверхность в виде сейсморазрывов, секущих корни и стволы деревьев, камни, кустарниково-моховой покров и все формы рельефа на своем пути [1, 2]. Согласно решениям механизмов, подвижка при первом землетрясении имела преимущественно сдвиговую кинематику, при втором - преимущественно взбросовую с компонентой сдвига. Очаг первого землетрясения расположен в верховьях руч. Медвежьего; второго – в верховьях руч. Верхний и Нижний Кара-Хем (рис. 1). Взаимоотношения сейсморазрывов между собой позволяют заключить, что в рассматриваемом районе активные разломы разного простирания образуют сложный дизъюнктивный узел.

Возможность возникновения на хребте Академика Обручева сильных землетрясений была установлена относительно давно [3, 4], но за полвека инструментальных сейсмологических наблюдений хребет Академика Обручева в сейсмическом отношении проявил себя умеренно активным. В 60–80-х годах здесь неоднократно происходили землетрясения с умеренными магнитудами (М=4.0–5.5), но эпицентральная область землетрясений 2011–2012 гг. была практически асейсмична более 50 лет [5]. Сейсмическое затишье было прервано в 2011 г. Вопрос о том, насколько долго оно продолжалось, можно решить лишь с помощью палеосейсмологического подхода.

Вдоль сейсморазрыва, вскрывшегося при втором землетрясении, в специально пройденных канавах обнаружены следы предыдуших сейсмотектонических подвижек. Наиболее информативна канава К-1 (рис. 2). В месте проходки канавы К-1 взбросовый разрыв 2012 г. наращивает более древний уступ высотой 1.5–1.8 м. Вертикальная компонента современного смещения – около 60 см. Горизонтальное сокращение дернового горизонта почвы по разрыву достигает 90–95 см. Ниже залегают гранитные глыбы и щебень со следами грубой окатанности.



Рис. 1. Изученные сегменты Каахемской системы активных разломов (черные линии) в районе очагов землетрясений 2011–2012 гг. с положением пройденных канав (квадраты).

В поднятом крыле современного разрыва наблюдается более древний, сместивший кровлю песчаного слоя в нижней части вскрытого разреза. В опущенном крыле этого разрыва наблюдается сдваивание древнего почвенного профиля. В нем выделяются два почвенных горизонта - нижний, черный торф с растительными остатками, и верхний, серовато-коричневый гумусовый. Этот горизонт вовлечен только в самую молодую деформацию разрывом 2012 г. Два нижних почвенных горизонта вовлечены в деформацию в разной степени. Если на черный торф (возраст 903-983 года) оказались надвинуты склоновые грубообломочные отложения, то более молодой серовато-коричневый гумусовый горизонт (возраст 592-638 лет) вовлечен лишь в синклинальное смятие в опущенном крыле разрыва. Таким образом, интервал 983-638 лет назад дает нам возраст сейсмотектонической подвижки по древнему разрыву. Более молодая (предпоследняя) подвижка, по всей видимости, привела к

синклинальному смятию серовато-коричневого гумусового горизонта (возраст 592–638 лет). В то же время современный гумусовый горизонт (возраст 492–555 лет) не претерпел деформаций при этом событии, что дает возраст предпоследней сейсмотектонической подвижки – 638–492 года назад.



Рис. 2. Фотография и зарисовка канавы, пройденной вкрест простирания сейсморазрыва землетрясения 2012 г. (К-1).

В очаге землетрясения 2011 г. также выявлены следы древних сейсмических активизаций, сохранившиеся в рельефе и молодых отложениях. С этой целью были пройдены канавы на ограничениях впадины типа pull-apart basin, представляющей собой зону растяжения на окончании сдвигового разрыва в верховьях руч. Медвежьего. Наиболее информативна канава K-11 (рис. 3).

Она пройдена вкрест простирания двухступенчатого уступа в западном борту впадины. Вскрытый разрез представлен двумя слоями грубообломочных склоновых отложений. В основании обеих ступеней уступа наблюдаются молодые разрывы 2011 г. В верхней части разреза они представлены открытыми трещинами шириной до 20 см, заполненными ссыпавшейся туда почвой и обломками. Разрыв в основании верхней ступени образовался в 2011 г., так как величина вертикального смещения современной подзолистой почвы идентична смещению границы в склоновых отложениях. В опущенном крыле нижнего разрыва вскрыты две линзы палеопочвы, погребенные обломками из склоновых отложений. Толщина обломочных слоев 20–30 см.

Залегание палеопочвы свидетельствует о ее резком захоронении обломочным материалом в результате сейсмотектонических подвижек. Нижняя палеопочва представлена остатками торфянистого дерна с углями, верхняя – гумусовым горизонтом черной лесной палеопочвы с углями. Еще одна тонкая линза обломочного материала наблюдается в современном почвенном профиле. Судя по залеганию в разрезе, датировки палеопочв отражают их возраст до захоронения обломочными материалом, т.е. представляют собой нижнее возрастное ограничение более ранней подвижки и верхнее – более поздней. По этим данным можно очень грубо оценить возраст трех подвижек – 3000–3500, 1500–1900 и 300– 500 лет назад.



Рис. 3. Фотография и зарисовка канавы, пройденной вкрест простирания сейсморазрыва землетрясения 2011 г. (К-11).

Самое молодое событие (300–500 лет назад) имеет и другие следы в пределах сдвигового разрыва 2011 г., в долине руч. Медвежьего. В приустьевой части долины, у русла ручья, в 10 м от сейсморазрыва 2011 г. обнаружен заросший и заваленный старыми стволами ров 3СЗ простирания. Вдоль этого рва ствол старого, полусгнившего кедра разорван и смещен вправо на 40 см. Судя по растительному покрову, смещение ствола произошло синхронно с образованием рва, в первые сотни лет назад.

Таким образом, по силе предпоследнее событие было сходно с землетрясением 2011 г. (*M*=6.7). Два предыдущих события (3000–3500 и 1500–1900 лет назад), судя по толщине обломочных линз, захоронивших палеопочвы в К-11, были сильнее. Однако величина вертикального смещения по сбросу на окончании сдвига прямо не отражает общую величину подвижки. Это затрудняет оценку магнитуды двух предыдущих палеоземлетрясений.

Также получены датировки двух предыдущих подвижек в очаге второго Тувинского землетрясения. Они произошли в последние 900 лет, примерно 800–700 и 600–500 лет назад. По своим параметрам подвижки были практически аналогичны современной. Можно полагать, что были схожи и параметры землетрясений – магнитуда (*M*=6.8) и интенсивность сотрясений в эпицентре (9 баллов).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Овсюченко А.Н., Рогожин Е.А., Мараханов А.В., Кужугет К.С., Бутанаев Ю.В., Новиков С.С., Ларьков А.С. Результаты полевых сейсмогеологических исследований Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. // Тувинские землетрясения 2011–2012 гг. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2014. С. 57–79.

2. Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С., Ларьков А.С. Геологические проявления Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. // Доклады Академии наук. 2015. Т. 463, № 2. С. 316–321.

3. Аржанников С.Г. Сейсмотектоника Восточно-Тувинского нагорья: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск: ИЗК СО РАН, 1998. 16 с.

 Аржанников С.Г., Зеленков П.Я. Сильные палеоземлетрясения хребта Академика Обручева (Восточная Тува) // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 2-3. М.: ОИФЗ РАН, 1995. С. 323–330.

5. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Селезнев В.С., Фатеев А.В. Тувинские землетрясения 27.12.2011 г., M<sub>L</sub>=6.7, и 26.02.2012 г., M<sub>L</sub>=6.8, и их афтершоки // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456, № 2. С. 223–226.

# TRACES AND AGE OF PALEOEARTHQUAKES IN SOURCE AREA OF THE 2011-2012 TUVA EARTHQUAKES

A.N. Ovsyuchenko<sup>1</sup>, E.A. Rogozhin<sup>1</sup>, A.V. Marakhanov<sup>1</sup>, Yu.V. Butanaev<sup>2</sup>, A.S. Larkov<sup>1</sup>, S.S. Novikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Tuva Institute for Exploration of Natural Resources, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russia

Abstract. The results are presented of the paleoseismological studies in the epicentral area of the Tuva earthquakes of 2011 (M=6.7) and 2012 (M=6.8). In the last millennium, relatively weak events similar to the 2011-2012 Tuva earthquakes occurred every 300–500 years.

Keywords: earthquake, active tectonics, paleoseismology, seismic mode, Tuva.

\*\*\*

УДК 550.34

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХВОСТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ, ПРИЛОЖЕНИЕ К ОЦЕНКАМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

# В.Ф. Писаренко<sup>1</sup>, М.В. Родкин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Аннотация. Работа посвящена задаче расчета долгосрочной сейсмической опасности редких экстремально сильных землетрясений, которая остается нерешенной проблемой при оценке сейсмической опасности. С теоретической точки зрения вопрос заключается в оценке поведения хвоста функции распределения в области редких сильнейших событий. В статье представлены и сравниваются два, по-видимому, наиболее общих подхода к этой проблеме. Первый подход основывается на использовании теории экстремальных значений, позволяющей описать хвост распределения предельными распределениями, генерализованным распределением экстремальных значений (GEV) и генерализованным распределением Парето (GPD). В случае точного определения параметров предельного распределения нетрудно рассчитать любую статистическую характеристику исследуемого распределения. Сравниваются методы расчета параметров предельных распределений, и рекомендуется наиболее робастный из них. Второй подход основывается на использовании модели мультипликативного каскада в линейном и нелинейном вариантах. В этом подходе определяемыми параметрами являются коэффициенты кинетического уравнения, позволяющего смоделировать поток землетрясений. Введение нелинейных членов в кинетическое уравнение позволяет смоделировать как загиб вниз графика повторяемости землетрясений, так и эффект временного выполаживания графика Гутенберга-Рихтера и развитие эффекта характеристических землетрясений. В завершение приводятся некоторые результаты применения указанных методов к анализу сейсмичности. Ключевые слова: хвост распределения, сейсмическая опасность, предельное распределение, мультипликативный каскад, характеристическое землетрясение

Нерешенной проблемой при оценке сейсмической опасности остается задача расчета долгосрочной сейсмической опасности редких экстремально сильных землетрясений. Как показал пример японмегаземлетрясения Тохоку (11.03.2011,ского М=9.0), даже одна из лучших на планете сетей сейсмических наблюдений и весьма длительный (с 869 г. н.э.) ряд данных по исторической сейсмичности не обеспечили получение надежных оценок долгосрочной сейсмической опасности. Расчеты величин М<sub>мах</sub> для территории Японии оказались заниженными, что и привело к недооценке возможной высоты волны цунами и катастрофе на АЭС Фукусима. Тем более это касается регионов с менее полными данными по исторической и инструментальной сейсмичности.

С теоретической точки зрения вопрос заключается в оценке поведения хвоста функции распределения в области редких сильнейших событий. В статье кратко представлены два, по-видимому, наиболее общих подхода к этой проблеме. В завершение статьи приводятся некоторые результаты их применения к анализу сейсмичности.

Первый подход основан на использовании теории экстремальных значений. Согласно этой теории, поведение хвоста распределения может быть описано двумя предельными распределениями – генерализованным распределением экстремальных значений (GEV) и генерализованным распределением Парето (GPD) [1–4 и др.]. Формула для расчета предельного GEV распределения задается тремя параметрами. Обобщенное распределение Парето задается двумя параметрами (и порогом h, начиная с которого рассматриваются эмпирические данные  $x_i \ge h$ , h задается и полагается известным). После того как достаточно точно определены параметры GEV или GPD распределения, нетрудно рассчитать любые характеристики хвоста исследуемого распределения.

Условием применимости предельных GEV и GPD распределений является достаточно монотонное поведение хвоста функции распределения. Естественно, на практике часто нет уверенности, что это требование выполняется. Более того, такое условие монотонности не выполняется для некоторых сейсмических регионов на масштабе времени в сотни лет (если возникают характеристические землетрясения). Обычно нет уверенности и в том, что поведение хвоста функции распределения представлено достаточным числом случаев, чтобы можно было точно оценить значения параметров предельных распределений (GEV или GPD).

Общим для обоих предельных распределений и наиболее важным в дальнейшем является параметр формы  $\xi$ . Встречающимся на практике распределениям отвечают значения  $|\xi|<1$ . Положительные значения  $\xi$  отвечают бесконечным распределениям, которые ведут себя на бесконечности степенным образом, как  $x^{-1/\xi}$ , при этом плотность распределения убывает как  $x^{-1/\xi}$ . Значение  $\xi=0$  отвечают ограниченным распределения. Максимально возможное значение (правая точка распределения)  $M_{\text{мах}}$  оценивается при этом как  $M_{\text{мах}}=A-s/\xi$ , где A – максимально наблюденное значение, а s – параметр формы данного распределения.

В монографиях [1, 2] даны формулы взаимного пересчета параметров GEV и GPD распределений. Отсюда достаточно ограничиться рассмотрением одного из них, далее будет использоваться GPD распределение.

Отметим то очевидное обстоятельство, что все реально измеримые величины конечны. Резонно предположить, что и достаточно точно описывающие эти данные теоретические распределения также должны быть конечны. Однако широко применяемые в сейсмологии распределения числа землетрясений (распределение Гуттенберга-Рихтера и даже корректирующее это распределение в области сильных землетрясений распределение, предложенное Я. Каганом [5]), не отвечают этому требованию, они бесконечны. Косвенно это указывает на то, что эти законы распределений в области редких сильнейших событий недостаточно точны. Использование аппарата предельных распределений для аппроксимации сейсмологических данных приводит к преимущественно отрицательным значениям параметра ξ. Тем самым описывающие эти данные предельные распределения оказываются конечны, что косвенно указывает на большую точность такого описания.

Обычно задача подгонки параметров решается методом максимального правдоподобия. Этот метод, как известно, обеспечивает наилучшее решение задачи для случая достаточно больших выборок. Однако при аппроксимации данных по экстремальным событиям (в частности, сильным землетрясениям) число таких событий часто составляет лишь несколько десятков, что недостаточно для хорошей работы метода максимального правдоподобия. С учетом этого обстоятельства было проведено сравнение эффективности трех методов расчета значений параметров распределения GPD - метода максимального правдоподобия, метода моментов и метода квантилей. Показано, что для случая малых выборок наименьшую ошибку дает метод квантилей, этот метод и использован далее при анализе малых выборок.

Вторым, весьма общим, подходом к описанию хвоста функции распределения может служить модель мультипликативного каскада в линейном и нелинейном вариантах [6, 7]. Эта модель позволяет имитировать все известные особенности сейсмического режима, в частности (в нелинейном варианте) «загиб вниз» графика повторяемости землетрясений, возникновение характеристических землетрясений и комбинацию этих эффектов. Из этой модели следует, что условием возникновения характеристических землетрясений является развитие положительной нелинейной связи в процессе роста очага землетрясения. Сравнение с сейсмическими каталогами показывает [7], что такой режим имеет тенденцию реализовываться в зонах субдукции, что позволяет связать его с повышенными концентрациями флюидной фазы, характерными для зон субдукции.

По данным Глобального каталога сейсмических моментов (GCMT) составлены три набора данных, отражающие типичное распределение величин M<sub>W</sub> для зон субдукции, зон континентальной коллизии и зон срединно-океанических хребтов. Для этих трех совокупностей оценены значения параметров формы ξ и параметра масштаба s соответствующего обобщенного распределения Парето. Значительный разброс значений параметра формы  $\xi$  не позволяет говорить о различии средних значений этого параметра для разных сейсмотектонических обстановок. При этом для всех трех подборок значения параметр формы ξ оказался значимо отрицательным. Это говорит о том, что теоретическое распределение хвоста функции распределения является конечным, и можно, хотя и с большой погрешностью, определить значение максимально возможного землетрясения. Параметр масштаба s коррелирует с величиной наклона графика повторяемости в диапазоне магнитуд средней силы.

Полученные значения параметров предельного GPD распределения позволяют ставить вопрос о возможности нового подхода к расчету сейсмической опасности.

# ЛИТЕРАТУРА

<sup>1.</sup> Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф // Вычислительная сейсмология. 2007. Вып. 38. М.: ГЕОС, 2007. 240 с.

2. Pisarenko V., Rodkin M. Heavy-tailed distributions in disaster analysis // Advances in Natural and Technological Hazards Research. 2010. V. 30. Dordrecht-Heidelberg-London-New York: Springer, 2010. 190 p.

3. Pisarenko V., Rodkin M. Statistical analysis of natural disasters and related losses // Springer Briefs in Earth Sciences. Dordrecht-Heidelberg-London-New York: Springer, 2014. 82 p.

4. Писаренко В.Ф., Родкин М.В., Рукавишникова Т.А. Оценка вероятности сильнейших сейсмических катастроф на основе теории экстремальных значений // Физика Земли. 2014. № 3. С. 89–103.

5. Kagan Y.Y. Universality of the seismic moment-frequency relation // Pure and Applied Geophysics. 1999. V. 1. P. 537–573.

6. Родкин М.В. Модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных состояний // Физика Земли. 2011. № 10. С. 18–26.

7. Родкин М.В., Нго Тхи Лы, Лабунцова Л.М. Расширение модели мультипликативного каскада для описания режима повторяемости сильнейших землетрясений применительно к региональной сейсмичности Юго-Восточной Азии // Геофизические исследования. 2015. Т. 16, № 2. С. 59–69.

# DISTRIBUTION FUNCTION TAILS AS APPLIED TO SEISMIC HAZARD ASSESSMENT

V.F. Pisarenko<sup>1</sup>, M.V. Rodkin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia <sup>2</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

*Abstract.* Calculations for determining long-term seismic hazard related to very large, rare earthquakes are an unsolved problem in seismic hazard assessment. Theoretically, the question is to evaluate tail behavior of distribution function associated with very large, rare events. The article presents and compares the two most common approaches to this problem. The first approach is based upon extreme value theory, which allows parameterizing the distribution function tail with limiting distributions, i.e. the generalized extreme value distribution (GEV) and the generalized Pareto distribution (GPD). If the parameters of these distributions are determined precisely, then calculation can be performed on any statistical characteristic of the distribution under study. A comparison is made between several methods determining the limiting distribution parameters from the empirical data, with the most appropriate robust approach recommended. The second approach is based on the use of linear and non-linear multiplicative cascade models. The parameters to be determined therewith are the coefficients of kinetic equation, which allows modeling of earthquake flow. The introduction of nonlinear terms into the kinetic equation allows one to model both the "bend-down" of earthquake recurrence curve and the effect of a temporary flattening of the Gutenberg-Richter curve and the characteristic earthquake effects development. The article finally presents some results of application of the above methods to seismic analysis. *Keywords:* distribution function tail, seismic hazard, limiting distribution, multiplicative cascade, characteristic earthquake

\*\*\*

УДК 550.34

## ИСТОРИЧЕСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 13 НОЯБРЯ 1898 ГОДА В ЗАПАДНОМ ЗАБАЙКАЛЬЕ

### Я.Б. Радзиминович

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. В работе рассматривается ранее неизвестное землетрясение, произошедшее 13 ноября 1898 г. В качестве источника первичных макросейсмических данных использована региональная периодическая печать. Согласно новым данным эпицентр землетрясения локализован в Западном Забайкалье, в районе западного окончания Малханского хребта; оценка магнитуды составила  $M=5.9(\pm 0.5)$ . Информация о землетрясении 13 ноября 1898 г. позволяет восполнить дефицит знаний о сейсмичности Западного Забайкалья и уточнить представления о минимальном сейсмическом потенциале расположенных здесь разломов.

Ключевые слова: историческое землетрясение, макросейсмические данные, Западное Забайкалье

Современные каталоги землетрясений Северной Евразии содержат сведения о сейсмичности за длительное время, что позволяет решать ряд задач фундаментального и прикладного характера. Базовыми параметрическими сволками на ланный момент следует считать «Новый каталог сильных землетрясений...» [1], изданный более трех десятилетий назад, а также «Специализированный каталог землетрясений», подготовленный в рамках работ по созданию новой карты сейсмического районирования России ОСР-2012 и размещенный в сети Internet на web-сайте «Сейсмобезопасность России» (http://seismorus.ru/eq\_cat). Для территории Восточной Сибири данные в указанных каталогах ограничены временным отрезком длительностью чуть более 300 лет. Наиболее полная и надежная информация имеется для так называемого инструментального периода наблюдений, берущего отсчет со времени развертывания региональной сети сейсмических станций на рубеже 1950 и 1960-х гг. Вместе с тем инструментальный период слишком короток для того, чтобы судить об особенностях сейсмического режима в долгосрочной перспективе. Восполнить дефицит данных можно лишь с помощью тщательного поиска неизвестных землетрясений, произошедших в историческом прошлом. Обнаружение новых материалов об исторических землетрясениях Прибайкалья вполне вероятно, поскольку в предше-
ствующих исследованиях использованы далеко не все потенциальные источники информации.

Основным источником данных о сейсмических проявлениях исторического прошлого в Прибайкалье можно считать региональную прессу. Стоит отметить, что в международной практике периодическая печать зарекомендовала себя как весьма надежный источник макросейсмических сведений [2-10 и многие другие]. В результате поиска сведений в газетах, выпускавшихся в Восточной Сибири в конце XIX в. - начале XX в., было выявлено неизвестное ранее землетрясение, произошедшее 13 ноября (1 ноября ст. ст.) 1898 г. в Западном Забайкалье. Описания макросейсмических эффектов, наблюдавшихся при этом событии, содержатся в нескольких заметках и корреспонденциях, опубликованных в газетах «Восточное обозрение» и «Байкал». Ниже приведено дословное цитирование оригинальных текстов газетных сообщений, с указанием выходных данных первоисточников и оценкой интенсивности сотрясений по шкале MSK-64. Схема макросейсмических проявлений представлена на рисунке.

Станица Кударинская (в настоящее время с. Большая Кудара) (V–VI баллов). «Станица Кударинская. 1 ноября в 10 ч. 35 м. вечера здесь было землетрясение, продолжавшееся несколько секунд, с одним довольно сильным толчком, потрясшим избы до того, что с потолков посыпалась земля, посуда забренчала, мебель зашевелилась; направление было с северо-запада на юго-восток». («Байкал», 1898, 8 ноября, № 40, с. 4).

Кяхта-Троицкосавск (в настоящее время г. Кяхта) (V баллов). Источник 1: «Современная летопись Кяхты-Троицкосавска. ... При землетрясении 1 ноября в Кяхте-Троицкосавске сейсмоскоп показал направление удара с северо-запада на юго-восток. Время по часам троицкосавской почтовотелеграфной конторы было – 10 часов 38 минут пополудни. Толчок по силе был средний, так как

ощущался людьми (и животными) даже в первых, нижних этажах зданий. Продолжительность была не более 3-4 секунд, но, по словам многих лиц, землетрясение чувствовалось долее, судя по сотрясению посуды, мебели и проч., а особенно в верхних этажах зданий, так что казалось длившимся около полуминуты. Землетрясение это было и на реке Иро, в 75 верстах к югу от Кяхты» («Байкал», 1898, 8 ноября, № 40, с. 4). Кроме Кяхты и Троицкосавска в заметке упоминается место наблюдения на территории Монголии. Точно идентифицировать этот пункт сейчас невозможно, тем не менее имеется довольно ясное указание на его местоположение - на реке Иро (р. Еро-Гол) в 75 верстах (~80 км) от Кяхты, что позволяет нанести его на схему макросейсмических проявлений. Интенсивность сотрясений в этой точке можно оценить в IV-V баллов. Источник 2: «Кяхта, 10 ноября 1897 г. ... 1 ноября в 10 час. 40 мин. вечера здесь было сильное землетрясение, продолжавшееся секунд 20-30 и сопровождавшееся шумом. Наблюдающим тотчас же было обращено внимание на лампадку: она не качалась. Это же сказали некоторые другие лица, которых спросили об этом. Не было ли это ударом снизу вверх? Землетрясение это наблюдалось в деревнях по Чикою, притом в некоторых оно было настолько сильное, что печи и каменные кладки дали трещины» («Восточное обозрение», 1898, 25 ноября, № 139, с. 2-3). В данной корреспонденции допущена опечатка в обозначении года: вместо «10 ноября 1897 г.» следует читать «10 ноября 1898 г.». Наряду с описанием землетрясения в Кяхте заметка содержит указание на сильные макросейсмические эффекты «в деревнях по Чикою». Очевидно, имеются в виду населенные пункты, расположенные в долине р. Чикой вблизи границы с Монголией. С учетом наблюдавшихся эффектов интенсивность сотрясений можно оценить не менее чем в VI баллов.



Схема макросейсмических проявлений землетрясения 13 ноября 1898 г. *I* – интенсивность сотрясений в баллах по шкале MSK-64; *2* – области ощутимости землетрясения, на которые имеются косвенные указания в газетных сообщениях; *3* – макросейсмический эпицентр; *4* – линия Забайкальской железной дороги; *5* – государственная граница.

Селенгинск (в настоящее время Новоселенгинск) (V баллов). Источник 1: «Корреспонденция. Селенгинск. ... Бывшим на 2 сего ноября в 11<sup>1</sup>/4 час. ночи землетрясением причинены повреждения в местном Вознесенском соборе: своды арок боковых приделов дали трещины настолько значительные, что по осмотре их 5 числа комиссией в лице священника Стукова, гор. головы Мельникова, секретаря полиции Николаева и бывшего распорядителя комитета при постройке этого храма (в 1850 годах) купца Александра Мих. Лушникова признано нужным донести о повреждениях епархиальному начальству, с просьбой командировать архитектора для специального осмотра трещин, не будут ли они угрожать опасностью для целости храма» («Байкал», 1898, 15 ноября, № 41, с. 4). Источник 2: «Кабанское, Заб. обл. ... В Селенгинске ночью с 31 октября на 1 ноября около 111/2 часов вечера наблюдалось волнообразное землетрясение, шедшее, надо полагать, с юго-запада на северо-восток. Чувствовалось два толчка довольно значительной силы, следовавшие один за другим. Было, говорят, землетрясение также и в Троицкосавске» («Восточное обозрение», 1898, 10 декабря, № 149, с. 2–3). Отметим, что автором заметки неверно указана дата землетрясения – «с 31 октября на 1 ноября», тогда как должно быть «с 1 на 2 ноября».

Красный Яр (в настоящее время Красный Чикой) (V баллов). «С. Красный Яр, Нижнеудинского округа. С 1-го на 2-е ноября с. г. около 11 часов вечера здесь было землетрясение, два сильных толчка, сопровождавшихся подземным гулом» («Восточное обозрение», 1898, 15 ноября, № 135, с. 3). В указании административно-территориальной принадлежности села явно допущена ошибка. Нижнеудинский округ был расположен на значительном удалении (до 800-900 км) к северо-западу от подвергшихся сильным сотрясениям пунктов Западного Забайкалья, соответственно, на его территории едва ли могли наблюдаться «два сильных толчка, сопровождавшихся подземным гулом». Ошибку можно объяснить тем, что в редакции на этапе подготовке номера газеты к печати были перепутаны названия двух округов - Нижнеудинского и Верхнеудинского. Вероятнее всего, имеется в виду село Красный Яр, расположенное на реке Чикой и до 1917 г. являвшееся центром Красноярской волости Верхнеудинского округа (с 1901 г. – уезда). В 1933 г. село Красный Яр было переименовано и получило свое современное название – Красный Чикой.

Забайкальская железная дорога. «Землетрясение. 1 ноября около 10 ч. 45 м. вечера по иркутскому времени в районе 4, 5 и 6 участков Забайкальской железной дороги да, вероятно, и в других местах было землетрясение, предшествуемое и сопровождаемое подземным гулом. В зданиях слышался треск и дребезжание стекол» («Восточное обозрение», 1898, 13 декабря, № 152, с. 1). Названия населенных пунктов не приводятся, однако имеется указание на участки Управления по сооружению Забайкальской железной дороги. Согласно справочному изданию «Путеводитель по Великой Сибирской железной дороге», контора начальника 4-го участка располагалась в Верхнеудинске, контора 5-го участка – в Петровском заводе, контора 6-го участка – в с. Толбага [11]. Интенсивность сотрясений в этих пунктах оценивается в IV–V баллов.

Нерчинск (II балла). «Корреспонденция. Нерчинск, 1 декабря. … В ночь на 2 ноября довольно чувствительное по газетным известиям в Западном Забайкалье землетрясение, слабо чувствовалось и здесь» («Байкал», 1898, 20 декабря, № 46, с. 7).

Урга (в настоящее время г. Улан-Батор). «... Нам сообщают из Урги от 19 ноября, что там погода отличная теплая, хотя и лежит небольшой снег, но для скотоводства безвредно. Землетрясения 1 ноября не замечено» («Байкал», 1898, 6 декабря, № 44).

Обнаруженные в газетных публикациях описания макросейсмических эффектов в населенных пунктах Забайкалья послужили для ориентировочного определения параметров землетрясения. С этой целью была использована номограмма (M,  $\Delta$ , I)корреляции для Прибайкалья, в основе которой лежит макросейсмическое уравнение Н.В. Шебалина [12] с региональными коэффициентами согласно [1]:

$$I = bM - v \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + c, \qquad (1)$$

где I – интенсивность землетрясения; M – магнитуда;  $\Delta$  – эпицентральное расстояние; h – глубина очага; b, v и c – коэффициенты, равные для территории Прибайкалья 1.5, 4 и 4 соответственно. Уравнение (1) и номограмма (M,  $\Delta$ , I)-корреляции основаны на магнитуде  $M_{\rm LH}$ , рассчитываемой по амплитудам поверхностных волн. Т.о., магнитуды исторических землетрясений, рассчитанные по уравнению (1), можно считать эквивалентными магнитуде  $M_{\rm LH}$ .

Основные параметры землетрясения 13 ноября 1898 г. были определены с применением способа Н.В. Шебалина [13], ориентированного на случаи со скудным набором исходных данных. Суть способа состоит в переборе нескольких значений магнитуды, для каждого из которых по региональному макросейсмическому уравнению рассчитываются эпицентральные расстояния до пунктов с известной интенсивностью. В итоге по наилучшей засечке эпицентральных расстояний одновременно определяются макросейсмический эпицентр и магнитуда землетрясения. Полученные в результате оценки параметров землетрясения представлены в таблице. Эпицентр локализуется севернее долины р. Чикой в районе западного окончания Малханского хребта. Глубина гипоцентра землетрясения 13 ноября 1898 г. может быть оценена лишь условно. В Байкальской рифтовой зоне гипоцентры сосредоточены в диапазоне глубин 10-25 км [14]. Вероятно, значение глубины очага рассматриваемого землетрясения лежит в этих же пределах.

		Основные параметры землетрясения 13 ноября 1998 г.			
Дата,	Время UTC,	Эпицентр		м	Глубина очага
год.мес.день	ч мин	широта	долгота	M LH	<i>h</i> , км
1898.11.13	16:00±1 час	50.4±0.4	107.8±0.4	5.9±0.5	(10–25)

Примечание. В скобках указано ориентировочное значение.

В заключение отметим, что землетрясение 13 ноября 1898 г. можно считать своеобразным «белым пятном» в сейсмической истории Восточной Сибири. Оценка его основных параметров имеет немаловажное значение в аспекте усовершенствования знаний о сейсмичности Западного Забайкалья и восполнения пробелов в параметрическом каталоге землетрясений Восточной Сибири. В дальнейшем весьма вероятно обнаружение других неизвестных до сего времени сейсмических событий исторического прошлого. Решение этой задачи – вопрос времени и определенных усилий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 535 с.

2. Agnew D.C., Sieh K.E. A documentary study of the felt effects of the great California earthquake of 1857 // Bulletin of the Seismological Society of America. 1978. V. 68, № 6. P. 1717–1729.

3. Musson R.M.W. The use of newspaper data in historical earthquake studies // Disasters. 1986. V. 10, № 3. P. 217–223.

4. Musson R.M.W. Historical seismicity of South China from European sources: example of the Hong Kong Newspaper Press // Acta Seismologica Sinica. 1995. V. 8, № 3. P. 487–490.

5. Seeber L., Armbruster J.G. The 1886–1889 aftershocks of the Charleston, South Carolina, earthquake: a widespread burst of seismicity // Journal of Geophysical Research. 1987. V. 92, № B3. P. 2663–2696.

6. Talwani P., Sharma N. Reevaluation of the magnitudes of three destructive aftershocks of the 1886 Charleston earthquake // Seismological Research Letters. 1999. V. 70, № 3. P. 360–367.

7. Татевосян Р.Э., Мокрушина Н.Г. Историческая сейсмичность Среднего Поволжья // Физика Земли. 2003. № 3. С. 13–41.

8. Mäntyniemi P. A List of previously unknown earthquakes in Finland between 1877 and 1887 based on newspaper reports // Geophysica. 2004. V. 40, № 1–2. P. 15–22.

9. Downes G.L. Procedures and tools used in the investigation of New Zealand's historical earthquakes // Annals of Geophysics. 2004. V. 47, № 2–3. P. 399–419.

10. Никонов А.А. О сильнейших исторических землетрясениях и сейсмическом потенциале Горного Алтая // Физика Земли. 2005. № 1. С. 36–50.

11. Путеводитель по Великой Сибирской железной дороге / Под ред. А.И. Дмитриева-Мамонова, А.Ф. Здзярского. СПб.: Товарищество «Художественной печати», 1900. 600 с.

12. Shebalin N.V. Macroseismic data as information on source parameters of large earthquakes // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1972. V. 6, № 4. P. 316–323.

13. Шебалин Н.В. Количественная макросейсмика (фрагменты незавершенной монографии) // Вычислительная сейсмология. Вып. 34. М.: ГЕОС, 2003. С. 57–200.

14. Радзиминович Н.А. Глубины очагов землетрясений Байкальского региона: обзор // Физика Земли. 2010. № 3. С. 37–51.

#### HISTORICAL EARTHQUAKE OF NOVEMBER 13, 1898 IN WESTERN TRANSBAIKALIA

### Y.B. Radziminovich

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. The present paper deals with the previously unknown earthquake that occurred on November 13, 1898. The primary macroseismic data were taken from regional periodicals. Newly found evidence suggests that the earthquake epicenter is localized in Western Transbaikalia, near the western end of the Malkhansky Range, with the magnitude estimated at M=5.9(±0.5). The information about the large earthquake of November 13, 1898 allows filling gaps in knowledge of seismicity in Western Transbaikalia and provides a better understanding of seismic potential of faults therein. *Keywords:* historical earthquake, macroseismic data, Western Transbaikalia

\*\*\*

УДК 550.844+546.791.027+632.126

## МОНИТОРИНГОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОНЫХ ЭФФЕКТОВ ЧАЛОВА-ЧЕРДЫНЦЕВА В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ КУЛТУКСКОГО ПОЛИГОНА КАК ОТКЛИКОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ АКТИВИЗАЦИИ КОРЫ ЮЖНОГО БАЙКАЛА: ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОГНОЗА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

С.В. Рассказов<sup>1,2</sup>, Е.П. Чебыкин<sup>1,3</sup>, А.М. Ильясова<sup>1</sup>, Е.Н. Воднева<sup>1,3</sup>, И.С. Чувашова<sup>1,2</sup>, С.А. Борняков<sup>1,2</sup>, С.В. Снопков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Обсуждаются результаты мониторинга деформационных эффектов Чалова-Чердынцева в подземных водах Култукского полигона, согласующихся с пространственно-временным развитием сейсмического процесса в коре Южного Байкала. Система наблюдений, организованных в 2012 г., может обеспечить среднесрочный прогноз будущего сильного землетрясения этой территории, ожидаемого в 2017–2019 гг. Период его непосредственной подготовки составит около 40 дней. Детальный сценарий приближения основного события с выходом на краткосрочный прогноз может быть получен в течение этого периода при регистрации (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) в подземных водах полигона с частотой 3–4 дня. *Ключевые слова:* Прибайкалье, подземные воды, <sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U, сейсмичность

На Южном Байкале за два последних десятилетия произошло два сильных землетрясения: Южно-Байкальское (1999 г.) и Култукское (2008 г.) с магнитудами  $M_W$ =6.0 и 6.3 (энергетические классы K=14.6 и 15.9) [1–3]. Следующее сильное землетрясение представляет серьезную опасность для окружающих урбанизированных территорий, в том числе для областного центра Иркутск.

Анализ сейсмичности Южного Байкала с использованием каталога Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН [1] показал шесть сейсмических активизаций во временном интервале 2005-2015 гг. Для обоснования прогностических признаков приближения будущего сильного сейсмического события исследуется состояние коры после продолжительной активизации 2007-2010 гг., повлекшей за собой сильное Култукское землетрясение. Слабые сейсмические активизации 2011-2012, 2013 и 2014 гг. характеризуются максимальными землетрясениями К=10.4-11.2. В 2011-2012 гг. эпицентры землетрясений имели осциллирующее вращательное распределение относительно Выдринского центра, расположенного у южного берега Байкала. В 2013 г. отдельные эпицентры смещались от Среднего Байкала к западному окончанию Обручевского разлома. В 2014 г. в том же направлении смещались эпицентральные поля. Как правило, если сейсмическая активизация начиналась в акватории Байкала, она и завершалась в акватории. В случае начала активизации на южном побережье Байкала, последнее событие активизации также происходило на этой территории. Акваториальные сейсмические активизации были в целом сильнее побережных.

Главные события каждой активизации предварялись или сменялись сейсмическими событиями на западном окончании Обручевского сброса, ограничивающего впадину Южного Байкала с севера. В настоящее время кора впадины испытывает растяжение, сменяющееся в районе западной оконечности Байкала сжатием сопредельной восточной инверсионной части Тункинской долины. В районе резкой смены растяжения в Южно-Байкальской впадине сжатием в Тункинской долине с 2012 г. проводятся изотопно-геохимические исследования подземных вод на Култукском полигоне мониторинга изотопных отношений активностей урана (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) для регистрации деформационных эффектов Чалова-Чердынцева [4, 5].

За период наблюдений выявлена связь импульсных деформаций коры Култукского полигона с сейсмическими активизациями коры Южного Байкала. Эти деформации были обусловлены эпизодическим усилением растяжения коры, распространявшимся от впадины Южного Байкала непосредственно на полигон, и ее сжатием вдоль Обручевского разлома, сопряженным с растяжением. Относительное снижение ( $^{234}$ U/ $^{238}$ U) в подземных водах полигона от активизаций 2011–2012 и 2013 гг. к активизации 2014 г. свидетельствует о происходившем спаде сейсмогенерирующих процессов с переходом к длительному асейсмичному интервалу.

Перестройки питающей системы подземных вод и импульсное усиление деформационных эффектов Чалова-Чердынцева на Култукском полигоне информативны для определения закономерностей в развитии будущих сейсмических активизаций Южного Байкала. Система наблюдений может обеспечить среднесрочный прогноз будущего сильного землетрясения этой территории, ожидаемого ориентировочно в 2017–2019 гг. Период его непосредственной подготовки составит около 40 мониторинговых дней. При регистрации (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) в подземных водах полигона с частотой 3–4 дня в течение этого периода может быть получен детальный деформационный сценарий приближения основного события.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Байкальский филиал Геофизической службы, 2013. http://www.seis-bykl.ru/index.php?ma=1.

2. Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Масальский О.К. Култукское землетрясение 2008 г. с Мw=6.3 на юге Байкала: Пространственно-временной анализ сейсмической активизации // Физика Земли. 2012. № 11. С. 44–62.

3. Радзиминович Н.А., Мельникова В.И., Саньков В.А., Леви К.Г. Сейсмичность и сейсмотектонические деформации земной коры Южно-Байкальской впадины // Физика Земли. 2006. № 11. С. 44–62.

4. Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации (<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U) и <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–553.

5. Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга <sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U в водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады Академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.

## MONITORING STUDY OF THE CHALOV-CHERDYNTSEV EFFECT IN GROUNDWATER AT THE KULTUK POLYGON AS RESPONSES TO SEISMIC REACTIVATIONS IN THE CRUST OF SOUTH BAIKAL: STRONG EARTHQUAKE PREDICTION POSSIBILITY

S.V. Rasskazov<sup>1,2</sup>, E.P. Chebykin<sup>1,3</sup>, A.M. Ilyasova<sup>1</sup>, E.N. Vodneva<sup>1,3</sup>, I.S. Chuvashova<sup>1,2</sup>, S.A. Bornyakov<sup>1,2</sup>, S.V. Snopkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup>Limnological Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Presented here are the results of monitoring the Chalov-Cherdyntsev effect in groundwater at the Kultuk polygon consistent with spatial-temporal distribution of seismic processes in the crust of South Baikal. The system of observations organized since 2012 can provide a moderate-term prediction of a strong earthquake expected therein in 2017–2019. Its generation period will be about 40 days. A detailed scenario of the main upcoming event involving a short-term prediction can be obtained within this period through every 3–4-day registration of  $(^{234}U/^{238}U)$  in groundwater at the polygon. *Keywords*: Baikal area, groundwater,  $^{234}U/^{238}U$ , seismicity

\*\*\*

УДК 550.343

# РЕЗУЛЬТАТЫ ПАЛЕОСЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАЗНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ ЕВРАЗИИ

Е.А. Рогожин, А.Н. Овсюченко, А.С. Ларьков, С.С. Новиков, С.Н. Родина

## Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Аннотация. Проведены сейсмотектонические исследования зон Нефтегорского, Алтайского и Олюторского землетрясений, обобщены сведения других авторов о палеоземлетрясениях. Оценены сила и периоды повторяемости сильных событий. Реконструирован долговременный сейсмический режим изучаемых территорий. Наращивание графиков повторяемости на базе сведений о сильных землетрясениях прошлого позволило существенно его дополнить и уточнить. Ключевые слова: землетрясение, палеоземлетрясение, сейсмический режим, график повторяемости

В конце XX – начале XXI в. произошли сильнейшие землетрясения на территории Северного Сахалина, Горного Алтая, а также Корякии, в районах которых были проведены палеосейсмогеологические исследования методом тренчинга. Оценки возраста и силы палеоземлетрясений позволили по-новому взглянуть на сейсмическую историю региона и оценить долговременный сейсмический режим.

Северный Сахалин. В соответствии с картой ОСР-78 на территории Северного Сахалина ожидались землетрясения интенсивностью до 6-7 баллов. Произошедшее Нефтегорское землетрясение с магнитудой *М*=7.5 и интенсивностью *I*<sub>0</sub>=9-10 баллов показало, что сейсмический потенциал территории был недооценен. На территории региона были исследованы активные разломы северо-восточной части Сахалина и обнаружены следы ранее неизвестных доисторических землетрясений с магнитудой 6.0, 7.0, 7.5 и 8.0 [1, 2]. Выявлены и датированы первичные сейсмодислокации на полуострове Шмидта [3]. На основе мировых и региональных каталогов был создан сводный каталог, по которому производились расчеты. Для первого приближения к пониманию сейсмического режима график повторяемости был рассчитан по инструментальным и историческим данным, далее были добавлены результаты палеосейсмогеологических работ (рис. 1). Обобшенному графику повторяемости соответствует следующее уравнение:

## $lg(N/T) = (4.31 \pm 0.42) - (1.04 \pm 0.05)M, R_{C} = 0.99.$

Новые палеосейсмогеологические данные охватывают в возрастном отношении практически весь голоцен. Полученные результаты свидетельствуют о прямолинейности графика повторяемости во всем диапазоне магнитуд в исследованных зонах разломов Северного Сахалина.

Алтай. Регион Горного Алтая считался областью с умеренным уровнем сейсмической активности. До 1990-х годов достоверных сведений о землетрясениях *М*>6.5 в течение инструментального и исторического периодов сейсмологических наблюдений не было. Проведенные в 1996–1998 гг. сейсмотектонические и палеосейсмогеологические исследования в южных регионах Горного Алтая показали ошибочность таких заключений [4–6]. Были обнаружены свидетельства очень активных новейших и современных движений, активные геологические нарушения и сейсмодислокации нескольких неизвестных доисторических сильнейших землетрясений, имевших место на протяжении последних 9000 лет [7, 8]. В 2003 г. в Чуйско-Курайской зоне произошло Алтайское землетрясение с M=7.3, подтвердившее правильность полученных результатов.



Рис. 1. График повторяемости землетрясений Северного Сахалина по инструментальным и историческим данным (пунктирная линия) и по инструментальным, историческим и палеосейсмогеологическим данным (сплошная линия).

В процессе палеосейсмогеологических исследований до и после Алтайского землетрясения было выяснено, что сильные сейсмические события произошли примерно 230–300, 1000, 1700, 2300, 3500, 4500, 5200 и 8500 лет назад.

Были построены графики повторяемости для изучаемой территории в интервале *M*=3.0–6.5 по историческим и инструментальным данным и в интервале *M*=3.0–8.0 с учетом сведений об Алтайском землетрясении 2003 г. (рис. 2).



Рис. 2. График повторяемости землетрясений Чуйско-Курайской зоны: a – по историческим и инструментальным данным,  $\delta$  – с учетом сведений об Алтайском землетрясении 2003 г. Точками показаны значения lg(N/T) для интервалов магнитуд, прямой – линия тренда [9].

Графику повторяемости землетрясений соответствует следующее уравнение:

## $lg(N/T) = (3.89 \pm 0.21) - (0.98 \pm 0.02)M, R_{C} = 0.997.$

Сходная работа была выполнена и для западной части Монгольского Алтая, где в 1931 г. произошло сильнейшее Фуюньское землетрясение с M=8.0. При палеосейсмогеологических исследованиях, были выявлены следы трех доисторических землетрясений той же силы, произошедших 9490±370, 6860±10 и 3940±440 лет назад согласно результатам радиоуглеродного анализа [10]. Был построен график повторяемости по инструментальным и историческим сведениям, затем добавлены палеосейсмогеологическим сведениям, затем добавлены палеосейсмогеологические (рис. 3). Общий график повторяемости рассчитан в интервале M=3.5-8.0, решение получено в виде:

 $lg(N/T) = (3.85 \pm 0.59) - (0.90 \pm 0.07)M, R_{C} = 0.998.$ 



Рис. 3. График повторяемости землетрясений Монгольского Алтая по инструментальным и историческим данный (пунктирная линия) и по инструментальным, историческим и палеосейсмогеологическим данным (сплошная линия).

Землетрясения с магнитудами *M*=6.5, 7.0, 7.5 не использовались для построения графика ввиду отсутствия данных о повторяемости таких событий. Вероятно, требуется проведение дополнительных палеосейсмогеологических работ с целью обнаружения исторических событий.

Корякское нагорье. Район Корякского нагорья до 1990-х годов XX в. считался слабосейсмичным,

там ожидались толчки силой 5–6 баллов. После Хаилинского землетрясения 08.03.1991 г. интенсивностью 7–8 баллов сейсмичность района была пересмотрена. По картам ОСР-97А исследуемая зона относилась к 8-балльной области, однако Олюторское землетрясение с магнитудой  $M_{\rm S}$ =7.8 и интенсивностью 9–10 баллов показало несоответствие предполагаемому сейсмическому потенциалу территории.

В результате сейсмотектонических работ были оценены магнитуды и установлены периоды сейсмических активизаций прошлого. Данные радиоуглеродного анализа палеопочв позволили восстановить возраст пяти сильных сейсмических событий: за 7 тысяч лет произошло два землетрясения с *M*=7.5, за 5.5 тысяч лет – три землетрясения с *M*=7.0.

По данным сводного каталога был рассчитан общий график повторяемости (рис. 4), которому соответствует следующее уравнение:

 $lg(N/T) = (6.77 \pm 0.64) - (1.03 \pm 0.80)M, R_{\rm C} = 0.99.$ 



Рис. 4. График повторяемости землетрясений Корякского нагорья по инструментальным и историческим данным (пунктирная линия) и по инструментальным, историческим и палеосейсмогеологическим данным (сплошная линия).

Палеосейсмогеологические материалы вместе со сведениями о землетрясениях инструментального и исторического периодов сейсмологических наблюдений дали возможность оценить сейсмический режим региона на протяжении 7 тысяч лет. В результате палеосейсмогеологических исследований обнаружены следы неизвестных ранее сильных землетрясений, которые позволили оценить периоды повторяемости сильных толчков.

Проведенные исследования показали, что сильнейшие землетрясения, происходящие в последнее время, не случайные события, они отражают современный этап развития длительной сейсмической истории различных очаговых зон. Прямолинейность графиков повторяемости говорит о том, что сейсмический режим изучаемых регионов оставался практически неизменным. Обобщение сейсмологического и палеосейсмогеологического материала позволило впервые оценить сейсмический режим территорий Северного Сахалина, Монгольского Алтая и Корякского нагорья на протяжении всего голоцена.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14–05–10035\_а) и Программы Президиума РАН.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У. и др. Активные разломы Северо-Восточного Сахалина // Геотектони-ка. 2002. № 3. С. 227–246.

2. Рогожин Е.А., Рейснер Г.И., Бесстрашнов В.М., Стром А.Л., Борисенко Л.С. Сейсмотектоническая обстановка о. Сахалин // Физика Земли. 2002. № 3. С. 35–44.

3. Кожурин А.И., Лободенко И.Ю., Стром А.Л. Следы сильных землетрясений на полуострове Шмидта – северной части о. Сахалин в голоценовое время // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2009. № 4. С. 23–29.

4. Рейснер Г.И., Иогансон Л.И. Оценка сейсмического потенциала Алтая с применением внерегионального сейсмотектонического метода // Информационно-аналитический бюллетень. 1996. №1–2. С. 90–95.

5. Рогожин Е.А., Богачкин Б.М., Нечаев Ю.В., Платонова С.Г., Чичагов Б.М., Чичагова О.А. Следы сильных землетрясений прошлого в рельефе Горного Алтая // Геоморфология. 1999. № 1. С. 82–95.

6. Рогожин Е.А., Платонова С.Г. Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 120 с.

7. Hong Shun-Ying, Shen Xu-Hui, Kay Mu-shou, Chen Zheng-Wei, Jing Feng, Ouyang Xin-yan, Rogozhin E.A. Analysis of image feature of major active faults along the eastern margin of Altai Mountains // Seismology and Geology. 2006. V. 28, № 1. P. 119–128.

8. Рогожин Е.А. Очерки региональной сейсмотектоники / Отв. ред. О.А. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2012. 340 с.

9. Захарова А.И., Рогожин Е.А. Пространственно-временные соотношения очагов сильных землетрясений и их глубокофокусных предвестников // Исследования в области геофизики (к 75-летию Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта). М.: ОИФЗ РАН, 2004. С. 13–19.

10. Ge Shumo, Bo Meixiang, Zheng Fuwan, Luo Fuzhong. The Koktokay-Ertai Fault, Xinjiang, China // J. Earthq. Pred. Res. 1996. V. 5, № 4. P. 470–504.

## RESULTS OF PALEOSEISMOLOGICAL RESEARCH IN DIFFERENT GEODYNAMIC SETTINGS OF EURASIA

E.A. Rogozhin, A.N.Ovsyuchenko, A.S. Larkov, S.S. Novikov, S.N. Rodina

Schmidt Institute of Physics of the Earth, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Abstract.* Seismotectonic research has been conducted in the Neftegorsk, Altay and Oluytor earthquake zones, with generalization made about the paleoearthquake data provided by other authors. Estimates have been made of strong earthquake Intensity and recurrence interval. Long-term seismic regime reconstruction performed for the investigated territories has been substantially supplemented and refined by the recurrence curve extensions based on the historical strong earthquake data. *Keywords:* earthquake, paleoearthquake, seismic regime, recurrence curve

\*\*\*

УДК 550.34

## ОЦЕНКА PGV ЗНАЧЕНИЙ ОТ ДРЕВНИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ – НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРИЛОЖЕНИЕ К ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

# М.В. Родкин

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: долгосрочная сейсмическая опасность, оценка PGV, смещение скальных отдельностей, очаговая зона

Важной задачей при определении сейсмической опасности является оценка величин и повторяемости экстремально сильных сейсмических воздействий, в частности максимальных скоростей смещения грунта (PGV). Ранее [1] был предложен метод оценки величин PGV по величинам смещения скальных отдельностей. Этот метод затем был апробирован результатами полевых работ в очаговых зонах Сусамырского (1992,  $M_{\rm S}$ =7.3) и Кеминского (1911,  $M_{\rm W}$ =7.9) землетрясений Киргизии и, по данным о смещении камней, в окрестности взрыва, в штольне Уч-Терек (1989, 2кТ). Метод применен для анализа ситуации в вероятных очаговых зонах древних сильных землетрясений на Балтийском щите и в Крыму и для оценки максимальной сотрясаемости в зоне строительства Верхненарынского каскада ГЭС

и в ряде районов Прииссыккулья (Киргизия). Полученные данные позволяют рекомендовать метод для оценки величин максимальных сейсмических воздействий от древних землетрясений. Отметим при этом, что значения PGV теснее коррелируют со значениями балльности и повреждаемостью, чем значения PGA. В методическом плане наш подход является альтернативой применению метода конечных элементов (numerical discrete element discontinuous deformation analysis (DDA) method [2]). Различие между этими подходами отвечает классическому различию в механике подходов на основе решения уравнений движения и на основе законов сохранения. Соответственно, наш подход более прост в реализации, но потенциально менее точен (с учетом характера решаемой задачи последнее обстоятельство представляется несущественным).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Родкин М.В., Никонов М.В., Шварев С.В. Оценка величин сейсмических воздействий по нарушениям и смещениям в скальных массивах // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3, № 3. С. 203–237.

2. Shi G.-H. Block system modeling by discontinuous deformation analysis. Computational Mechanics Publication, Southhampton, UK, 1993.

## PGV VALUES FOR HISTORIC EARTHQUAKES – NEW RESULTS FOR APPLYING TO SEISMIC HAZARD ASSESSMENT

#### M.V. Rodkin

Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Abstract.* An important task of seismic hazard assessment is to calculate effects from extremely large seismic events and their recurrence intervals, and the peak ground velocities (PGV) in particular. An earlier method [1] was proposed to calculate the PGV values from the displacement of rock joints. This method was later supported by the results of the fieldwork study in the Suusamyr (1992,  $M_{\rm S}$ =7.3) and Kemin (1911,  $M_{\rm W}$ =7.9), Kyrgyzstan, earthquake source zones and by the data on rock displacement close to the explosion in adit Uch-Terek (1989, 2kT). The method has been used to analyze the situation in probable source zones of large historic earthquakes on the Baltic Shield and in the Crimea and to estimate the maximum intensity of shaking in the construction zone of the Upper-Naryn cascade of HPP and in some areas of Priissykkulye (Kyrgyzstan). The obtained data allow recommending this method for assessing the maximum effects from historical earthquakes. Note that the PGV values therewith show better correlation with intensity and vulnerability assessments than the PGA values do. Methodically, our method is an alternative to the finite element method [2]. The difference between these approaches corresponds to a classical difference in the mechanisms of approaches based on solving equations of motion and on conservation laws. Our approach is therefore easier but potentially less precise (the latter is insignificant in terms of the problem-solved character). *Keywords:* long-term seismic hazard, PGV value, displacement of rock joints, source zone

\*\*\*

УДК 551.24+550.34

# РАСПОЗНАВАНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ ДРЕВНИХ СЕЙСМОДИСЛОКАЦИЙ В ДЕНУДИРОВАННЫХ ЗОНАХ ГЛУБИННЫХ РАЗЛОМОВ

## В.В.Ружич, В.Б. Савельева

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Обсуждается возможность на земной поверхности визуально изучать очаги «ископаемых землетрясений» в эксгумированных сегментах зон древних разломов после длительной денудации. Распознавание таких объектов возможно методами структурной геологии по ряду петрофизических признаков в горных породах, испытавших стрессметаморфические преобразования, в частности по характерным зеркалам скольжения, возникшим много миллионов лет назад при трении в моменты сейсмогенных движений берегов зон разломов при палеоземлетрясениях. С применением существующих современных методов проведения петрологических и петрофизических анализов образцов горных пород, деформированных в процессе сильнейшего истирания, появляется возможность определять различные физикомеханические параметры, например температуру и давление, сдвиговое сопротивление и т.п., возникавшие ранее при косейсмическом скольжении в глубинных участках разломов. Получение новых ценных данных при изучении подобных тектонофизических условий в глубинных сегментах разломов стимулирует проведение лабораторных экспериментов и позволяет значительно расширять возможности компьютерного конструирования современных моделей очагов землетрясений. Распознавание и углубленное изучение выявленных глубинных палеосейсмодислокаций позволяет создавать более надежную основу для разработки и совершенствования методов прогноза землетрясений и управления деформациями в опасных разломах для снижения катастрофических последствий при масштабных динамических актах разрушения в геологической среде.

*Ключевые слова:* зеркало скольжения, псевдотахилит, разлом, стресс, метаморфизм, очаг землетрясения, денудация, палеосейсмодислокация, прогноз землетрясений

Как известно, землетрясения являются следствием динамического разрушения породных массивов земной коры, сопровождающегося излучением упругих волновых колебаний. Очаги землетрясений возникают в контактных участках зон активных разломов при быстрых смещениях их крыльев. Формирование очагов землетрясений происходит на значительном удалении от земной поверхности, и потому современные очаги недоступны для визуального изучения. В отдельных обстоятельствах при неглубоком залегании фокуса сильного землетрясения верхушка его очага может достигать дневной поверхности и проявляться в виде современных сейсмодислокаций или палеосейсмодислокаций, возраст которых лежит в диапазоне от современного периода до нескольких тысяч лет. Но при подобных условиях устройство поверхностных сейсмодислокаций характеризуется невысокими значениями температур и давлений, кардинальным образом отличающихся от тех, которые проявляются на уровне сейсмофокальных горизонтов в континентальной земной коре. Известные механические модели очагов землетрясений российских и зарубежных ученых созданы в 60-70-е годы прошлого столетия преимущественно физиками, механиками на основании лабораторных экспериментов с небольшими образцами горных пород или эквивалентных материалов, что не позволяет воссоздавать реальные условия в очагах землетрясений как геологических объектов. В представленном сообщении рассматривается принципиально новый подход получения важной информации о параметрах глубинных трибофизических процессов, происходящих в глубокозалегающих (ископаемых) очагах землетрясений, которые происходили десятки-сотни миллионов лет назад на значительных глубинах.

Первое знакомство с зеркалами скольжения и псевдотахилитами произошло в 1986 г. при проведении геолого-структурного изучения сейсмодислокации Гоби-Алтайского катастрофического землетрясения 4.12.1957 г. (*М*=8.6, глубина очага 26 км), возникшей в пределах денудированной зоны Долиноозерского разлома палеозойского возраста заложения. Лабораторное изучение образцов зеркал скольжения и шлифов позволило выявить наличие пленочного плавления, что было интерпретировано как свидетельство фрикционного разогрева плавления при косейсмической подвижке палеоземлетрясения в эксгумированном сегменте древнего коллизионного шва [1, 2]. Согласно последующим проведенным исследованиям российских и зарубежных ученых, было установлено, что подобные зеркала скольжения возникали в процессе фрикционного трения при повышенных скоростях скольжения, температурах и повышенном всестороннем давлении в контактных соприкосновениях неровностей. Формировалось представление о том, что детальное петрофизическое изучение строения и химического состава минеральных преобразований в плоскости скольжения в зонах разломов открывает возможности идентифицировать глубинные палеосейсмодислокации, возникшие много миллионов лет назад при проявлении высокоскоростных трибофизических процессов, происходивших в моменты проявления доисторических землетрясений в земной коре на глубинах в десятки километров [3, 4].

В данном сообщении рассмотрен один из подобных объектов, выявленный в сегменте глубоко денудированной ранне-палеозойского зоны коллизионного шва, на который наложился Приморский разлом. Рассматриваемый объект в скальных обнажений расположен виде в приустьевой части р. Бугульдейка, впадающей в озеро Байкал. Геодинамическая позиция коллизионного шва и зоны Приморского разлома представлена во многих работах, например в [5]. Их них следует, что зона коллизионного шва формировалась в неопротерозое – раннем палеозое, примерно 500 миллионов лет назад при аккреции Баргузинского микроконтинента с древнейшим Сибирским кратоном, имеющим возраст порядка 1.9 миллиарда лет. В раннем – среднем палеозое при постепенном подъеме глубинных горизонтов земной коры к поверхности происходило снижение температур и давлений в недрах земной коры на фоне ретроградного метаморфизма от эпидотамфиболитовой фации до фации зеленых сланцев с характерным диапазоном параметров: *Т*≈350–550 °C и Р≈1.5-3.5 кбар. Применительно к глубинным физико-механическим пока-зателям для земной коры в пределах Байкальской рифтовой зоны подобные РТ-условия в настоящее время существуют на глубинах преимущественно 10-25 км, где по сейсмологическим данным фиксируются гипоцентры современных очагов землетря-сений, включая наиболее сильные с М=7.0-7.9.

На рис. 1 можно видеть сегмент в упомянутом районе зоны Приморского разлома, а на рис. 2 представлена турмалиновая минерализация на высокоскоростного зеркалах скольжения. B описываемом районе располагается открытый для прямого визуального изучения представительный глубинный сегмент зоны древнего коллизионного шва и Приморского сейсмогенерирующего разлома, эксгумирован-ный после многокилометровой денудации верхнего горизонта. Таким образом, в рассматриваемом районе имеется возможность изучать геологическими методами строение зоны древнего разлома со следами косейсмических высокоскоростных подвижек в очагах палеоземлетрясений [4].

К редкой достопримечательности рассматриваемого участка геологического обнажения глубинного сегмента зоны разлома следует отнести наличие турмалиновой минерализации трещин скалывания с зеркал скольжения. Вероятнее всего, это означает, что во многих случаях подобные зеркала скольжения формировались по уже минерализованным трещинам. Следует отметить, что турмалиновая минерализация метаморфических пород – весьма редкое явление.

Богатые турмалином метаморфические породы были открыты в Казахстане при изучении Кумды-Кольского месторождения микроалмазов [6, 7]. На рис. 3 представлена фотография шлифа, сделанного с образца зеркала скольжения в трещине, заполненной турмалином.



Рис. 1. Эксгумированный сегмент зоны древнего коллизионного шва и Приморского рифтогенного разлома.

Примечательность минерала турмалина заключается в том, что он отличается высокой твердостью (7.5 по шкале Мооса) и магнитоэлектрическими свойствами, а также тугоплавкостью (*T*<sub>пл.</sub>=1100 °C). Другое важное достоинство – устойчивость к последующим наложенным термическим явлениям, что позволяет использовать его в числе редких минералов-геохронометров. Это свойство позволяет определять абсолютный возраст его образования с применением <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar датировок [6]. Наличие минералов определенного состава на поверхности зеркал скольжения в ряде случаев позволяет определять возраст сейсмогенных быстрых подвижек. Такая работа в настоящее время выполняется С.В. Рассказовым и Т.А. Ясныгиной в Институте земной коры СО РАН с участием новосибирских ученых, в частности А.В. Травина, А.В. Корсакова и других. Возникновение турмалина в глубинном сегменте зоны скольжения древнейшего краевого шва, по всей вероятности, могло происходить при метасоматозе или гидротермально-пневматолитовом процессе в сочетании с поступлением в возникающие трещины боросодержащих глубинных флюидов с температурой порядка 500-650 °C. Если принять во внимание, что формирование обогащенных турмалином горных пород на упомянутом выше месторождении в Казахстане происходило в период нижнепалеозойского этапа тектонической активизации, то можно, предположительно, отнести формирование турмалиновых зеркал скольжения в данном сегменте Приморского разлома также к нижнепалеозойскому периоду, то есть ко времени проявления стрессметаморфизма в период контактного взаимодействия Баргузинского микроконтинента с древнейшим Сибирским кратоном.

Наряду с зеркалами скольжения, имеющими турмалиновую минерализацию, в обнажении также обнаружены зоны трещин скалывания с зеркалами и следами фрикционного плавления, то есть псевдотахилитами. В них при петрографическом изучении были обнаружены признаки начального плавления и спекания мельчайших частиц минералов горных пород, претерпевших стресс-метаморфические преобразования. По распространенному мнению российских и зарубежных специалистов, наличие в разломах псевдотахилитов рассматривается как показатель проявления процессов фрикционного разогрева и пленочного плавления некоторых минералов при их сверхтонком истирании в моменты косейсмических подвижек смещений [1, 3, 8–10].



Рис. 2. Небольшой фрагмент древней глубинной палеосейсмодислокации, где несколько сотен млн лет назад возникали косейсмические разрывы с зеркалами скольжения при палеоземлетрясениях. Малыми стрелками отмечены зеркала скольжения с турмалиновой минерализацией, крупными стрелками выделены берега зоны высокоскоростного скольжения.

Согласно представлению некоторых зарубежных специалистов, возникновение разломных псевдотахилитов указывает на то, что очаги «ископаемых» землетрясений зарождались преимущественно в основании хрупкой сейсмогенной зоны земной коры и далее проникали через хрупкопластичную переходную зону на глубинах 10–20 км в более глубокие горизонты высокоразогретых бластомилонитизированных пород [9].



Рис. 3. Фото одного из шлифов из образца зеркала скольжения с турмалиновым пленочным покрытием.

В работах российских ученых последних лет, в частности члена-корреспондента РАН Г.А. Соболева и его коллег [10–12], показаны результаты изучения современными физическими методами деформаций и напряжений в тонкоперетертых нанокристаллах кварца, альбита и других минералов, имеющихся на зеркалах скольжения из зон сейсмоактивных разломов. Следовательно, формируется новый способ изучения существующими методами процессов фрикционного метасоматического преобразования минералов горных пород, что позволяет определять температуру и давление, сдвиговое сопротивление, а также возраст и другие важные трибохимические параметры РТ-условий, возникавших в ископаемых глубинных палеосейсмодислокациях.

Несмотря на огромный и растущий интерес зарубежных ученых, особенно в Японии и США [13-16], многие аспекты, касающиеся изучения очагов «ископаемых» землетрясений, еще предстоит исследовать для выяснения остающихся неизвестными параметров контактного стресс-метаморфического преобразования горных пород в очагах землетрясений. Очевидно, что для дальнейшего развития успехов в подобных перспективных направлениях необходимо тесное сотрудничество специалистов из областей классической геологии, сейсмологии, физики, механики, физического и численного моделирования. Совершенствование методов распознавания следов глубокофокусных палеосейсмодислокаций в денудированных зонах разломов уже в недалеком будущем способно значительно расширить возможности известного палеосейсмогеологического метола.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ружич В.В. Геологический подход к изучению очагов палеоземлетрясений // Экспериментальные и численные методы в физике очага землетрясения. М.: Наука, 1989. С. 68–78.

2. Kanamori H., Anderson D. L., Heaton T. Frictional melting during the rupture of the 1994 Bolivian earthquake // Science. 1998. V. 279. P. 839–842.

3. Ружич В.В. Очаг землетрясения как объект геологического изучения // Физика Земли. 2009. № 11. С. 1-9.

4. Ружич В.В., Черных Е.Н., Савельева В.Б., Павлов Д.В., Остапчук А.А. Изучение процессов контактного скольжения в зоне Приморского разлома // Динамические процессы в геосферах. М.: Институт динамики геосфер, 2015. С. 78–86.

5. Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Федоровский В.С., Мазукабзов А.М., Скляров Е.В., Лавренчук А.В., Лепехина Е.Н. Фрагмент раннепалеозойской (≈ 500 млн лет) островной дуги в структуре Ольхонского террейна (Центрально-Азиатский складчатый пояс) // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457, № 4. С. 429–453.

6. Корсаков А.В., Травин А.В., Юдин Д.С., Маршал Х.Р. Турмалин как <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar – геохронометр на примере метаморфических пород Кокчетавского массива (Казахстан) // Доклады Академии наук. 2009. Т. 424, № 4. С. 531–533.

7. Левин А.В., Летникова А.Ф. Турмалиновые граниты графит-алмазного месторождения Кумды-Коль // Доклады Академии наук. 2010. Т. 435, № 5. С. 663–666.

8. Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Шилько Е.В., Левина Е.А., Пономарева Е.И. Физическое моделирование условий возникновения источников сейсмических колебаний при разрушении неровностей в зонах разломов // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17, № 3. С. 43–52.

9. Nielsen S., Di Toro G., Hirose T., Shimamoto T. Frictional melt and seismic slip // Journal of Geophysical Research. 2008. V.113, BO1308. doi:10.1029/2007JB005122.

10. Соболев Г.А., Киреенкова С.М., Морозов Ю.А., Смульская А.И., Веттегрень В.И., Кулик В.Б., Мамалимов Р.И. Исследование нанокристаллов в зоне динамической подвижки // Физика Земли. 2012. № 9–10. С. 17–25.

11. Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Ружич В.В., Иванова Л.А., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. Исследование нанокристаллов в образце зеркала скольжения // Вулканология и сейсмология. 2015. № 3. С. 1–12.

12. Щербаков И.П. Исследование нанокристаллов в зеркале скольжения // Пятнадцатая международная конференция "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле". Москва, 29 сентября –1 октября 2014 г. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2014. С. 211–213.

13. Hirose T., Shimamoto T. Growth of molten zone as a mechanism of slip weakening of simulated faults in gabbro during frictional melting. // Journal of Geophysical Research. 2005. V. 110. B05202.

14. Di Toro G., Hirose T., Nielsen S., Pennacchioni G., Shimamoto T. Natural and experi-mental evidence of melt lubrication of faults during earthquakes // Science. 2006. V. 311. P. 647–649.

15. Di Toro G., Han R., Hirose T., De Paola N., Nielsen S., Mizoguchi K., Ferri F., Cocco M., Shimamoto T. Fault lubrication during earthquakes // Nature. Research Letters. 2011. V. 471. P. 494–498.

16. Han R., Hirose T. Shimamoto T. Strong velocity weakening and powder lubrication of simulated carbonate faults at seismic slip rates // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115, № B3. B03412. P. 1–23.

## IDENTIFICATION AND STUDY OF PALEOSEISMODISLOCATIONS IN THE DEEP-SEATED TECTONIC DENUDATION AREAS

V.V. Ruzhich, V.B. Savelyeva

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The paper considers the possibility of visual study of paleoearthquake evidence in the ancient fault zone segments exhumed after long-term denudation. This can be identified by means of structural geology methods from some petrophysical properties of the rocks experienced stress-metamorphic transformations, in particular, from characteristic slickesides produced by along-fault friction during paleoearthquakes many million years ago. The existing up-to-date methods of carrying out petrologic and petrophysical analyses of the samples of rocks deformed due to their intensive frictional sliding allow determining different physico-mechanical parameters, e.g. temperature and pressure, shear stress etc. associated with the previous coseismic sliding movements in the deep-seated fault segments. Valuable data newly obtained from the study of such tectonophysical conditions in the deep-seated fault segments stimulate interest in laboratory experiments and considerably enhance the possibilities for computer-aided seismic source modeling. Identification and detailed study of the deep-seated paleoseismodislocations discovered provide a more reliable basis for elaboration and improvement of methods for earthquake prediction and deformation control in hazardous faults to mitigate consequences of natural disasters resulting from the large-scale dynamic destruction of the geological environment.

Keywords: slickenside, pseudotahilit, fault, stress, metamorphism, earthquake source, denudation, paleoseismodislocation, earthquake prediction

\*\*\*

УДК 550.34.034

# АНАЛИЗ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ СОБЫТИЯХ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

А.Г. Сорокин<sup>1</sup>, А.А. Добрынина<sup>2, 3</sup>, В.В. Чечельницкий<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

<sup>4</sup> Байкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Иркутск, Россия

Аннотация. В работе обсуждается совместное использование сейсмических и инфразвуковых данных от импульсных событий и землетрясений для изучения структуры среды. Дается ретроспективный обзор различных источников импульсных событий, зарегистрированных в Байкальском регионе. В основе представлений о среде лежит понятие акустического импеданса, который характеризует отклик земной среды на импульсное акустическое воздействие. Оценка отношений спектральных плотностей мощности для сейсмического и инфразвукового сигналов, выполненная по идентичной методике, служит параметром, характеризующим отклик среды.

*Ключевые слова:* атмосфера, акустический импеданс, землетрясение, инфразвук, метеорит, промышленный взрыв, сейсмическая волна, ядерный взрыв

Акустические сигналы от землетрясений наблюдаются довольно редко и поэтому не были столь хорошо известны вплоть до сильного Аляскинского землетрясения 1964 г. (магнитуда М=9). Землетрясение сгенерировало атмосферные волны давления с необычно длинным периодом (~14 мин), которые были четко зарегистрированы в Беркли и на нескольких калифорнийских инфразвуковых станциях. Научный интерес к акустическим сигналам от землетрясений обусловлен, по крайней мере, двумя факторами. Первый из них состоит в том, что землетрясения действительно возбуждают интенсивные акустико-гравитационные волны (АГВ), о чем свидетельствуют экспериментальные данные, указанные выше. Второй фактор говорит о том, что АГВ мощных наземных источников являются основным транспортом для переноса энергии снизу до ионосферных высот. Кроме того, при выходе сейсмических волн на границу с атмосферой образуются поверхностные сейсмические волны, распространяющиеся с достаточно большой скоростью (выше скорости звука в атмосфере) и поэтому их ударный фронт может быть источником быстро распространяющихся инфразвуковых волн. При этом структура АГВ, возбуждаемых землетрясением, достаточно сложна. Так, на примере землетрясения на Аляске 1964 г. было показано, что акустические сигналы, обусловленные землетрясением, состоят из нескольких волновых групп и их амплитуда хорошо согласуется с сейсмическими вертикальными движениями поверхности земли вблизи акустического датчика, а соответствующие скорости этих волн достаточно высоки (4-6 км/с). Было показано, что волновые группы акустических сигналов последовательно возбуждаются сейсмическими Р-, S-волнами, а также интенсивными поверхностными волнами Рэлея. Некоторые теоретические модели возбуждения АГВ мощными подземными источниками были созданы много позднее [1].

Эруптивные источники сейсмической энергии (взрывы и землетрясения) возбуждают не только сейсмические волны различных типов, но и достаточно заметные акустические эффекты. В реальности процесс возбуждения звука достаточно сложен для строгого описания, поэтому к настоящему времени разработана только математическая модель подземного ядерного взрыва для профиля скорости частиц в инфразвуковой волне на некоторой сферической поверхности от уровня Земли, характеризующей энергию акустического излучения с учетом акустического импеданса двух сред [1, 2].

В настоящей работе проводится совместный анализ акустических эффектов и сейсмических волн при землетрясениях и взрывах. Несмотря на существенное различие в механизмах возбуждения сейсмических волн от взрывов и землетрясений, эти два типа событий имеют общие характеристики: например, существует прямая зависимость между энергией землетрясений и взрывов и геометрическими размерами их очагов [3, 4], что позволяет оценить энергетические свойства землетрясения, а также роль акустической жесткости пути распространения сейсмической волны или акустического импеданса среды.

Известно, что глубокие подземные взрывы, равно как и землетрясения, трудно обнаружить акустическим методом на больших горизонтальных расстояниях из-за ухода большей доли акустической энергии в зенит. Тем не менее на станции ИСЗФ СО РАН, расположенной в урочище Бадары в Бурятии, к настоящему времени зарегистрировано достаточно большое количество инфразвуковых данных по ядерным взрывам в районе оз. Лобнор (рис. 1, а), крупным взрывам по программе «Масса» в Казахстане и Узбекистане (рис. 1, б), местным промышленным взрывам (рис. 1, в) и др. В настоящее время ядерные взрывы запрещены Международным договором о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) и проводятся редко и тайно отдельными государствами, не принявшими международное соглашение. Приведем несколько примеров ядерных испытаний, проведенных в эпоху, предшествующую ДВЗЯИ. Ядерный воздушный взрыв был произведен 23 января 1976 г. в горном районе Китая близ оз. Лобнор. Его высота составляла около 14 км, продолжительность инфразвукового сигнала ~40 мин (см. рис. 1, а). Максимальный наблюдаемый период сигнала ~10 с, максимальная амплитуда достигала ~20 микробар. Официально сообщенная мощность взрыва составляла 17-20 кт ТНТ (1 кт=4.184·10<sup>12</sup> Дж). На рис. 1, б, приведены записи инфразвуковых сигналов от двух подземных ядерных взрывов в районе Семипалатинска на удалении около 1700 км от места регистрации (Бурятия, Тункинский район). В первом случае (03.04.1988 г.) мощность взрыва составляла 150 кт ТНТ, а во втором (22.04.1988 г.) - 20 кт ТНТ. Размах амплитуд полученных сигналов составлял 5 и 0.5 микробара, соответственно, в то время как периоды зарегистрированных инфразвуковых сигналов для этих двух случаев равны 6 с. Возможно, это связано с тем, что существующий атмосферный волновод, имеющий определенную структуру и работающий на трансляцию инфразвуковых сигналов на большие расстояния от источников с различной мощностью, выделяет только определенную отдельную спектральную моду инфразвукового сигнала. В данном случае это ограничивает возможности для оценки полной энергии взрыва.

В апреле 1982 г. был организован эксперимент по регистрации инфразвукового излучения от мощного промышленного взрыва на карьере «Перевал» в районе г. Слюдянки (Иркутская область). Общая масса взрывчатых веществ составляла около 350 т. По измерениям базовой трехпозиционной инфразвуковой станции «Бадары» на расстоянии 100 км от эпицентра был записан инфразвуковой сигнал с размахом амплитуды около 3.5 Па (рис. 1, в, г). Форма сигнала соответствовала уже сформировавшейся инфразвуковой волне с периодом около 1.7 с длительностью около 65 с и скоростью следа волны 370 м/с. Азимут сигнала (103°) практически совпадал с направлением на источник. Траекторные расчеты инфразвуковых лучей при известном метеорологическом высотном профиле температуры и известном времени и дальности распространения показывают, что точка поворота акустических лучей находится на уровне стратопаузы на высоте около 25 км, поскольку там имеется значительное увеличение эффективной скорости звука (скорость звука плюс скорость ветра). 5 декабря 2014 г. в горном районе Восточных Саян вблизи северо-восточной оконечности оз. Хубсугул (Монголия) произошло умеренное землетрясение (время в очаге 18:04:19.7, координаты 51.37 °с.ш. и 100.63 °в.д., энергетический класс К=13.9). Характерной особенностью этого землетрясения является возбуждение инфразвукового сигнала, зарегистрированного инфразвуковой станцией «Торы» (рис. 2). На рис. 2, а, представлен фрагмент сейсмограммы землетрясения (станция «Монды», эпицентральное расстояние 41 км), на записи четко прослеживаются основные сейсмические волны: продольная (P), поперечная (S) и более медленная поверхностная волна. Запись инфразвукового сигнала по форме очень напоминает сейсмический сигнал (рис. 2, б). Время прихода сигнала на инфразвуковую станцию – 18 ч 09 мин, время распространения – 280 с. Кажущаяся скорость распространения инфразвукового сигнала ~ 560 м/с. Это большая скорость для звуковых волн в обычных условиях. Возможным объяснением этому факту может быть следующее: ударная волна, образованная при землетрясении, на расстоянии 160 км еще не потеряла полностью своей скорости и продолжала еще 280 с распространяться со скоростью ударного фронта. Особенностью зарегистрированного инфразвукового сигнала является не столько модуляция его низкочастотным атмосферным процессом, сколько внешнее подобие сейсмическому сигналу, на котором явно выделяются признаки проявления продольной волны, далее сильной поперечной и затем волны Рэлея.

Спектральный состав сейсмических и инфразвуковых волн показан на рис. 2, *в*, *г*. Колебания в спектре инфразвукового сигнала соответствуют низкочастотному диапазону волн с периодом 7–18 с и ниже и, скорее всего, обусловлены присутствием в атмосфере низкочастотных атмосферных колебаний естественного происхождения (рис. 2, *г*). Для более коротких периодов характерен пик на частотах 0.3– 0.5 Гц (периоды 2–3 с). Этот пик соответствует частотам инфразвукового сигнала и, действительно, связан с землетрясением.



Рис. 1. Примеры инфразвуковых сигналов, зарегистрированных на станции Бадары: *а* – китайский ядерный взрыв в атмосфере 23 января 1976 г., *б* – подземные ядерные взрывы на полигоне «Семипалатинск» 3 апреля и 22 апреля 1988 г., *в*, *г* – барограмма и спектр промышленного взрыва на карьере «Перевал», Слюдянка, 25 апреля 1982 г.



Рис. 2. Хубсугульское землетрясение 5 декабря 2014 г.: *а* – сейсмограмма, полученная на сейсмической станции «Монды» (эпицентральное расстояние 41 км); *б* – барограмма, полученная на инфразвуковой станции «Торы» (расстояние 160 км); *в* – спектр сейсмического сигнала; *г* – спектры инфразвукового и сейсмического сигналов, а также их отношение.

Помимо взрывов и землетрясений, источником возбуждения инфразвуковых сигналов может также являться движение в атмосфере Земли космических тел. Вторгаясь в атмосферу Земли на огромной скорости, метеорит возбуждает сильную ударную волну, создающую впереди тела давление в несколько тысяч атмосфер. Падения метеоритов являются редкими событиями, однако в литературе имеется опыт наблюдений инфразвуковых эффектов этих явлений [5–7]. Примером такого источника инфразвукового излучения может служить пролет и Челябинского разрушение метеорита, сопровождавшиеся мощным излучением В инфразвуковом диапазоне частот. Инфразвуковой сигнал от Челябинского метеорита наблюдался на инфразвуковой станции «Торы» в 05:51 UT. Волна давления, возникшая от взрыва метеорита, образовалась в 03:20 UT по сообщению NASA. При расстоянии от Челябинска до Иркутска, равном 2780 характерное время распространения км,

инфразвукового сигнала составило 2 ч 31 мин. Это соответствует распространению наблюдаемого инфразвукового сигнала со звуковой скоростью (V~307 м/с). На рис. 3, а, показан многоцуговый инфразвуковой сигнал от взрыва Челябинского метеорита [8]. Многоцуговую структуру инфразвукового сигнала можно объяснить как характером фрагментации метеорита при пролете и сгорании в атмосфере, так и многолучевым распространением инфразвукового сигнала В атмосфере. На рис. 3, б, показан спектр мощности инфразвукового сигнала Челябинского метеорита. Гармоника около 80 с относится, вероятно, к метеорогическим процессам в пункте наблюдения, а когерентная гармоника с периодом около 30-40 с связана с энергией взрыва метеорита, которая составляет около 436 кт [5], что соответствует оценкам, выполненным в работе [9] с помощью Международной системы мониторинга ядерных

(IMS) аналогичной взрывов по методике. Акустическая ударная волна, образовавшаяся при пролете и разрушении Челябинского метеорита, в результате взаимодействия с поверхностью Земли сгенерировала сильную поверхностную волну Рэлея. записанную 32 широкополосных на сейсмических станциях. расположенных на расстояниях от 252 до 3654 км [10, 11]. Групповые скорости волны Рэлея оцениваются в диапазоне от 2.3 до 3.5 км/с для периодов 20-100 с [11]. На сейсмической станции «Арти» (международный код ARU, расстояние от эпицентра взрыва 252 км), помимо поверхностной сейсмической волны, также зарегистрирована ударная акустическая волна (рис. 3, в), что дает возможность оценить спектральные характеристики как сейсмического сигнала, так и сгенерировавшего его инфразвукового сигнала (рис. 3.г).



Рис. 3. Записи инфразвукового и сейсмического сигналов от Челябинского метеорита: *а* – барограмма, полученная на станции «Торы» (стрелками показаны номера цугов); *б* – спектр 1-го цуга инфразвукового сигнала; *в* – поверхностная волна Рэлея и ударная волна, зарегистрированные на сейсмической станции «Арти» (расстояние от эпицентра 252 км); *е* – спектр поверхностной волны (черная кривая) и ударной волны (серая кривая), зарегистрированных на сейсмической станции «Арти» (расстояние от эпицентра 252 км).



Рис. 4. Графики спектров инфразвукового и сейсмического сигналов от Челябинского метеорита и их отношение (*a*) и кривая отношения H/V (*б*), полученные на сейсмической станции «Арти».

Если рассматривать акустическую ударную волну от взрыва метеорита как источник возбуждения поверхностной сейсмической волны, то можно попытаться на качественном уровне оценить степень ответной реакции среды. Для этого следует оценить спектральное отношение входного параметра инфразвука к выходному параметру – сейсмической волне. Таким образом, получим величину акустического импеданса для различных частот, характеризующего проводимость земной среды на границе с атмосферой для акустических волн. На рисунке 4, а, показаны спектры мощности инфразвукового сейсмического И сигналов, полученных на сейсмической станции «Арти» (расстояние до эпицентра взрыва 252 км), а также их отношение как показатель реакции среды на воздействие акустической ударной волны. Эта характеристика (или акустический импеданс на границе «земная кора – атмосфера») имеет относительный максимум на частотах 0.15-0.30 Гц (период Т~3-6 с). Полученное отношение спектров инфразвука сейсмических И колебаний спектральным сопоставлено co отношением горизонтальных и вертикальной компонент записей микросейсмических колебаний (Н/V-отношение), полученным на станции «Арти» (рис. 4, б). Отношение H/V является непосредственной характеристикой среды и показывает, в каких частотных диапазонах будет наблюдаться усиление колебаний сейсмических волн [12]. Анализ полученной кривой H/V выявил набор резонансных частот: 0.11–0.45 Гц (периоды 2.2–9.1 с), 2 Гц (0.5 с) и 3 Гц (0.3 с). Резонансные частоты 0.11–0.45 Гц хорошо согласуются с резонансными частотами, восстановленными из отношения спектров инфразвукового и сейсмического сигналов (рис. 4).

В работе обобщены некоторые результаты регистрации инфразвуковых и сейсмических наблюдений импульсных событий и землетрясений. Предложена методика оценки состояния сейсмической среды на основе анализа акустического импеданса атмосферной и земной сред. Анализ отношения спектральной плотности мощности для инфразвукового и сейсмического сигналов показывает, что этот параметр может характеризовать отклик сейсмической среды на импульсное акустическое воздействие как в случае падения Челябинского метеорита, так и в случае землетрясений средней силы. Изучение отношений спектральных плотностей мощности инфразвукового и сейсмического сигналов показало, что оценка акустического импеданса среды хорошо совпадает с оценкой отношения горизонтальных и вертикальных компонент микросейсмического шума H/V [12].

The facilities of the IRIS Data Management System, and specifically the IRIS Data Management Center, and Baikal Regional Seismological Center were used for access to waveform and metadata required in this study.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rudenko G.V., Uralov A.M. Calculation of ionospheric effects due to acoustic radiation from an underground nuclerar explosion // J. Atm. Terr. Phys. 1995. V. 57, № 3. P. 225–236.

2. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск, Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

3. Садовский М.А., Кедров О.К., Лаушкин В.А., Пасечник И.П. Сейсмический эффект подземных взрывов и проблема оценки полной энергии землетрясений // Доклады АН СССР. 1985. Т. 281, № 4. С. 825–829.

4. Садовский М.А., Кедров О.К., Пасечник И.П. К вопросу об энергетической классификации землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 2. С. 3–10.

5. Revelle D.O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves // Annals of the New York Academy of Sciences. 1997. V. 822. P. 284–302.

6. Голицын Г.С., Григорьев Г.И., Докучаев В.П. Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13, № 9. С. 926–935.

7. Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Tereshchenko E.D., Kulichkov S.N., Vasil'ev A.N. Detection of Infrasound from the Vitim Bolide on September 24, 2002 // JETP Letters. 2003. V. 77, № 2. P. 115–117.

8. Сорокин А.Г. Инфразвуковое излучение Челябинского метеорита // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80, № 1. С. 101–105.

9. Le Pichon A. et al. Russian Fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors // Geoph. Res. Let. 2013. V. 40. P. 3732–3737. doi:10.1002/grl.50619.

10. Добрынина А.А., Чечельницкий В.В., Черных Е.Н., Саньков В.А. Челябинский метеороид: сейсмические эффекты // Вестник НЯЦ РК. 2014. Вып. 2. С. 105–109.

11. Berngardt O.I., Perevalova N.P., Dobrynina A.A., Kutelev K.A., Shestakov N.V., Bakhtiyarov V.F., Kusonsky O.A., Zagretdinov R.V., Zherebtsov G.A. Towards the azimuthal characteristics of ionospheric and seismic effects of "Chelyabinsk" meteorite fall according to the data from coherent radar, GPS and seismic networks // Journal of Geophysical Research & Space Physics. 2015. V. 120, № 12. P. 10754–10771. doi:10.1002/2015JA021549.

12. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. 1989. V. 30, № 1. P. 25–33.

# AN ANALYSIS OF SEISMOACOUSTIC SIGNALS OF IMPULSE EVENTS AND EARTHQUAKES

# A.G. Sorokin<sup>1</sup>, A.A. Dobrynina<sup>2, 3</sup>, V.V. Chechelnitsky<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup>Geological Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

<sup>4</sup> Baikal Branch of the Federal Research Center of United Geophysical Survey, the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The paper discusses a combined application of the seismic and infrasonic data from impulse events and earthquakes to the study of the medium structure. A retrospective overview is provided of various sources of impulse events recorded in the Baikal region. The concept of the medium is based on the notion of acoustic impedance, which characterizes the environmental response to the impact of acoustic pulse. Evaluation of the relationships between spectral power densities for seismic and infrasonic signals made by the identical technique is the parameter characterizing the response of the medium. *Keywords:* atmosphere, acoustic impedance, earthquake, infrasound, meteorite, industrial explosion, seismic wave, nuclear ex-

*Keywords:* atmosphere, acoustic impedance, earthquake, infrasound, meteorite, industrial explosion, seismic wave, nuclear explosion

\*\*\*

УДК 550.8

## АНАЛИЗ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ВЫЗВАННОЙ РАЗВИТИЕМ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА

Ю.П. Стефанов<sup>1</sup>, А.А. Дучков<sup>1</sup>, А.О. Додонова<sup>1</sup>, А.В. Мясников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия <sup>2</sup> Сколковский институт науки и технологий, Инновационный центр «Сколково», Москва, Россия

Аннотация. В работе рассмотрен подход к анализу образования микросейсмических событий, вызванных развитием трещины гидроразрыва. Приведены результаты численного геомеханического моделирования распределения напряженно-деформированного состояния в присутствии трещины гидроразрыва и в результате ее роста, включая формирование сейсмических волн. Проводится анализ результатов моделирования с точки зрения зон резкого увеличения касательных напряжений, что может привести к образованию микросейсмических событий. Показана возможность интерпретации возникающих при геомеханическом моделировании волновых полей и их сопоставления с теоретическими точечными источниками (инверсия тензоров моментов). Результаты позволяют оценить информативность микросейсмического мониторинга для изучения геомеханических процессов, сопутствующих развитию трещины гидроразрыва.

*Ключевые слова:* микросейсмическая эмиссия, геомеханическое моделирование, гидроразрыв, трещина, инверсия тензоров моментов, микросейсмический мониторинг

Работа посвящена изучению закономерностей возникновения сейсмических событий в геологической среде в результате наличия в ней трещины и разных сценариев ее развития. Решение такой задачи имеет практическое значение, так как трещины разного масштаба являются важным структурным элементом геологической среды, влияющим на геомеханические процессы в Земле. Кроме изучения тектонических процессов, актуальным является решение разведочных задач – например, микросейсмический мониторинг гидроразрыва пласта или процесса разработки месторождений.

С ростом трещин в геологической среде связаны микросейсмические события, которые излучают упругие колебания (волны). Их генерация и эмиссия обусловлены резким, скачкообразным изменением напряженного состояния и характерны для большинства процессов разрушения геосреды. Рассмотрим частный случай трещины гидроразрыва. Ее характерной особенностью является то, что к стенкам трещины приложено давление, создаваемое жидкостью внутри трещины. Изменение напряженного состояния при развитии трещины гидроразрыва может порождать процессы разрушения в среде, сопровождающиеся сейсмической эмиссией (микросейсмическими событиями). Будем выделять два сценария возникновения микросейсмических событий:

 процессы разрушения или активизации естественных трещин из-за резкого роста касательных напряжений в окрестности трещины гидроразрыва за счет перераспределения напряженного состояния из-за роста внутреннего давления трещины;

 процессы разрушения на кончике трещины гидроразрыва при ее росте. Связанные с микросейсмическими событиями разрушения горной породы могут быть описаны на уровне сейсмологических моделей. Так, в первом сценарии механизм должен соответствовать трещине сдвига (скалывания), так как вызван превышением предела прочности горных пород на сдвиг при росте касательных напряжений. Во втором сценарии гидроразрыва механизмы должны соответствовать раскрытию трещины под действием нормальных растягивающих напряжений и вызваны превышением предела прочности горных пород на отрыв при росте давления в трещине гидроразрыва.

Влияние трещины гидроразрыва на образование микросейсмических событий можно описать схемами упругого излучения в зависимости от напряженного состояния или типа трещины. Для математического описания точечных источников, соответствующих разным сценариям развития трещины, используется так называемый тензор моментов [1]. Так, трещине отрыва соответствует источник типа диполь, а трещине типа сдвига – источник типа двойной пары сил (double-couple). В данной работе для моделирования напряженного состояния и сейсмической эмиссии используется численное геомеханическое моделирование приращения трещины. Полученные волновые поля можно ассоциировать с данными микросейсмического мониторинга и применить к ним соответствующие методы обработки, включая инверсию механизма источника (тензора момента). Результаты инверсии можно затем сопоставлять с механизмами разрушения, которые имели место в геомеханическом моделировании. Таким образом, становится возможным исследовать связь между данными микросейсмического мониторинга и геомеханическими процессами развития трещины гидроразрыва.

Рассмотрим следующую геомеханическую модель трещины гидроразрыва. Пусть фрагмент среды, находящийся в напряженном состоянии при условии плоской деформации, содержит сквозную трещину (рис. 1) и имеет следующие параметры: К=50 ГПа – модуль сжатия; µ=30 ГПа – модуль сдвига; v=0.25 – коэффициент Пуассона; V<sub>P</sub>=6000 м/с,  $V_{\rm S}$ =3464 м/с – скорость упругих волн;  $\rho$ =2.5 г/см<sup>3</sup> – плотность;  $\sigma_x = 30$  МПа,  $\sigma_y = 60$  МПа – граничные условия (они же соответствуют начальному напряженному состоянию). Моделирование излучения упругих волн, вызванного приращением трещины, осуществлялось путем численного решения системы уравнений динамики. Система уравнений решалась с использованием явной конечно-разностной схемы [2]. Напряжения рассчитывались с использованием гипоупругого закона.



Рис. 1. Схема геомеханической модели: *а* – геометрия трещины и расчетной области, условия нагружения; *б* – структура расчетной сетки – трещина проходит по границам ячеек.

Расчеты выполнялись на равномерной четырехугольной сетке размером 1500 на 1500 ячеек с пространственным шагом 1 м. Длина начальной трещины составляла 3 м. Трещина моделировалась по границам ячеек (рис. 1,  $\delta$ ), а ее рост описывался при помощи разделения узлов расчетной сетки [3, с. 107-114]. С ростом внутреннего давления увеличиваются значения напряжений вблизи вершины. В момент времени, когда эти напряжения достигнут заданного значения, произойдет выполнение условия роста и трещина увеличит свою длину на заданный интервал. Для того чтобы увеличить длину трещины в вершине узлы расчетной сетки будут разделены. Эти разделенные узлы будут принадлежать берегам трещины, а вершина переместится на одну ячейку вперед. При рассмотрении задач о приращении одиночной сетки в целях получения более удобной для анализа картины осуществлялось приращение сразу трех узлов, т.е. трещина увеличивала свою длину на три ячейки (3 м).

Вначале рассмотрим распределение напряжений вокруг трещины в статическом состоянии, т.е. когда трещина оставалась неподвижной (рис. 2). Полученные поля напряжения соответствуют полям трещины отрыва и близки к аналитическому решению [4]. На рис. 2, *г*, видно, что давление в трещине порождает заметный рост интенсивности касательных напряжений по сторонам от концов трещины. Именно в окрестности конца трещины могут возникать микросейсмические события сдвигового типа, связанные со сколовыми разрушениями или активизацией естественных трещин в этой зоне.

С момента приращения трещины начинается динамический процесс, в ходе которого происходит излучение упругих волн и изменение напряженного состояния. Эти изменения происходят по мере распространения упругих волн с характерными скоростями. Для анализа характера излучения и распространения упругих волн будем рассматривать процесс излучения трещины конечной длины в разных условиях. Динамика процесса в окрестности трещины имеет достаточно сложный характер, так как приход возмущений в одну из вершин порождает новые возмущения напряженного состояния с постепенно снижающейся интенсивностью (см. подробнее в [5, с. 81-93]). Серия численных тестов позволит исследовать наиболее важные факторы, влияющие на динамические явления, сопутствующие росту трещины. Помимо этого, отдельный интерес представляет анализ колебаний, которые регистрируются на удалении от трещины.

Рассмотрим задачу анализа волновых полей сейсмической эмиссии для определения механизма точечного источника. Для этого по зарегистрированным сейсмическим данным можно построить диаграмму направленности продольных Р- и поперечных объемных S-волн (рис. 3, а). Эти диаграммы направленности могут быть использованы для инверсии тензора моментов и восстановления механизма разрушения (рис. 3, б). Этот подход был предложен в [6]. В рамках работы мы провели серию численных геомеханических расчетов роста трещины гидроразрыва в присутствии естественной трещины, с которой она смыкается (рис. 4, а). Запись результатов моделирования сейсмической эмиссии (компоненты скорости смещения частиц) производилась на круговом профиле (рис. 4, а). Расстояние от источника R выбирается так, чтобы профиль регистрации находился в дальней зоне, т.е. Ри S-волны уже сформировались и могли быть рассмотрены отдельно (R=150 м). Так были получены данные, имеющие вид сейсмических записей при микросейсмическом мониторинге.

Для трасс верхнего полукруга (пунктир на рис. 4, *a*) были сняты амплитуды *P*- и *S*-волн. Они приведены на рис. 4 для разной длины естественной трещины, помещенной перед трещиной гидроразрыва: в отсутствие такой трещины (рис. 4,  $\delta$ ), трещина длиной *L*=10 м (рис. 4,  $\epsilon$ ), трещина длиной *L*=20 м (рис. 4,  $\epsilon$ ).

Проведем сопоставление наблюденных диаграмм направленности *P*- и *S*-волн с теоретическими (от точечных источников). Во-первых, наблюденные диаграммы направленности *P*- и *S*-волн для сплошной среды (рис. 4, б) отличаются от теоретических для трещины отрыва (см. рис. 3, а): диаграмма для S-волны не симметрична, большая часть энергии S-волны излучается в направлении, противоположном направлению роста трещины. Амплитуда Рзаметно больше относительно волны S-волны. Во-вторых, при столкновении с уже существующей трещиной разной длины

(рис. 4, *в*, *г*) интенсивность эмиссии *P*- и *S*-волн заметно возрастает. При этом диаграмма направленности *S*-волны меняет вид, увеличивается интенсивность излучения в направлении роста трещины гидроразрыва. Так, при наличии трещины размером L=20 м (рис. 4, *г*) диаграмма направленности *S*- волны имеет асимметрию, обратную случаю сплошной среды (рис. 4,  $\delta$ ). Наилучшее сходство диаграммы направленности *S*-волны с теоретической (источник типа диполь) имеется при росте трещины гидроразрыва и слиянии с трещиной длиной *L*=10 м.



Рис. 2. Распределение напряжений вокруг стационарной трещины, находящейся под действием внутреннего давления: *a* – горизонтальная компонента напряжений; *б* – вертикальная компонента напряжений; *в* – касательные напряжения; *г* – интенсивность касательных напряжений.



Рис. 3. Теоретические диаграммы направленности *P*- и *S*-волн для (*a*) трещины отрыва (точечный источник типа «диполь»), (б) трещины сдвига (точечный источник типа «двойная пара сил»).



Рис. 4. Схема и результаты численного эксперимента: *a* – схема численного эксперимента постепенного роста трещины, точки – профиль сейсмоприемников; *б* – наблюденные диаграммы направленности *P*- и *S*-волн от раскрытия трещины; *в*, *c* – ее соединения с уже существующей в геосреде трещиной (естественной трещиной) разной длины: *L*=10 м, *L*=20 м.

Наличие в среде опережающей трещины существенно меняет характер излучения. Меняется не только амплитуда, но и диаграмма направленности волн, причем на данные изменения существенное влияние оказывает длина опережающей трещины. Можно предположить, что влияние размеров определяется длиной формирующихся упругих волн в результате слияния трещин. Сами длины волн зависят от протяженности и скорости приращения трещины или расстояния между трещинами и скорости разрушения породы между ними. При определенных соотношениях длины волны и «естественной» трещины получаются разные диаграммы направленности *P*- и *S*-волн.

Таким образом, излучение и распространение упругих волн, вызванное ростом трещины, зависит от множества факторов, связанных со строением среды, ее трещиноватостью, действующей нагрузкой. Результаты численного моделирования трещин гидроразрыва с учетом динамики процесса позволяют анализировать процесс излучения упругих волн и интерпретировать элементарные акты с позиции точечных источников. Это дает возможность изучить влияние геомеханических условий на процессы излучения и интерпретировать наблюденные данные как микросейсмические, поскольку тензоры моментов, определяемые при инверсии микросейсмических данных, связаны с различными геомеханическими сценариями роста трещины гидроразрыва. Мы считаем, что результаты исследования могут быть использованы для разработки методов калибровки геомеханических моделей, а также для уточнения данных о механизмах в источнике, что важно для повышения достоверности интерпретации результатов микросейсмического мониторинга.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках Соглашения со Сколтехом (проект № 711–MRA).

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: теории и методы. Т. 1. М.: Мир, 1983. 520 с.
- 2. Wilkins M.L. Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 1999. 246 p.

3. Немирович-Данченко М.М. Модель гипоупругой хрупкой среды: применение к расчету деформирования и разрушения горных пород // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1, № 2. С. 107–114.

4. Сиратори М., Миеси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения / Пер. с японск. под ред. Е.М. Морозова. М.: Мир, 1986. 334 с.

5. Стефанов Ю.П. Численное исследование поведения упруго-идеальнопластических тел, содержащих неподвижную и распространяющуюся трещины, под действием квазистатических и динамических растягивающих нагрузок // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1, № 2. С. 81–93.

6. Duchkov A.A., Stefanov Y.P., Yaskevich S.V., Bakeev R.A. Geomechanic modeling of seismic wave generation and approximation by effective seismic point sources // Extended Abstracts, 77<sup>th</sup> EAGE Conference&Exhibition. 2015. Th N108 15. P. 1–4.

## ANALYSIS OF MICROSEISMIC EMISSION CAUSED BY THE HYDRAULIC FRACTURE GROWTH

## Y.P. Stefanov<sup>1</sup>, A.A. Duchkov<sup>1</sup>, A.O. Dodonova<sup>1</sup>, A.V Myasnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Skolkovo Institute of Science and Technology, Skolkovo Innovation Center, Moscow, Russia

*Abstract.* This paper considers an approach to analyzing microseismic event occurrence caused by the hydraulic fracture growth. Presented here are the results of geomechanical-numerical modeling of the stress-strain state distribution with regard to the hydraulic fracture and its growth, involving formation of seismic waves. The modeling results are analyzed in terms of an abrupt increase in shear stress that may give rise to microseismic events. Shown here is the possibility of interpretation of wave fields, produced by geomechanical models, and their comparison with theoretical point sources (moment tensor inversion). The results make it possible to estimate the informative value of microseismic monitoring to study geomechanical processes associated with the hydraulic fracture growth.

*Keywords:* microseismic emission, geomechanical modeling, hydraulic fracture, fracture, moment tensor inversion, microseismic monitoring

\*\*\*

УДК 551.24.550.34

# ПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА СЕВЕРНОЙ ОКРАИНЕ АМУРСКОЙ ПЛИТЫ

С.В. Трофименко, В.Г. Быков

Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация. Исследовано распределение количества землетрясений с магнитудами 2≤М≤4 в последовательно расположенных прямоугольных сейсмических кластерах вдоль северной активной окраины Амурской плиты. По среднемесячным данным за инструментальный период наблюдений выделены смещения максимумов сейсмической активности в годовых циклах. Установлена пространственная периодичность меридиональных тектонических неоднородностей, в которых последовательности максимумов сменяются цепочками минимумов сейсмической активности, идентифицированных нами как зоны инверсии сейсмичности. Выявление периодических компонент сейсмичности послужило мотивацией для построения волновой модели сейсмического процесса, в которой последовательная активизация кластеров слабых землетрясений ( $2 \le M \le 4$ ) инициируется перемещением фронта деформационной волны со средней скоростью 2.7 км/сут в направлении с востока на запад. Эта волна модулируется медленным волновым деформационным процессом со скоростью порядка 10–100 км/год, который зарождается в зоне взаимодействия Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит.

*Ключевые слова*: фоновая сейсмичность, годовой цикл, кластер землетрясений, волна деформаций, Амурская плита, пространственно-временная модель сейсмичности

Направленная миграция эпицентров землетрясений – одно из проявлений геодинамического процесса, связанное с передачей тектонических напряжений (деформаций) внутри Земли. Взаимодействие подвижной Амурской плиты с Евразийской плитой определяет сейсмичность вдоль северной и северозападной границ Амурской плиты. Сильные землетрясения с М>6 происходят на активных восточной (Sakh) и западной (BRZ) окраинах плиты, а также вдоль северной границы, в зонах сочленения меридиональных и широтных активных структур. Наибольшая плотность эпицентров землетрясений фиксируется на северной границе Амурской плиты (Al-St), при удалении от этой границы количество землетрясений уменьшается (рисунок).

При построении пространственно-временных моделей сейсмичности мы исследовали пространственные взаимосвязи между отдельными сейсмическими кластерами в различные периоды времени в течение года, т.е. использовали технологию анализа коллективной активизации отдельных фрагментов сейсмоактивных зон.

Статистические расчеты периодов максимумов годовой активности по каждому кластеру позволили выделить шесть подобных пространственновременных циклов миграции максимумов сейсмической активности (циклы A, B, C, D, E, F). На восточных границах циклов максимум сейсмической активности относится к месяцам январь-февраль. При движении в западном направлении от восточных границ циклов A, B, C, D, E, F максимум последовательно проявляется в феврале-марте, мартеапреле и т.д.

Для сегмента восточнее 120 °в.д. максимумы сейсмической активности в кластерах с синхронным проявлением отстоят в пространстве между циклами А, В на 6.38, 7.16 и 6.8°, а между циклами В, С – на 8.58, 7.91, 6.98 и 7.01°, соответственно. В среднем пространственный период равен  $L_{A-C}=(7.26\pm0.74)^\circ$ , что для диапазона исследуемых широт соответствует расстоянию в 360–420 км. Половина данного интервала составляет в среднем  $L_{A-C}/2=(3.5-4.0)^\circ$ .

Для сегмента западнее 120 °в.д. максимумы сейсмической активности в кластерах с синхронным проявлением отстоят в пространстве между циклами D, E на 4.5, (3.0–4.0) и 3.0°, а между циклами E, F на равном расстоянии 4.0°. В среднем пространственный период равен  $L_{D-F}=(3.8\pm0.5)^\circ$ , что для диапазона исследуемых широт соответствует расстоянию в 210–270 км, или половине интервала  $L_{A-C}$ .



Пространственное расположение зон инверсии сейсмичности в годовых циклах относительно фронтов деформационных волн и меридиональных структур. Зоны инверсии показаны штриховыми зонами. Цифрами в кружках обозначены разломы: 1 – Лимурчанский, 2 – Тыркандинский, 3 – система Темулякитских меридиональных разломов, 4 – меридиональные структуры восточного фланга Байкальской рифтовой зоны, 5 – Гастахский, 6 – Западно-Туранский, 7 – Лево-Минский. Пунктиром показаны субмеридиональные межблоковые разломы Алданского щита. На схему вынесены активные тектонические нарушения зоны Тан-Лу (Tan-Lu), Алдано-Станового блока (Al-St) и Байкальской рифтовой зоны (BRZ). Стрелками показано направление смещения фронтов деформационных волн (показаны дугами) и миграции максимумов сейсмической активности в годовых циклах.

Особенность пространственного распределения сейсмичности заключается в том, что максимумы сейсмической активности в последовательно расположенных кластерах не проявляются в течение всего года, но в определенных временных интервалах цепочки максимумов сейсмичности сменяются минимумами. Это явление фиксируется в пределах меридиональных тектонических неоднородностей, которые мы идентифицировали как зоны инверсии сейсмичности. Эта особенность миграции максимумов – инверсия сейсмичности – уже была замечена авторами [1] и здесь подтверждена новыми данными.

Оценка средней скорости смещения максимумов сейсмической активности в каждом из шести циклов A, B, C, D, E, F из регрессионных уравнений методом линейной аппроксимации дает значение  $U_{A-C}=(U_A+U_B+U_C)/3=-0.044$  град/сут с относительной погрешностью 7 % или  $U_{A-C}=(16.2\pm1.2)$ град/год. В метрической системе  $U_{A-C}=2.75-2.80$ км/сут, или порядка 1000 км/год. Вычисления для северо-западного сегмента при среднем значении широты 55° дают величину скорости  $U_{D-F}\approx(2.5\pm0.3)$ км/сут, а по всей северной границе Амурской плиты  $U_{A-F}\approx(2.68\pm0.34)$  км/сут.

На меридианах, где максимумы сейсмичности проявляются в январе, происходит инверсия сейсмической активности. Причем в западном направлении от меридиана 120 °в.д. эта инверсия проявляется с пространственным периодом  $L_{D-F=}L_{A-C}/2$ . Восточный и западный сегменты Амурской плиты отличаются тем, что восточнее меридиана 120 °в.д. активная окраина Амурской плиты подвержена меридиональному сжатию, а западнее меридиана 120 °в.д. – меридиональному растяжению. Пространственный период инверсии в области растяжения в два раза меньше, чем период инверсии в области сжатия.

Протяженность циклов D, E, F западнее 120 °в.д. меридиана также можно сопоставить с тектоническими структурами меридионального заложения. В пределах (116.0–117.5) °в.д. проходит меридиональный Чаро-Ленский разлом [2] или близкий ему Западно-Алданский разлом [3]. В области меридианов 113.5 и 110 °в.д. выделены локальные меридиональные структуры субмеридиональной и северо-северо-западной ориентировки [4]. В работе [5] показаны фронты деформационных волн, которые на широте 56 °в.д. проходят по меридианам 110.5, 114.5 и 118.5 °в.д. (рисунок). С учетом погрешности определения протяженности меридиональных зон в  $\pm 0.5^{\circ}$  модель С.И. Шермана [5] соответствует положению выделенных нами зон инверсии (рисунок). С погрешностью  $\pm 0.74^{\circ}$  зоны инверсии северо-восточного сегмента Амурской плиты также соответствуют положению фронтов деформационных волн на меридианах 136, 128 и 121°в.д. (рисунок). Направление перемещения максимумов сейсмичности совпадает с вектором перемещения фронтов деформационных волн.

В тектоническом плане расстоянию (3.5–4.0)° соответствует блоковая делимость Алданского щита [6]. В системе разломов Тан-Лу данный пространственный период проявляется субмеридиональными Лимурчанским, Гастахским, Западно-Туранским и Лево-Минским разломами (рисунок) [2], с положением которых можно соотнести фронты деформационных волн. При этом восточная зона инверсии и первый фронт деформационной волны пространственно совпадают с меридиональным Лимурчанским разломом (рисунок). Отсюда следует, что зоны инверсии сейсмической активности и сейсмичность вдоль северной активной окраины Амурской плиты аномально проявляются в том числе и в активных меридиональных геологических структурах.

Пространственный период  $L_{A-C}$ =7.26° (360–420 км) сопоставим с длиной медленных волн деформации ( $\lambda$ =250–450 км), выделенных на территории Прибайкалья и Приамурья (107–140 °в.д.) [7–9]. Скорость этих волн составляет 5–20 км/год и по порядку величины сравнима со скоростью миграции деформаций земной коры (10–140 км/год) из зоны субдукции [10].

Пространственная корреляция миграции сейсмичности и миграции деформаций – двух различных проявлений геодинамического процесса – может означать, что механизм миграции сейсмичности связан с распространением и перераспределением тектонических напряжений, вызывающих дополнительную тектоническую нагрузку и, как следствие, последовательное возникновение землетрясений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–05–00097\_а).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Trofimenko S.V., Bykov V.G., Merkulova T.V. Seismicity migration in the zone of convergent interaction between the Amur plate and the Eurasian plate // Journal of Volcanology and Seismology. 2015. V. 9 (3). P. 210–222.

2. Схема геолого-структурного районирования Приамурья, Западного Приохотья, о. Сахалин и прилегающих участков дна Охотского и Японского морей (1: 3 000 000). Хабаровск: ФГПУ "Дальгеофизика", 2008.

3. Trofimenko S.V., Bykov V.G. The model of crustal block movement in the South Yakutia geodynamic testing area based on GPS data // Russian Journal of Pacific Geology. 2014. V. 8. P. 247–255.

4. Lunina O.V., Gladkov A.S., Gladkov A.A. Systematization of active faults for the assessment of the seismic hazard // Russian Journal of Pacific Geology. 2012. V. 6 (1). P. 42–51.

5. Sherman S.I. Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. V. 4. P. 83–117.

6. Trofimenko S.V. Tectonic interpretation of the statistical model of distributions of anomalies azimuths of gravity and magnetic fields of the Aldanian Shield // Pacific Geology. 2010. V. 29. P. 64–77 (in Russian).

7. Sherman S.I. New data on regularities of fault activation in the Baikal rift system and the adjacent territory // Doklady Earth Sciences. 2007. V. 415. P. 794–798.

8. Sherman S.I., Lysak S.V., Gorbunova E.A. A tectonophysical model of the Baikal seismic zone: testing and implications for medium-term earthquake prediction // Russian Geology and Geophysics. 2012. V. 53. P. 392–405. Sherman S.I., Sorokin A.P., Sorokina A.T., Gorbunova E.A., Bormotov V.A. New data on the active faults and zones of modern lithosphere destruction in the Amur region // Doklady Earth Sciences. 2011. V. 439. P. 1146–1151.
Kasahara K. Migration of crustal deformation // Tectonophysics. 1979. V. 52. P. 329–341.

## PERIODIC COMPONENTS OF SEISMIC ACTIVITY IN THE NORTHERN MARGIN OF THE AMUR PLATE

#### S.V. Trofimenko, V.G. Bykov

Yu. A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

*Abstract.* A study has been made of the distribution of number of earthquakes with magnitudes  $2 \le M \le 4$  in subsequently arranged rectangular seismic clusters along the northern, active margin of the Amur plate. Monthly averages of the data from the instrumental observation period have shown the displacement of seismicity maxima in the annual cycles. Spatial periodicity has been detected in meridional tectonic inhomogeneities with the sequences of seismicity maxima alternated by the chains of seismicity minima, which we may identify as zones of seismicity inversion. The periodic components revealed in seismic activity provided a basis for seismic wave modeling in which a subsequent activation of clusters of weak earthquakes ( $2 \le M \le 4$ ) is initiated by the EW strain wave front propagation at an average velocity of 2.7 km/day. This wave is modulated by slow strain wave process with rate ranging from 10 to 100 km/yr, which takes its origin in the zone of interaction between the Pacific and Eurasian lithospheric plates.

Keywords: background seismicity, annual cycle, earthquake cluster, strain wave, Amur plate, space-time seismicity model

\*\*\*

УДК 550.343.3+550.343.64

# ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧНОСТИ БАЙКАЛА ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ

Ц.А. Тубанов, Д.П.-Д. Санжиева

Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Аннотация. Рассматриваются результаты исследования сейсмичности по данным локальной сети сейсмостанций, расположенных в центральной части Байкальского рифта. Полученные данные достаточно уверенно свидетельствуют о существовании под центральной частью оз. Байкал сейсмоактивного слоя на глубине 10–22 км. Характерной чертой сейсмичности является наличие групп, роев землетрясений. Эпицентральная область Центрального Байкала районирована на три зоны, отличающиеся как по рисунку разломов, так и по характеру сейсмического режима. Определены особенности сейсмического режима Селенгинской сейсмоактивной зоны, возможно связанные с флюидным инициированием сейсмогенеза.

Ключевые слова: сейсмичность, Байкальский рифт, рой землетрясений, флюид

Опыт установки плотных сетей временных сейсмостанций в сейсмоактивных областях Байкальского рифта показывает значительную эффективность наблюдений такого масштаба. По данным локальной сети сейсмостанций в Северо-Муйском районе Бурятии получены детальные сведения о роевых последовательностях землетрясений [1, 2]. Установка временных станций ИГиГ СО РАН в Баргузинском районе позволила выявить отличительные черты очаговых параметров слабых землетрясений в Прибайкалье [3]. Таким образом, необходимость развития локальных сетей наблюдений не вызывает сомнений.

На протяжении последних 15 лет в центральной части Байкальского рифта увеличивается количество сейсмостанций. Полученные данные достаточно уверенно свидетельствуют о существовании под центральной частью оз. Байкал сейсмогенного слоя на глубине 10–22 км [4]. Глубина для большого числа зарегистрированных слабых землетрясений, к сожалению, остается неизвестной. Требуется еще более плотная сеть сейсмостанций и более детальная (трехмерная) информация о скоростном строении среды.

На основе данных локальной сети сейсмостанций в центральной части БРЗ установлено, что эпицентры большинства слабых землетрясений (менее 8-го энергетического класса) локализуются в виде обособленных в пространстве линейных групп. Очаги образуют достаточно тесные группы, с отчетливо выраженным положением длинной оси. Наиболее представительная группа эпицентров располагается полосой вдоль восточного берега оз. Байкал. На фоне общей линейной, ориентированной вдоль рифта, конфигурации эпицентрального поля отчетливо выделяются участки без эпицентров – сейсмические бреши. Наиболее представительная группа очагов землетрясений располагается полосой вдоль восточного берега оз. Байкал. Характерной чертой сейсмичности является наличие групп, роев землетрясений, сильные землетрясения сопровождаются афтершоками.

Наблюдаемая сейчас сейсмичность, в общем, повторяет контуры сейсмоактивности, установленные по данным за инструментальный период наблюдений с 1952 г. Поскольку это в основном слабые землетрясения, можно утверждать, что слабые события являются не просто фоном для сильных землетрясений, а информативной компонентой

сейсмического процесса, отражающей напряженнодеформированное состояние земной коры. С использованием карты разломов, полученной по дешифрированию аэро-космофотосъемки прибрежных территорий, батиметрии дна озера Байкал и каталога сейсмичности за 2001-2009 гг., ранее выделены сейсмоактивные зоны активизированных разломов [5]. Эпицентральная область Центрального Байкала районирована на три зоны: І – Селенгинская сейсмоактивная зона, II – Ольхоно-Котокельская зона, III - Баргузино-Святоносская зона. По характеру рисунка активизированных разломов Селенгинская зона отличается от двух других исследуемых зон. В этой зоне субпараллельные оси рифта разломы рассекаются более короткими поперечными дизъюнктивными структурами, области концентрации очагов землетрясений приурочены к пересечениям разломов. Для II и III зон наблюдается обратная картина: сетка более длинных субмеридиональных и субширотных сейсмоактивных структур пересекается укороченными «рифтовыми» разломами. При этом сейсмический режим трех сейсмоактивных зон характеризуется приблизительно одинаковыми параметрами, что позволяет объединить их в одну геодинамическую единицу. Для Селенгинской зоны характерно наличие роев землетрясений – групп событий примерно равной энергии, в то время как для Ольхоно-Котокельской и Баргузино-Святоносской зон более характерно развитие кластеров землетрясений в соответствии с моделью «форшок – главное событие – афтершок».

Детально изучена пространственно-временная эволюция сейсмичности в Селенгинской сейсмоактивной зоне. Землетрясения по шкале энергетических классов Раутиан ( $K_P$ ) статистически разделены на группы:  $K_P$ =4–8 – микроземлетрясения,  $K_P$ =9–10 – слабые землетрясения и  $K_P$ =11–13 – сильные землетрясения. Как показывает последующий анализ, такое разделение, несмотря на условность, отражает иерархию проявления деформационных процессов. Сильные события, в соответствии с классическими представлениями, располагаются случайным образом как в пространстве, так и во времени. При этом расположение микроземлетрясений и слабых событий более детерминировано и термин «сейсмический поток» (гидродинамическая аналогия) наиболее точно отражает характер сейсмичности в областях концентрации землетрясений. В диапазоне энергий землетрясений 4–8-го энергетического класса отмечается наличие периодической компоненты, с характерным изменением периодов во времени; известно, что такое поведение характерно для динамики самоорганизующихся систем с обратными связями. Периодичность потока микроземлетрясений свидетельствует о квазистационарном режиме функционирования системы на низшем иерахическом уровне.

С использованием методов кластерного анализа проведен анализ динамики сейсмического процесса. Рои и группы землетрясений в Селенгинской сейсмоактивной зоне по скорости сейсмического потока (количество землетрясений в сутки) условно разделены на две группы – быстрые кластеры (более одного события в сутки) и медленные кластеры (менее одного события в сутки). Положение сейсмических групп контролируется областями наиболее плотного расположения эпицентров землетрясений. Зона роевой активизации сухопутной части Селенгинской дельты приурочена к пересечению Дельтового и Фофоновского разломов. Наиболее активизированная роевая совокупность в акватории оз. Байкал находится в непосредственной близости от асейсмичной области залива Провал и контролируется пересечением протяженных Ольхонского и Святоносского разломов (разломных зон). В целом можно отметить, что общее положение роев и групп землетрясений более четко трассирует линейные структуры сейсмогенных разломов земной коры. При этом установлено, что «быстрые» кластеры приурочены к областям современного грязевого вулканизма, находящимся в Кукуйском каньоне близ залива Провал. Это коррелируется с данными лабораторных экспериментов исследования механизма генерации роевых групп землетрясений, связанного с инжекцией воды в область активных трещин [6].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ангараканский рой землетрясений в Байкальской рифтовой зоне / Под ред. О.В. Павлова. Новосибирск: Наука, 1987. 80 с.

2. Боровик Н.С. Сейсмический режим по данным региональной и локальной систем наблюдений в Прибайкалье // Исследования по поискам предвестников землетрясений в Сибири. Новосибирск: Наука, 1988. С. 109–115.

3. Данциг Л.Г., Дергачев А.А. Особенности характеристик очагов слабых землетрясений Прибайкалья // Сейсмичность Байкальского рифта: прогностические аспекты. Новосибирск: Наука, 1990. С. 17–22.

4. 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.

5. Татьков Г.И. Геофизический мониторинг напряженно-деформированного состояния природных и технических систем: Дис. ... доктора геол.-мин. наук. Иркутск, 2009. 309 с.

6. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.

#### FEATURES OF LAKE BAIKAL SEISMIC ACTIVITY ACCORDING TO LOCAL NETWORK OBSERVATIONS

## Ts.A. Tubanov, D.P.-D. Sanzhieva

Geological Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

*Abstract.* Consideration is being given to the seismicity research results obtained from the data recorded by local network of seismic stations in the central Baikal rift. The obtained data offer reliable evidence on the seismically active layer existing at depths of 10-22 km beneath the central Lake Baikal. Seismicity occurring therein is characterized by earthquake swarms. The epicentral region of the Central Baikal is divided into three zones, different from each other in both fault pattern and character of

seismic regime. Specific features of the seismic regime identified in the Selenga seismic active zone may be associated with seismogenesis of fluid-induced seismicity.

Keywords: seismicity, Baikal rift, earthquake swarm, fluid

\*\*\*

УДК 550.34.06

## АЛГОРИТМ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ПРИБАЙКАЛЬЯ

М.А. Хритова, Н.А. Гилева

Байкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Иркутск, Россия

Аннотация. Для изучения сейсмического режима Байкальского региона предложен алгоритм кластеризации каталога землетрясений. Приведен анализ землетрясений Култукской последовательности (27.08.2008 г.) с помощью разработанной программы.

Ключевые слова: сейсмический каталог, землетрясение, кластерный анализ, метод ближайшего соседа

Изучение сейсмического режима Байкальского региона является актуальной задачей на протяжении многих лет. Для анализа сейсмического процесса во времени и пространстве разработано программное обеспечение кластеризации каталога землетрясений.

Одним из наиболее распространенных методов выделения групп землетрясений из каталога по совокупности признаков является кластерный анализ. Этот метод позволяет определить кластеры из множества объектов, выделить группы, содержащие схожие объекты, а также выделить нетипичные объекты, которые не присоединяются ни к одному из кластеров [1]. Входными данными для изучения сейсмического режима являются параметры: время возникновения, географические координаты, глубина, энергетический класс.

В основе программы реализован алгоритм кластеризации методом ближайшего соседа [2]. Каталог представляется совокупностью *n* событий *e*<sub>i</sub>:

 $e_i = \{x_i, y_i, z_i, t_i, K_i\}, i \in [1, n],$ 

где  $x_i$ ,  $y_i$  – координаты эпицентра события;  $z_i$  – глубина землетрясения;  $t_i$  – его время;  $K_i$  – энергетический класс. Для каждого события  $e_i$  определяется его ближайший сосед  $N(e_i)$ :

 $e_j = N(e_i)$ , если  $S(i, j) = inf\{S(1, j), S(2, j), ..., S(n, j)\}$ , где S(i, j) – расстояние между событиями  $e_i$  и  $e_j$ . В качестве степени близости двух сейсмических событий, меры расстояний между событиями, рассматривается обычное расстояние в пространстве между землетрясениями:

$$S(i, j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}.$$

В программе реализована возможность выбора меры степени близости двух сейсмических событий: расстояние между эпицентрами, расстояние в пространстве между землетрясениями с учетом их глубины, мера расстояния в пространстве с учетом энергетических характеристик событий. Очевидно, что обычное расстояние не является показательным для сравнения событий, имеющих различный энергетический класс, поэтому вводится дополнительная мера расстояний в радиусах сейсмического очага [3].

Далее все события объединяются в кластеры  $Cl_k, k \in [1, m]$  по следующим правилам:

-если  $e_i \in Cl_k$  и  $e_i = N(e_i)$ , тогда  $e_i \in Cl_k$ ;

-если  $e_i \in Cl_k$  и  $S(i, j) \leq S_{\min}$ , тогда  $e_j \in Cl_k$ ;

- если для любого  $j \in [1, n]$   $S(i, j) > S_{\max}$ , тогда  $e_j$  $\cap Cl_k = \emptyset, k \in [1, m].$ 

Таким образом, из множества событий каталога выделяются кластеры, содержащие объекты, схожие по пространственному и энергетическому признаку.

Следующим этапом для учета интервала времени между событиями отдельно анализируется каждый выделенный кластер. События в кластере сортируются относительно времени в очаге, далее сравнивается время каждого события со временем предшествующего элемента кластера. Если разность времен меньше заданного параметра, то данные элементы образуют подкластер внутри выделенного кластера. В итоге каждый кластер, в свою очередь, разбивается на подкластеры по временному признаку.

Последним этапом удаляются из каталога некластеризованные элементы и кластеры, имеющие малое количество элементов.

Для изучения сейсмического процесса с помощью предложенного алгоритма и разработанной программы выбран каталог землетрясений Култукской последовательности. 27 августа 2008 г. на юге озера Байкал произошло сильное землетрясение с магнитудой  $M_w$ =6.3, которое сопровождалось большим числом повторных толчков [4]. Култукский каталог содержит 1791 событие с энергетическим классом  $K_P$ ≥4 за период наблюдения с 27 августа по 28 декабря 2008 г. Эпицентры землетрясений расположены в районе Южного Байкала в пределах географических координат 51.23–52.01 °с.ш., 103.01– 104.90 °в.д.

После первого этапа кластеризации методом ближайшего соседа из каталога удалось определить 295 пространственных кластеров. Мерой степени близости было выбрано пространственное расстояние между очагами землетрясений с учетом их глубин. Для идентификации каждому кластеру присваивается индивидуальный номер, на экранной форме элементы, принадлежащие одной группе, помечаются одинаковым цветом (рис. 1). На экран выводится схема размещения выделенных кластеров и гистограмма распределения количества землетрясений по кластерам. Значительное количество событий попадает в кластеры 219, 226 и 236.

После процедуры выделения подкластеров с учетом временного признака и удаления некластеризованных и слабо кластеризованных элементов происходит обновление экранной формы программы (рис. 1). В таблице остаются землетрясения, которые вошли в подкластеры, насчитывающие не менее указанного количества элементов. Для выбранного примера: в качестве временного интервала между двумя соседними событиями выбраны одни сутки, количество элементов в оставляемых подкластерах должно быть ≥ 10. Каждому подкластеру внутри кластера также присваивается индивидуальный номер и цвет. В программе доступны схема размещения выделенных подкластеров и гистограммы распределения количества землетрясений и выделившейся энергии по кластерам.



Рис. 1. Экранная форма программы после выделения временных подкластеров из площадных кластеров для Култукского каталога. В левой части приведена таблица с кластеризованным каталогом землетрясений, в первом столбце указан номер кластера, во втором – номер подкластера; вверху приведена гистограмма распределения количества землетрясений в подкластерах; в нижней правой части показана карта расположения выделенных подкластеров, для каждой группы указан номер кластера и подкластера.



Рис. 2. 3D модель выделенных подкластеров из Култукского каталога. Для каждого подкластера указаны индивидуальный номер, *N* – количество землетрясений, *E* – выделившаяся энергия (в 10<sup>12</sup> Дж).



Рис. 3. Экранная форма программы кластеризации: *a* – образ экрана при анализе выбранного кластера 219 с указанным временным периодом с 27.08.2008 г. по 11.11.2008 г., *б* – вид экрана при анализе выбранного подкластера 219.0. Для каждого варианта приведены гистограммы распределения количества землетрясений и энергии по времени.

Таким образом, из Култукского каталога за период с 27 августа по 28 декабря 2008 г. всего выделено 13 подкластеров по пространственному и временному признакам (подкластер 0.0 содержит некластеризованные элементы). Наибольшее количество землетрясений сгруппировалось в подкластерах: 219.0 – 227 событий, 226.0 – 101 событие, 236.3 – 76. По выделившейся энергии лидером является подкластер 283.0 (0.398·10<sup>12</sup> Дж, 12 землетрясений). Отметим, что этот подкластер пространственно удален от основных групп событий (рис. 1, 2).

Программа позволяет получать 3D модель расположения выделенных кластеров и подкластеров после каждого этапа работы. Также имеется возможность вращения построенной 3D модели, что позволяет рассмотреть расположение выделенных групп землетрясений с разных сторон.

По 3D-отображению подкластеров для Култукской последовательности можно увидеть, что для событий кластера 226 соответствуют глубины 3–10 км, землетрясения кластера 219 определены на большой глубине – 10–17 км. Кластер 236 расположен немного восточнее основного поля эпицентров на глубине 6–12 км (рис. 2). Землетрясения 219-й группы происходили в сроки с 27 августа по 24 сентября 2008 г.; события кластера 226 начались в это же время, закончились позднее – 18 октября; землетрясения 236-го кластера происходили с 4 сентября по 14 октября; 4–5 октября произошли землетрясения подкластера 283.0.

Далее для каждого выделенного подкластера и оставшихся кластеров строятся гистограммы распределения количества событий и суммарной энергии по времени с заданным периодом (рис. 3, a,  $\delta$ ). По построенным гистограммам можно проследить процесс активизации и затухания землетрясений для выбранного кластера или подкластера.

В работе приведен обзор разработанной программы кластеризации для исследования сейсмичности, выполнен пространственно-временной анализ землетрясений Култукской последовательности (27.08.2008 г.).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мандель И.Д. Кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1988. 176 с.

2. Олдендерфер М.С., Блэшфилд Р.К. Кластерный анализ // Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ. / Под. ред. И.С. Енюкова. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.

3. Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. С. 52–58.

4. Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Масальский О.К. Култукское землетрясение 2008 г. с *M*<sub>w=</sub>6.3 на юге Байкала: пространственно-временной анализ сейсмической активизации // Физика Земли. 2012. № 7–8. С. 42.

#### CLUSTER ANALYSIS ALGORITHM IN THE RESEARCH OF SEISMICITY OF THE BAIKAL REGION

#### M.A. Khritova, N.A. Gileva

Baikal Branch of Geophysical Survey, the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The catalog-based clustering algorithm has been proposed for the study of seismic regime in the Baikal region. The analysis of the Kultuk earthquake sequence of August 27, 2008 has been performed using a devised program. *Keywords:* seismic catalog, earthquakes, cluster analysis nearest neighbor method

УДК 551.248 (572.56)

## ПЕРВЫЕ СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЮГО-ВОСТОЧНОМ ЗАБАЙКАЛЬЕ (КЛИЧКИНСКАЯ СЕЙСМОГЕННАЯ СТРУКТУРА)

А.В. Чипизубов<sup>1</sup>, О.П. Смекалин<sup>1</sup>, В.С. Имаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

Аннотация. Представлены результаты сейсмогеологических исследований активных разломов в обрамлении мезокайнозойских впадин на территории Юго-Восточного Забайкалья, характеризующегося в современном эпицентральном поле очагами слабых землетрясений. В зоне Кличкинского надвига выявлены сейсмотектонические дислокации, свидетельствующие по результатам тренчинга и радиоуглеродного датирования о трех палеоземлетрясениях с магнитудой 6.0–7.2 в течение голоцена (одно около 9300 лет назад и два – за последние две тысячи лет).

Ключевые слова: палеосейсмодислокация, активный разрыв, сейсмичность, магнитуда землетрясения

Необходимость проведения палеосейсмологических исследований в слабосейсмичном районе Юго-Восточного Забайкалья вызвана обнаружением здесь микроформ рельефа вероятной сейсмогенной природы в подножии хребта Почекуй (левобережье Урулюнгуя). Они расположены в зоне Кличкинского надвига, контролирующего борта Урулюнгуевских мезокайнозойских впадин и названного так по ближайшему крупному населенному пункту – пгт. Кличка Приаргунского района Забайкальского края. Палеосейсмодислокации в других районах с низким уровнем сейсмичности были известны давно. Ранее были установлены Гусиноозерская, Ядрихинская, и Дыренская палеосейсмодислокации [1-3] в зонах активных разломов (преимущественно взбросонадвиги), контролирующих северо-западные борта мезо-кайнозойских впадин Забайкалья и Монголии.

Ситуация, сложившаяся в оценке сейсмического потенциала слабоактивных структур, не допускала наличия ПСД в этих районах. Дэрэнское землетрясение 1998 г. (*M*<sub>PSP</sub>=6.1) наглядно показало несостоятельность оценки сейсмической опасности по непродолжительной сейсмостатистике и геологогеофизическим критериям сейсмичности.

В последние годы нами были выявлены два последних акта разрывообразования по Баганурскому надвигу, контролирующему борт Верхнекеруленской впадины. Амплитуда вертикального смещения при предпоследней подвижке ( $\approx$ 7–8 тыс. лет) на протяжении 47 км составляла 1.8 м, а при последней ( $\approx$ 3 тыс. лет) на протяжении 20 км – 1.2–1.3 м. Амплитуды надвигания будут существенно больше (порядка 2.7 и 1.9 м, соответственно). По соотношениям, приводимым различными авторами, магнитуда предпоследнего события могла быть в пределах 7.0–7.4, а последнего – 6.7–7.2.

Геолого-тектоническая информация по району рассматриваемых Урулюнгуевских впадин отражена на рис. 1. Впадины выполнены верхнеюрскими и меловыми отложениями мощностью до 800 м, а также, возможно, более древними отложениями мезозоя. В центральной части впадины отложения почти горизонтальны, а в прибортовых частях осложнены складками с падением слоев до 15–18° (и более крутые в Восточно-Урулюнгуевской (ВУр) впадине).

Хотя на геологической карте Кличкинский надвиг проходит большей частью по известнякам позднего протерозоя, в действительности же он перекрыт рыхлыми делювиальными и делювиальнопролювиальными отложениями, которые им и смещаются. Кличкинский надвиг контролирует СЗ борт ВУр впадины, затем переходит к ЮВ борту Западно-Урулюнгуевской (ЗУр) впадины и надвигает часть ЮВ борта впадины уже в обратном направлении. Перегиб рельефа по этому разлому достигает 200-300 м. Вследствие этого, а также степного ландшафта местности он хорошо просматривается с большого расстояния. Можно предполагать, что активный разлом, контролирующий северо-западный борт ЗУр впадины, также представляет собой надвиг или взбросо-надвиг. Северо-западные борта Урулюнгуевских впадин выше противоположных бортов как раз на 200-300 м.

Начало активизации Кличкинского надвига относится к раннечетвертичному времени, для которого характерно общее тектоническое поднятие с обилием осадков и формированием V-образных переуглубленных речных долин с мощностью отложений 50–60 м. По линии Кличкинского надвига периодически блокировался сток речных вод из западной впадины в восточную и формировались подпорные озера в первой впадине. Озерно-аллювиальные отложения (пески и глины с прослоями гравийногалечного материала) в этой впадине по данным бурения достигают 65 м, причем на долю  $Q_{1-3}$  приходится 49 м, на  $Q_{3-4} - 3-11$  м, а на современные ( $Q_4$ ) – до 5 м.

Палеосейсмологические исследования проводились в районе Маргуцекского прохода (антецедентный участок долины р. Урулюнгуй) по подножию хребтов Маргуцек и Почекуй. С использованием лазерного угломера проведено морфологическое профилирование (8 гипсометрических профилей) по сейсмогенным микроформам рельефа. Кроме этого, маломощным экскаватором на базе МТЗ-82 предпринята попытка вскрытия траншеей сейсмогенного уступа для уточнения структуры разрывной зоны для взятия проб на радиоуглеродный анализ. Всего было отобрано шесть гумусосодержащих проб, из которых четыре были отправлены на радиоуглеродный анализ в лабораторию Санкт-Петербургского университета.



Рис. 1. Геолого-тектоническая схема района Урулюнгуевских мезокайнозойских впадин. *1* – домезозойские образования, прорванные интрузиями различного состава с возрастом до нижней юры; 2 – юрские образования; *3* – меловые образования; *4* – четвертичные отложения.

Во многих случаях в зоне Кличкинского надвига проявляются уступы высотой в десятки метров, которые можно считать многоактными сейсмотектоническими уступами. Один из таких уступов в рыхлых пролювиальных отложениях прослеживается на ЮВ фланге рассматриваемого надвига по подножию Маргуцекского хребта. При высоте этого уступа около 10 м (крутизна 19-21° в верхней части и 15-17° в нижней части) амплитуда вертикального смещения составляет 4.5 м. Скорее всего, данный уступ сформировался при двух палеособытиях с амплитудами вертикального смещения порядка 1.5 м (крутизна 15-17°) и 3 м (крутизна 19-21°). Наиболее молодые одноактные дислокации последнего палеособытия прослеживаются по подножию Маргуцекского хребта в виде невысоких и пологих уступов. В одних случаях они трассируются на пологих поверхностях, покрытых пролювием, вдали от выходов коренных пород, а в других – прослеживаются вблизи (в 30-50 м) от выходов коренных пород, повторяя в целом их конфигурацию. Для второй ситуации характерно смещение дислокациями небольших конусов выноса, вследствие чего сейсмогенные уступы выглядят более рельефно. Можно утверждать, что в местах выхода коренных пород происходило их надвигание на рыхлые пролювиально-делювиальные отложения. Судя по крутизне (14-18°) уступов, они образовались в начале голоцена. Небольшая высота уступов с выдержанным уклоном свидетельствует о их одноактном формировании, скорее всего, при взбросо-надвиговой подвижке с амплитудой вертикального смещения в 1.2– 1.9 м. О таком кинематическом типе свидетельствует извилистость трассы сейсмоуступов с заходом вверх по долинам временных водотоков.

По подножию хребта Почекуй одноактные сейсмогенные уступы, несмотря на небольшие параметры, выражены наиболее ярко (просматриваются даже из вагона поезда). Кроме уступов с крутизной 14-18°, наблюдаются более пологие крутизной 11-13° (профиль 5 на рис. 2), а также более высокие двойные уступы (профиль 6 на рис. 2). Двойные более мощные уступы характерны только для дугообразного отрезка. Судя по профилю 6, более крутая (16-19°) нижняя часть уступа обусловлена подвижкой с вертикальной амплитудой до 1.5 м, тогда как пологая (11-14°) верхняя часть - такой подвижкой порядка 1 м. Большой дугообразный изгиб и многие другие изгибы более высокого порядка (рис. 2) определенно свидетельствуют о надвиговой (взбросонадвиговой) природе сейсмогенных уступов. Вполне вероятно, что при разрывообразующих палеособытиях одновременно вскрывались и разрывы по границе выходов коренных (скальных) пород в десятках метров выше по склону.



Рис. 2. Трассировка взбросо-надвигового уступа в основании хребта Маргунцек и местоположение траншеи (Т) и закопушки (З). На врезках – профили с их численными параметрами. На фотографии пунктиром показаны верхняя и нижняя бровка уступа.

Имеющиеся в нашем распоряжении данные свидетельствуют о том, что в зоне Кличкинского надвига неоднократно происходили разрывообразующие палеоземлетрясения. Сейсмотектонические деформации последнего из них с возрастом ≈9300 лет сохранились к настоящему времени в виде пологих (до 17-20°) уступов высотой до 3 м (амплитуда вертикального смещения 1.2-1.9 м, см профили на рис. 2) на протяжении 8 км. Амплитуда надвига или взбросо-надвига существенно больше вертикального смещения и составляет приблизительно 2.3 м (1.8-2.7). Сохранившиеся палеосейсмодислокации предпоследнего события выражены в более пологих (до 13-14°) уступах на сопоставимом или меньшем протяжении. Они образовались при вертикальной подвижке в 1.0-1.5 м.

Близкую к реальной оценку величины палеоземлетрясений могут дать соотношения для взбрососдвигов активизированных платформ, полученных по выборке, включающей Среднюю Азию, Китай, Монголию и Прибайкалье [4]. Близкая к реальной магнитуда ( $M_{\rm D}$ ) последнего палеоземлетрясения, с учетом оценок других исследователей безотносительно регионов, находится в интервале 6.8–7.4, что в среднем составит 7.1.

После этого палеособытия на протяжении девяти тысячелетий разрывообразующих землетрясений не было. Однако по наличию сейсмогравитационных (вторичных) дислокаций можно судить о возникновении в период от 1 до 2 тысяч лет палеособытия с  $M \approx 6.5$ , а в период до 1 тысячи лет – палеособытия с  $M \approx 6.0$ .

Все это указывает на высокий сейсмический потенциал Юго-Восточного Забайкалья и, несомненно, должно учитываться при проведении региональных работ по сейсмическому районированию.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–05–00224) и Российского научного фонда (проект № 15–17– 20000).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хромовских В.С. Сейсмогеология Южного Прибайкалья. М.: Наука, 1965. 121 с.

2. Сейсмотектоника и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья / Ред. В.П. Солоненко. М.: Наука, 1968. 220 с.

3. Ласточкин С.В. К сейсмогеологии Западного и Центрального Забайкалья // Поздний плейстоцен и голоцен юга Восточной Сибири: К XI Конгрессу INQUA в СССР, Москва, 1982. Новосибирск: Наука, 1982. С. 136–145.

4. Чипизубов А.В. Выделение одноактных и одновозрастных палеосейсмодислокаций и определение по их масштабам магнитуд палеоземлетрясений // Геология и геофизика. 1998. № 3. С. 386–398.

#### FIRST SEISMOGEOLOGICAL STUDIES IN SOUTH-EAST TRANSBAIKALIA (KLICHKA SEISMOGENIC STRUCTURE)

# A.V. Chipizubov<sup>1</sup>, O.P. Smekalin<sup>1</sup>, V.S. Imaev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Diamond and Precious Metal Geology Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Abstract. Presented here are the results of paleoseismic studies of active faults bordering the Meso-Cenozoic basins in the South-East Transbaikalia, which is characterized by weak earthquake sources in the present-day epicentral area. Seismotectonic dislocations identified in the Klichka thrust zone using trenching and radiocarbon dates are indicative of three Holocene paleoearthquakes with a magnitude of 6.0–7.2, one of which occurred about 9300 years ago (M=7.2) and the two others over the last 2000 years (M≈6.5 and M≈6.0).

Keywords: paleoseismodislocation, active fault, seismicity, earthquake magnitude

# РАЗДЕЛ ІУ

# ОПАСНЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНАХ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ

УДК 551.4+551.89(571.53)

## ЧЕХОЛ РЫХЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ КАК ИНДИКАТОР НЕОДНОКРАТНОГО КАТАСТРОФИЧЕСКОГО СБРОСА ВОДЫ ИЗ ОЗЕРА БАЙКАЛ ПО ДОЛИНЕ Р. АНГАРЫ

С.Г. Аржанников<sup>1</sup>, А.В. Аржанникова<sup>1</sup>, А.В. Иванов<sup>1</sup>, Е.И. Демонтерова<sup>1</sup>, Д. Янсен<sup>2</sup>, Ф. Прессер<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Institute of Earth and Environmental Sciences, University of Potsdam, Germany

<sup>3</sup> Institute of Earth & Environmental Sciences Albert Ludwigs University Freiburg, Germany

Аннотация. Образование ангарской прорези и последовавшего за этим меганаводнения по последствиям можно сравнить со сбросами приледниковых озер Мизулла и Агассис. Следы гигантских прорывных потопов до сих пор зафиксированы в рельефе и осадках этих территорий. Феномен образования ангарской прорези является наглядным примером тех катастрофических процессов, которые отражают динамику импульсного, очень краткосрочного, но энергетически насыщенного изменения ландшафтных обстановок. Глубина прорывных потоков оценивается десятками, иногда сотнями метров. Меганаводнения приводили к существенным изменениям в долинах рек на всем пути прохождения водного потока и в значительной степени влияли на сложившиеся условия обитания человека. Приводятся новые данные по образованию Ангарского истока и формированию отложений в условиях меганаводнения около 12 тыс. лет назад. *Ключевые слова:* река Ангара, песчаные отложения, меганаводнение, залив Лиственничный

Из анализа материалов геологической съемки известно, что на территории Иркутского амфитеатра (в долинах рек Ангара, Иркут, Китой, Белая, Ока и др.) широко развиты песчано-глинистые отложения. заполняющие неровности палеорельефа. Совокупность мощных пачек аллювиальных отложений, залегающих на различных уровнях рельефа, и комплекс эрозионных форм ассоциируются с высокоэнергетическим процессом, протекавшим в определенный период геологического развития южной части Иркутского амфитеатра. Имеющиеся публикации [1-6] и наши исследования [7] дают основания предположить существование в прошлом крупной гидросферной катастрофы или серии катастроф, связанных со сбросом большого объема воды по долине р. Ангары. Источником такой массы воды мог стать новый сток из озера Байкал в районе залива Лиственничный. Исходя из существования разновысотных террас на берегах оз. Байкал, образование нового стока по долине р. Ангара могло происходить многоактно.

Исследователями неоднократно отмечалась катастрофичность образования Ангарского стока и залива Лиственничный, однако далее констатации данного факта в научной среде идея развития не получила. Казалось бы, при упоминании образования нового стока необходимо было коснуться вопросов и об уровне воды в Байкале, существовавшем на тот момент, объеме воды, сброшенном по долине р. Ангары, и всей той череде катастроф, происходивших на территории, подвергнувшейся меганаводнению. Если учесть, что перепад высот между самым низким предыдущим порогом стока через р. Иркут и р. Ангарой достигает 200-250 м, то объем сброшенной воды мог составлять 8-10 тысяч кубических километров. Соглашаясь с вероятностью катастрофического или быстрого опускания всего тектонического блока Лиственничного залива или его части и даль-

нейшей катастрофической моделью развития событий, мы видим решение данной проблемы через изучение и датирование чехла рыхлых отложений и форм рельефа в долине р. Ангары и ее притоках. Для определения характера залегания и датирования отложений по притокам р. Ангары была изучена серия разрезов, в частности к ним относится разрез песчаных отложений в долине реки Белой (рисунок). Разрез рыхлых отложений расположен в точке с координатами 52°49′36.4′′ с.ш., 103°21′53.2′′ в.д., в правом борту долины реки Белой в 10-метровой террасе. В разрезе выделяются семь пачек. Пачка I, аэральные отложения (0.15-0.4 м). Пески рыжие, разнозернистые, неотмытые, с большим количеством глинистого материала. Пески сильно ожелезнены и уплотнены. Пачка II, аэральные отложения (0.4–1.0 м). Косослоистые эоловые крупнозернистые пески. Пачка выдержана по мощности. Пачка III, аквальные отложения (1.0-1.4 м). В верхней части пачки наблюдается не выдержанный по простиранию и мощности суглинистый прослой (от 1 до 10 см). Пачка IV, аквальные отложения (1.4-2.3 м). Слоистость становится менее волнистой, более тонкой (мощность слойков - до нескольких мм). Среднезернистые пески угловатые, слабоокатанные, перемежаются с более темными тонкозернистыми песками с включением пылеватых частиц. Отмечается вторичное ожелезнение - пески имеют рыжий цвет. Ниже пески снова становятся серыми. Пачка V, аквальные отложения (2.3-6.8 м). Переслаивание рыжеватых, серовато-белесых и темно-серых песков мощностью – от 1-2 см до 1-2 мм. На глубине 4.2 м пачка становится в целом более тонкослоистой, сокращается количество прослоев среднезернистого рыхлого песка. В нижней части зачистки – мощный прослой (до 10-12 см) серого суглинистого материала, характеризующий начальную стадию формирования слабопроточного водоема.



Разрез рыхлых отложений в 10-метровой террасе р. Белой. Латинские цифры обозначают номера пачек, описанные в тексте. BLR01 обозначает номер образца, отобранного в 2012 г. на OSL датирование и привязанного к общему разрезу, вскрытому в 2006 г.

Пачка VI, аэральные отложения (6.8–6.9 м). Пачка представлена незрелой палеопочвой, которая имеет супесчаный состав и более или менее гумусированые горизонты. Общая мощность этой пачки около 10 см. Пачка VII (6.9–9.0 м). Криотурбированные горизонты субаэральных отложений, которые в верхней части представлены несортированными песками с включением дресвы и ветрогранников. Эти отложения, так же как и нижележащие, проработаны мерзлотными процессами, о чем свидетельствуют мерзлотный клин, криотурбации, солифлюксий. Клин начинается с высоты 7.3 м и уходит на глубину. С глубины 8.4 м начинаются слоистые речные аллювиальные пески, тоже деформированные шлирами мерзлотного клина.

Для определения возраста начала накопления аквальной пачки, представленной песчаными отложениями разной фракции, в 0.3 м выше от контакта аллювиальных и аэральных отложений был взят образец на OSL датирование.

Как видно из разреза, аллювиальная песчаная пачка (рисунок), расположенная между аэральными отложениями, формировалась в условиях слабопроточного водоема при небольших скоростях течения. Аэральная обстановка, доминировавшая продолжительное время, резко изменилась на аквальную. Если принять во внимание факт распространения песчаных массивов аквального генезиса, залегающих несогласно на аэральных отложениях вверх по долине р. Белой, то становится очевидным, что территория, подверженная затоплению, маркируется изолиниями вплоть до абсолютной высоты 430 м. Это, в свою очередь, предполагает огромный слабопроточный водоем и в долине р. Ангары глубиной 40 м или более.

Рекогносцировочные исследования, проводившиеся в долинах правых притоков р. Ангары, показали, что несогласия в пачках песчаных отложений являются характерной чертой многих долин. Так, аналогичные перекрытия почвенных горизонтов аквальными отложениями выявлены в долинах рек Куда, Оек, Балей. Если исходить из абсолютной высоты выявленных осадков, то максимальный уровень воды мог достигать 470 м над уровнем моря.

Отобранный образец в долине р. Белой (рисунок) показал следующий результат. Начало формирования аллювиальной пачки, согласно полученным OSL датам, приходится на 12.1±1.3 или 12.9±1.0 тыс. лет назад. Это совпадает с периодом начавшегося похолодания, известного как дриас-III, и заложения необычайно мощных криогенных жил, аналоги которых не наблюдаются в разрезах ранее молодого дриаса в Прибайкалье [8]. Существование псевдоморфозы по повторно-жильному льду в пачках отложений VII-VIII косвенно подтверждает возраст аллювиальных песков, полученный по OSL методу. Таким образом, около 12 тыс. лет назад часть тектонического блока в заливе Лиственничный была опущена (возможно, при сейсмическом событии), что привело к изменению местного базиса эрозии и образованию нового порога стока из Байкала. Амплитуда перепада высоты предыдущего и нового уровня стока могла достигать 40-60 м, что вытекает из амплитуды оползня в районе истока Ангары. В этом же районе в акватории озера на глубине 40-60 м обнаружена сброшенная терраса, которая согласуется с амплитудой смещения блоков в надводной части [9]. При разнице высот современного и позднеплейстоценового уровня воды в озере сброшенный объем мог достигать 2500 км<sup>3</sup>. Спуск воды продолжался несколько месяцев. В этот период в долине р. Ангары и ее притоках произошли широкомасштабные изменения. Начавшийся сброс воды из Байкала с огромными скоростями и разрушительным потенциалом потока вскоре привел к быстрому подъему уровня реки, чему способствовала малая

пропускная способность долины р. Ангары ниже устья р. Белой. Скорость потока резко упала, и сформировался слабопроточный водоем. Огромные массы осадков засыпали поймы и низкие террасы со следами пребывания человека в долине р. Ангары и ее притоках. Археологи неоднократно отмечали, что в финале позднего сартана произошло крупное тектоническое событие, сопровождавшееся активизацией гравитационных процессов в нехарактерных для этого районах, сильным размывом и погребением культурных горизонтов в долине р. Ангары [10].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16–05–00183, 14–45–04060– p\_Сибирь а).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лут Б.Ф. Геоморфология Прибайкалья и впадины оз. Байкал. Новосибирск: Наука, 1964. 212 с.

2. Ламакин В.В. Неотектоника Байкальской впадины. М., 1968. 247 с.

3. Хромовских В.С. Особенности неотектонического развития Южной впадины Байкала и ее горного обрамления // Геология и геофизика. 1967. № 1. С. 52–58.

4. Нагорья Прибайкалья и Забайкалья. М.: Наука, 1974. 359 с.

5. Кононов Е.Е., Мац В.Д. История формирования стока вод Байкала // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1986. № 6. С. 91–98.

6. Бухаров А.А., Фиалков А.А. Геологическое строение дна Байкала: Взгляд из "Пайсиса". Новосибирск: Наука, 1996. 118 с.

7. Аржанников С.Г., Аржанникова А.В., Иванов А.В., Демонтерова Е.И., Янсен Д., Прессер Ф., Маргольд М. К вопросу о формировании ангарского стока и катастрофического сброса воды из озера Байкал // Материалы IX Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г. Иркутск, 15–20 сентября 2015 г.). Иркутск: Издво Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2015. С. 27–29.

8. Воробьева Г.А. Почвы как летопись природных событий Прибайкалья: проблемы эволюции и классификации почв. Иркутский государственный университет, 2010, 205 с.

9. Потемкина Т.Г. Подводный оползень на Байкале // Природа. 2008. № 8. С. 52-55.

10. Бердникова Н.Е., Воробьева Г.А., Бердников И.М. Новый этап исследований местонахождения Усть-Белая (Прибайкалье) // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск: Институт археологии и этнографии СО РАН, 2012. С. 9–12.

# UNCONSOLIDATED SEDIMENTS IN THE SOUTHERN SIBERIAN PLATFORM AS AN INDICATOR OF CATASTROPHIC OUTBURST FLOODS FROM LAKE BAIKAL DOWN THE ANGARA RIVER VALLEY

S.G. Arzhannikov<sup>1</sup>, A.V. Arzhannikova<sup>1</sup>, A.V. Ivanov<sup>1</sup>, E.I. Demonterova<sup>1</sup>, J. Jansen<sup>2</sup>, F. Preusser<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Earth and Environmental Sciences, University of Potsdam, Germany

<sup>3</sup> Institute of Earth & Environmental Sciences Albert Ludwigs University Freiburg, Germany

*Abstract.* The impact of formation of the channel of the Angara and subsequent megaflood is comparable to that of outburst floods from glacial lakes Missoula and Agassiz. The evidence of gigantic outburst floods can still be found in the relief and sediments of these areas. A phenomenon of formation of the channel of the Angara is an illustrative example of the catastrophic processes that reflect dynamics of intermittent, very short-term but energetically intensive nature of landscape changes. The depth of outburst floods is estimated at tens, sometimes hundreds of meters. They caused significant changes in the river valleys throughout the flow path and seriously affected the existing habitat conditions. The present paper deals with some new data on formation of the Angara source and megaflood deposition at about 12 000 years ago.

Keywords: Angara River, sand sediment, megaflood, Listvenichny Bay

\*\*\*

УДК 551.4.04 (571.53/.55)

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ СБРОСОВЫХ УСТУПОВ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

Л.М. Бызов

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты комплексного математического моделирования позднекайнозойской эволюции сбросовых уступов Байкальской рифтовой системы. Сбросовые уступы и их структурные элементы (фасеты, вершинные скаты) являются индикаторами рельефообразующих процессов, эндогенных и экзогенных, действующих на протяжении позднеорогенного этапа. Таким образом, реконструкция современного рельефа позволяет определить количественные параметры орогенеза. Моделирование выполнялось с помощью программы CHILD (Channel-Hillslope Integrated Landscape Development). Данная программа создает трехмерные модели эволюции рельефа с учетом множества факторов – тектонических, русловых и склоновых. Для работы потребовалось модифицировать ее программый код и привлечь к процессу ряд ГИС-инструментов. В результате были получены модели позднекайнозойского развития от-

ской впадин, Тункинских гольцов и Святоносского поднятия и определены некоторые количественные параметры рельефообразующих процессов.

*Ключевые слова*: комплексное математическое моделирование, эволюция рельефа, сбросовый уступ, фасета, CHILD, поздний кайнозой, неотектоника

Сбросовые уступы представляют собой центральный элемент крутых бортов рифтовых впадин и располагаются между предгорными откосами и вершинными скатами [1]. В их структуре ключевую роль играют базальные фасеты – прямые, треугольные или трапецивидные, грани, обращенные к долине. Основания фасет фиксируют выход сместителей разлома на поверхность. Фасеты и сопряженные вершинные скаты разделены поперечными долинами водотоков, временных или постоянных. Формирование базальных фасет, обрамляющих впадины Байкальской рифтовой системы, связано с позднекайнозойской стадией активизации орогенеза, начавшейся, по разным данным, 3.5-5.0 млн лет назад [2, 3, соответственно]. Однако различия в морфологии фасет и вершинных скатов свидетельствуют о временной и пространственной неоднородности этого тектонического этапа. Можно предположить, что базальные фасеты являются своеобразным отражением позднеорогенной истории [4]. В качестве морфологических индикаторов выступает высота, угол наклона и ширина основания фасеты. Поскольку в формировании сбросовых уступов участвуют как эндогенные, так и экзогенные процессы, современная морфология фасет может свидетельствовать не только о тектоническом развитии территории, но и о характерных климатических условиях.

Особенности геологической памяти сбросовых уступов позволяют использовать их в качестве объекта математического и физического моделирования с целью реконструкции позднекайнозойского развития. В работе представлена серия экспериментов по математическому моделированию эволюции рельефа сбросовых уступов Байкальской рифтовой системы. В качестве основного инструмента использовалась программа CHILD (Channel-Hillslope Integrated Landscape Development), разработанная Грегори Такером, Университет Колорадо [5]. Данная программа располагает обширным арсеналом для комплексной реконструкции развития ландшафтов, включая алгоритмы тектонических, русловых и склоновых процессов. Однако она содержит ряд существенных ограничений, связанных именно с моделированием сбросовых уступов, поскольку абстрактный разлом, по которому происходит поднятие уступа, в модели строго вертикален, что не соответствует реальным условиям (как правило, угол падения сбросов в БРС составляет ≈60°). В этом случае, несмотря на общую схожесть реконструированного ландшафта с реальным, наблюдаются различия в морфологии фасет. Для решения этой проблемы, совместно с сотрудниками ИДСТУ СО РАН, был модифицирован программный код CHILD. В настоящее время проводится доработка обновленной метолики.

В ходе эксперимента были построены модели эволюции отдельных сегментов Байкальского, Приморского, Баргузинского хребтов, горного обрамления Чарской и Муйской впадин, Тункинских гольцов и Святоносского поднятия. Были использованы сценарии вертикального поднятия и поднятия вдоль заданного разлома. Для первого варианта, путем варьирования скорости поднятия или времени его начала, были получены модели, повторяющие основные черты современных ландшафтов. Морфология фасет в данном случае корректировалась с помощью алгоритма, описанного в работе [6]. Второй вариант позволил получить более корректные профили базальных фасет и вершинных скатов, но на данном этапе существуют трудности с реконструкцией русел в зоне разлома. В качестве стартовой поверхности для моделей использовались сетки с нанесенным рисунком современной русловой сети, созданные с помощью ГИС. Данный подход позволил воссоздать заложение современных долин и, как следствие, получить ландшафты, максимально схожие с реальными. Кроме того, были построены модели для абстрактных поверхностей, но с теми же вводными параметрами. Основные структурные линии в этих моделях коррелируют с моделями, полученными по заданным сеткам.

По итогам эксперимента с использованием немодифицированной версии CHILD можно отметить, что количественные параметры структурных элементов реконструированного рельефа (фасет, вершинных скатов, тальвегов), а также общая высота хребтов и отрогов, в целом, коррелируют с реальным рельефом (за исключением угла наклона фасет). Были протестированы различные сценарии развития рельефа, при этом варьировались тектонические параметры, а также те параметры русловой и склоновой эрозии/переноса/аккумуляции, которые зависят от геометрии объекта и строения подстилающей поверхности. Климатические условия (прежде всего, режим выпадения осадков) принимались общими для всей территории и всего рассматриваемого периода. Эксперимент показал, что формирование тектогенных граней возможно лишь при соблюдении определенного баланса эндогенных и экзогенных процессов. В условиях БРС для этого требуется относительно высокая скорость поднятия (не менее 0.3-0.5 мм/год) - при меньшей скорости модель демонстрирует денудацию вершинных скатов и формирование низких уступов с выпуклым (реже вогнутым) профилем. При завышенной скорости поднятия (более 1 мм/год) формирование фасет маловероятно из-за недостаточной глубины вреза. Кроме того, морфология уступа будет зависеть от исходной геометрии склона, т.е. от его ширины и уклона, а также от начальной неровности земной поверхности. К сожалению, пока рано говорить о результатах эксперимента с модифицированной версией программы - можно лишь отметить соответствие наклона фасет реальным значениям. Можно предположить, что после решения упомянутой проблемы удастся реконструировать сбросовые уступы с учетом всех возможных факторов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–35–00047).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Уфимцев Г.Ф. Морфотектоника Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1992. 216 с.

2. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: Строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 252 с.

3. Jolivet M. et al. How old is the Baikal Rift Zone? Insight from apatite fission track thermochronology // Tectonics. 2009. V. 28, TC3008. P. 1–21.

4. Petit C. et al. Height of faceted spurs, a proxy for determining long-term throw rates on normal faults: insights from the North Baikal Rift System, Siberia // Tectonics. 2009. V. 28, TC6010. P. 1–12.

5. Tucker G.E. CHILD Users Guide for version R9.4.1 Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES) and Department of Geological Sciences University of Colorado, Boulder: CO 80309 USA, 2010. 52 p.

6. Tucker G. et al. Geomorphic significance of postglacial bedrock scarps on normal-fault footwalls // Journal of Geophysical Research. 2011. V. 116, F01022. P. 1–14.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE LATE CENOZOIC DEVELOPMENT OF NORMAL-FAULT SCARPS IN THE BAIKAL RIFT SYSTEM

## L.M. Byzov

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* This paper contains a number of results concerning integrated mathematical modeling of the late Cenozoic evolution of normal-fault scarps in the Baikal Rift System. Normal-fault scarps and their structural elements indicate endogenous and exogenous relief formation processes during late orogenic processes. Therefore, the reconstruction of modern relief allows determining the quantitative parameters of orogenic process. The modeling has been performed using Channel-Hillslope Integrated Landscape Development Model (CHILD) that can serve as basis for generating 3D landscape evolution models with regard to multiple factors (tectonic, river channel and slope processes). The work required editing CHILD source code and using some GIS-tools. As a result, the models have been generated for the late Cenozoic evolution of some normal-fault scarps of the Baikal, Primorsky and Barguzin ranges, mountains bordering the Chara and Muya basins, and Svyatonossky uplift, with some quantitative parameters determined for the relief formation processes.

Keywords: integrated mathematical modeling, late Cenozoic landscape evolution, CHILD, normal-fault scarp, facet

\*\*\*

УДК: 630.182(571.5)

# ДЕНДРОИНДИКАЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОСТОЧНОМ САЯНЕ

#### В.И. Воронин, В.А Буянтуев, В.А. Осколков

Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Целью исследования была оценка динамики экзогенных процессов в долине реки Сенца (Восточный Саян) и определение климатических факторов, влияющих на развитие термокарста. Для этого были использованы методы древесно-кольцевого анализа. Изучалась частота возникновения креневой древесины, которая образуется в результате наклона стволов деревьев при солифлюкционных явлениях, у деревьев лиственницы, растущих на склонах и в ложе термокарстовой депрессии. Средний возраст обследованных деревьев составил 115-125 лет, максимальный - 190-230 лет, поэтому наиболее обеспеченным материалом оказался период последних 200 лет. Установлено, что периоды активизации образования креневой древесины пришлись на 1835-1860, 1874-1877, 1900-1906, 1922-1945, 1966-1968, 1985-1987, 2009-2012 гг. Активизация образования креневой древесины у лиственниц на протяжении двух веков происходила периодически, но наиболее продолжительный период такой активизации отмечен в первой половине ХХ в. С некоторыми вариациями в интенсивности он продолжался с 1922 г. по 1945 г. Важным представляется тот факт, что на эти годы пришелся период «потепления Арктики», для которого характерным являлось потепление в зимние месяцы и в меньшей степени потепление в теплый период года, при неуклонном возрастании осадков с начала 1930-х годов. В последние десятилетия, несмотря на существенное возрастание температурных аномалий, не наблюдается адекватный рост активности термокарстовых явлений в Восточном Саяне, судя по модельному участку, исследованному нами. Можно предположить, что в случае роста атмосферного увлажнения скорость экзогенных процессов может резко увеличиться. Ключевые слова: Восточный Саян, экзогенный процесс, термокарст, дендроиндикация, креневая древесина

В последние десятилетия большой интерес вызывает реакция многолетнемерзлых толщ на климатические изменения. Данному вопросу посвящен ряд работ [1–3]. До сих пор у исследователей криолитозоны нет единой точки зрения на характер изменений свойств мерзлоты. Одним из показателей изменений этих свойств является динамика современных экзогенных рельефообразующих процессов в криолитозоне, причем наиболее показательным является процесс термокарста, т.е. вытаивания подземных льдов с образованием на поверхности отрицательных форм криогенного рельефа. Происходящие здесь события могут быть датированы, и, таким образом, появляется возможность расшифровки временной динамики экзогенных процессов и их ведущих факторов [4, 5]. Целью исследования была оценка динамики экзогенных процессов в районе исследования и, по возможности, определение климатических факторов, влияющих на развитие термокарста.

Окинская котловина находится на северозападе Окинского (Центрального) плоскогорья, имеет почти широтное простирание и охватывает долины рек Ока, Жомболок, Сенца и Улзыта (Илез). Почвы речных долин аллювиальные. Глубина сезонного оттаивания грунтов на южных склонах составляет 1.5-2.0 м, а на северных – 0.5 м. В почвенном профиле видны следы проявления криогенных процессов, которые приводят к длительному сковыванию почвенных растворов, мерзлотной аккумуляции веществ и криотурбациям. Многолетняя мерзлота обычно залегает на значительной глубине от 0.2 до 1.5-1.7 м [6]. Температура воздуха в районе исследований колеблется в значительных пределах, в зависимости от рельефа. Амплитуда колебания средних температур достигает 50°. Атмосферные осадки выпадают крайне неравномерно и приурочены главным образом к летним месяцам. Зимних осадков за семь месяцев выпадает 70 мм, летних за 5 месяцев – 371.6 мм (отношение 1:5.3).



Рис. 1. Схема отбора модельных образцов древесины лиственницы и дата образования первой крени на поперечных спилах (кружки) и кернах (треугольники); керны с буквой «к» – контрольные. Цифрами обозначены номера модельных деревьев.

Материал для дендрохронологического анализа собран на уступе II надпойменной террасы в долине р. Сенца (1381 м над ур. моря, 52°39'51" °с.ш., . 99°29'53" °в.д.). Выбранный элемент ландшафта – термокарстовая депрессия диаметром 80 м, со склонами крутизной 5-20° и соседствующие с ней термокарстовые озера (рис. 1). Древостой на склонах и в ложе депрессии одновозрастный из лиственницы сибирской, состав древостоя 10Л, средняя высота древостоя 16 м. Ложе термокарстовой депрессии на 1.5-4.0 м ниже окружающей поверхности. Деревья, с которых были отобраны буровые образцы стволов лиственницы (керны) и поперечные спилы стволов, находились в трех позициях: 1 – ровная поверхность за пределами термокарста, 2 – склон термокарста и термокарстового озера, 3 - термокарстовая депрессия. Деревья 1-й позиции приняты за контроль (6 образцов). Деревья 2 и 3-й позиций использовали для индикации процесса развития термокарста (22 образца). Средний возраст обследованных деревьев составил 115–125 лет, максимальный – 190–230 лет, поэтому наиболее обеспеченным материалом оказался период последних 200 лет.

Основным методическим приемом при изучении временной динамики термокарстовых явлений был анализ хронологии образования креневой древесины у деревьев, растущих по склонам термокарстовой депрессии и в ее ложе. На склонах все деревья были наклонены в сторону термокарстовой депрессии или термокарстового озера, в результате чего и происходило развитие крени в годичных кольцах деревьев. Асимметричные (креневые) годичные кольца выявлялись под бинокулярным микроскопом МБС-10 и датировались с точностью до календарного года на индивидуальных древесно-кольцевых хронологиях (ИДКХ), которые строились после измерения ширины годичных колец с применением автоматизированной системы LINTAB (±0.01 мм) на поперечных спилах или буровых кернах контрольных и экспериментальных деревьев. ИДКХ датировались методом перекрестного датирования в программном пакете TSAP [7].

Первым этапом исследования было определение времени образования крени у деревьев, которые произрастали и произрастают на склонах и в ложе депрессии. Судя по возрасту этих деревьев, данная депрессия имеет более чем двухвековую историю. Самое раннее проявление крени, датируемое 1795 г., отмечено у дерева 7, расположенного с западной стороны от термокарстовой депрессии.

Если у всех деревьев в термокарстовой депрессии сравнить индивидуальные графики ширины годичных колец, полученные как по буровым кернам модельных деревьев, так и по разным радиусам поперечных спилов лиственниц, то мы получаем весьма пеструю и динамичную картину образования креневой древесины (рис. 2). Солифлюкционные процессы, просадки грунта в различных местах термокарстовой депрессии, вызывающие образование крени у деревьев, происходят на первый взгляд непрерывно и бессистемно. Кажется, что эти процессы происходят постоянно и сложно выявить моменты, когда они идут быстрее, а когда затухают. Это обычное дело при анализе реакции каждого отдельного дерева. Деревья имеют различные условия роста, местоположения и питания, разный возраст, а поэтому все процессы, влияющие на них, фиксируются в годичных кольцах индивидуальным образом. Для того чтобы получить общую картину для совокупности деревьев в дендрохронологии, и существует процедура стандартизации исходного материала, в ходе которой у индивидуальных древеснокольцевых хронологий элиминируется возрастной тренд и становится возможным объединить их в обобщенную древесно-кольцевую хронологию.

Стандартизированные ИДКХ, имеющие достаточную корреляционную связь с таковыми из всего полученного массива древесно-кольцевых хронологий, объединялись в обобщенную древеснокольцевую хронологию (ОДКХ), которая отражала уже реакцию всей популяции деревьев, произрастающих на склонах и в ложе термокарстовой депрессии (модельная ОДКХ) и в ближайших ее окрестностях (контрольная ОДКХ). Для выявления вре-
менных различий в вариациях значений модельной и контрольной ОДКХ была использована скользящая корреляционная функция с окном 5 и 10 лет и шагом в 1 год [8].

Суть этого анализа заключалась в нахождении периодов «провалов» корреляционной связи хронологий модельных деревьев, имеющих крень, и контрольных деревьев, где крень отсутствует. Поскольку эти деревья росли в непосредственной близости, ширина их годичных колец в нормальных обстоятельствах определяется одинаковым комплексом погодных условий и должна меняться во времени синхронно. И только у тех деревьев, которые становились «жертвами» солифлюкционных процессов, временами должны были возникать помехи, нарушающие корреляционную связь с нормально растущими деревьями. На рис. З такие периоды хорошо выделены. Поскольку корреляционному анализу подвергались контрольная и модельная ОДКХ, отражающие особенности роста не отдельных деревьев, а их популяции в целом, стало возможным выделить те периоды, в которые на данной территории происходила активизация деградации мерзлоты и усиленного развития термокарстовых процессов. Как нами было установлено, периоды активизации образования креневой древесины пришлись на 1835–1860, 1874–1877, 1900–1906, 1922–1945, 1966– 1968, 1985–1987, 2009–2012 гг. В это время стволы деревьев меняли углы наклона вследствие протаивания грунта и активизации солифлюкционных процессов.



Рис. 2. Периоды активного образования креневой древесины у лиственниц в термокарстовой депрессии. По оси ординат – номера деревьев, с которых были отобраны образцы.



Рис. 3. Показатели корреляционной связи модельной и контрольной ОДКХ. Серым цветом показан вариант с окном, равным 10 годам, и шагом 1 год, черным – с окном в 5лет и шагом 1 год. Статистические показатели: σ=0.23; среднее значение, обозначенное пунктирной линией, 0.81.

Таким образом, проведенный нами корреляционный анализ показал, что активизация образования креневой древесины у лиственниц в исследуемой термокарстовой депрессии на протяжении двух веков происходила периодически. Наиболее продолжительный период активизации экзогенных процессов отмечен в XX в. С некоторыми вариациями в интенсивности этот период продолжался с 1922 по 1945 г. Важным представляется тот факт, что на эти годы (1919-1944 гг.) пришелся период «потепления Арктики» [2, 3]. Климатический режим этого потепления наиболее полно освещен в работе [9]. Автор отмечает, что потепление Арктики в 1930-х годах прежде всего проявилось в потеплении в зимние месяцы и в меньшей степени – в потеплении в теплый период года, при неуклонном возрастании осадков с начала 1930-х годов. Следует также отметить, что близкие к нашим периоды активизации термокарстовых процессов в Якутии выделены в работе [10]: 1850-1860, 1870-e, 1925-1930, 1940-e, 1955-1965, 1970-1980 и 1990-е гг. В это же время на севере Западной Сибири при обследовании термокарстовой депрессии Л.И. Агафонов [4] выявил концентрацию случаев формирования креневой древесины у большинства лиственниц около 1850 г., тогда как данная депрессия начала формироваться в XVI в. Как видим, налицо очень высокая временная синхронность периодов активизации термокарстовых процессов в значительно удаленных друг от друга районах Сибири на протяжении последних 200 лет. Речь идет о наиболее продолжительных и масштабных проявлениях термокарстовых процессов и о том, что существует некий общий «дирижер», который обеспечивает их синхронизацию. Отсюда следует важное заключение о том, что развитие термокарстовых процессов в Сибири регулируется не погодными, а климатическими изменениями. И изменения эти должны быть масштабными и продолжительными. Многолетняя мерзлота является достаточно инерционным, консервативным образованием и пока еще не откликается адекватно на современные климатические изменения.

Также важным вопросом является определение климатического фактора, периодически активирующего термокарстовые процессы. В непосредственной близости от района наших исследований (170 км) находится гидрометеостанция (ГМС) Инга, однако ряд метеонаблюдений ее очень короток. Мы провели корреляционный анализ значений температуры воздуха и суммы осадков ГМС Инга и гидрометеообсерватории (ГМО) Иркутск и установили,

что данные по температуре воздуха имеют очень сильную (R=0.95), а по сумме осадков - сильную связь (R=0.7). Учитывая это обстоятельство, мы с полным правом смогли использовать для климатического анализа метеоданные ГМО Иркутск. С определенной долей условности были выделены два периода. В первой половине XX века (до 1970-х гг.) температурные положительные аномалии были крайне редки, а периоды повышенного атмосферного увлажнения случались довольно часто. Начиная с 1978 г. положительные температурные аномалии становятся, чуть ли не ежегодными, тогда как периоды повышенного увлажнения стали случаться реже. Казалось бы, такое резкое повышение температурного фона должно вызвать активизацию экзогенных процессов и, соответственно, резкое увеличение доли креневой древесины у лиственниц. Но это не происходит. В то же время наиболее длительный период активизации термокарстовых явлений пришелся на первую половину XX в., когда температурный фон был на уровне средних значений, но аномалии количества осадков были существенными. Учитывая тот факт, что наиболее активно исследованная термокарстовая депрессия развивалась в период, когда атмосферные осадки доминировали среди климатических факторов, мы можем сделать вывод о доминирующей роли атмосферного увлажнения в разрушении многолетней мерзлоты.

Таким образом, применение дендрохронологического анализа деревьев в районах термокарста позволяет выделять временные периоды активизации экзогенных процессов, связанных с деградацией многолетней мерзлоты. В районе наших исследований наиболее значимый период активизации был приурочен к первой половине XX в. и связан с увеличением числа аномалий атмосферного увлажнения в эти годы. «Потепление Арктики» проявилось в большей мере в потеплении в зимние месяцы и в меньшей степени – в потеплении теплого сезона года, при неуклонном возрастании уровня атмосферных осадков с начала 1930-х годов [9]. В последние десятилетия, несмотря на существенное возрастание температурных аномалий, не наблюдается адекватного роста активности термокарстовых явлений в Восточном Саяне, судя по модельному участку, исследованному нами. Можно предположить, что в случае роста атмосферного увлажнения скорость экзогенных процессов может резко увеличиться.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14–04–00014).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г. Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата// Криосфера Земли. 2008. Т. XII, № 2. С. 10–18.

2. Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения климата на севере России. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2005. 54 с.

3. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2008. 229 с.

4. Kirdyanov A.V., Prokushkin A.S., Tabakova M.A. Tree-ring growth of Gmelin larch under contrasting local conditions in the north of Central Siberia // Dendrochronologia. 2013. № 31(2). P. 114–119.

5. Николаев А.Н., Федоров П.П., Десяткин А.Р. Влияние гидротермического режима мерзлотных почв на радиальный прирост лиственницы и сосны в Центральной Якутии // Сибирский экологический журнал. 2011. № 2. С. 189– 201.

6. Шарастепанов Б.Д. Природные ландшафты Окинского плоскогорья и их использование в туристскорекреационных целях: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Улан-Удэ, 2007. 22 с. 7. Rinn F. TSAP V 3.6 Reference manual: computer program for tree-ring analysis and presentation. Heidelberg, Germany, 1996. 263 p.

8. Trindade M., Bell T., Laroque C. Changing climatic sensitivities of two spruce species across a moisture gradient in Northeastern Canada // Dendrochronologia. 2011. V. 29, № 1. P.25–30.

9. Адаменко В.Н. Климат и озера (к оценке настоящего, прошлого и будущего). Л.: Гидрометеоиздат, 1985. С. 263.

10. Agafonov L., Strunk H., Nuber T. Thermokarst dynamics in Western Siberia: insights from dendrochronological research // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2004. V. 209, № 1/4. P. 183–196.

## DENDROINDICATION OF LOCAL THERMOKARST PROCESSES IN THE EASTERN SAYAN

V.I. Voronin, V.A. Buyantuev, V.A. Oskolkov

Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The aim of our study was to evaluate the dynamics of exogenous processes in the Sentsa River valley (mountains of Eastern Sayan) and define the climatic factors affecting thermokarst development. This has been done using dendrochronology or tree-ring dating. Studies have been made of reaction wood occurrence due to solifluctive inclination of Siberian larch-trees growing on the slopes and in the bed of thermokarst depression. The average age of the studied trees was 115–125 years and the maximum age – 190–230 years, with most of the evidence-based material related to the period of the last 200 years. It has been found that higher rates of occurrence of reaction wood fell within periods 1835–1860; 1874–1877; 1900–1906, 1922–1945, 1966–1968, 1985–1987, 2009–2012. More rapid formation of larch reaction wood occurred periodically over two centuries though the longest period of higher formation rate took place in the first half of the twentieth century. It lasted from 1922 to 1945, with variations in intensity. Of importance is the fact that during these years there occurred the Arctic warm period characterized by warm wintertime temperatures and somewhat warmer summertime temperatures with a steady precipitation increase in the early 1930s. The part of the model we have investigated in recent decades, despite significantly increasing number of temperature anomalies, does not imply an adequate increase in thermokarst activity in the Eastern Sayan. It is believed that the increase in atmospheric moisture content can result in dramatically increased rates of exogenous processes.

Keywords: Eastern Sayan, exogenous processes, thermokarst, dendrochronology, reaction wood

\*\*\*

УДК 551.4.04

# ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ БАЙКАЛЬСКИХ ТЕРРАС ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ ТЕРРАСОВОГО КОМПЛЕКСА УШКАНЬИХ ОСТРОВОВ

И.М. Ефимова, Ф.Л. Зуев

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Для решения вопросов о количестве, гипсометрическом положении, возрасте, генезисе террас Ушканьих островов и о вкладе дифференцированных неотектонических движений, а также изменений уровня Байкала в их формирование были проведены специальные детальные геолого-геоморфологические исследования. В ходе полевых работ выполнялись геолого-геоморфологические маршруты с составлением профилей GPS-нивелирования, вскрытием и опробованием отложений, перекрывающих террасовидные поверхности. По данным GPS-нивелирования были построены серии профилей, отражающие топографию поверхностей террас, что позволило уточнить их гипсометрию и создать максимально подробную на сегодняшний день картографическую схему террас и цифровую модель рельефа Ушканьих островов. По результатам корреляции высотных уровней террас островов с лестницами террас материковой части озера были получены новые данные о геодинамической активности локальных участков береговой зоны Байкала за неоплейстоцен-голоценовый период.

Ключевые слова: Байкал, изменение уровня, озерная терраса, число высоты, генезис, палеогеография, неотектоника

Расположенные в центральной части озера Ушканьи острова являются вершинами подводного Академического хребта, разделяющего Северную и Среднюю котловины озера Байкал. От полуострова Святой Нос Академический хребет отделен подводным желобом глубиной до 860 м, который к юговостоку постепенно смыкается со Среднебайкальской котловиной. Абсолютные высоты Академического хребта изменяются от 160 м над уровнем моря в его подводной части до 671 м – в надводной. Архипелаг состоит из четырех островов, три из которых, названные Малыми, возвышаются над урезом воды на высоту от 17 до 21 м, а их суммарная площадь не превышает 1 км<sup>2</sup>. Максимальная отметка о. Большой Ушканий имеет превышение над уровнем оз. Байкал в 216 м – это самый крупный из Ушканьих остров, он вытянут с запада на восток на 4.25 км, имеет максимальную ширину 2.5 км и площадь около 9 км<sup>2</sup>. Его поверхность, подобно многим другим островам и мысам на Байкале, имеет резко выраженную асимметрию с пологим западным и крутым обрывистым южным и юго-восточным бортом.

Все Ушканьи острова сложены древними нижне-верхнепротерозойскими породами баргузинской (?) свиты, представленной толщей кристаллических известняков, переслаивающихся со сланцами и гнейсами. Поверхность Большого и Малых Ушканьих островов террасирована, но эрозионные формы рельефа здесь отсутствуют за исключением небольших ложбин на острове Большом, созданных не русловыми, а лишь временными склоновыми водотоками. Выделенная еще во второй половине XIX в. И.Д. Черским [1] лестница террас на Большом Ушканьем острове в дальнейшем еще неоднократно привлекала к себе внимание исследователей, обзор публикаций которых выявил существенные разногласия по вопросу количества террас, гипсометрического положения и механизма их образования. Широко распространено мнение, что формирование террас Большого Ушканьего острова происходило под воздействием прерывистых тектонических поднятий. В.В. Ламакин [2] подробно описал «перекосы» террас островов, объясняя их интенсивным, но неравномерным по площади поднятием архипелага в современную эпоху. А.С. Ескин с соавторами [3] пришел к выводу, что с конца плиоцена острова Большой и Малые Ушканьи испытывают постоянную тенденцию к поднятию и циклы прерывистых поднятий фиксируются высотными уровнями террас. Е.Е. Кононов [4], сравнивая высоты террас острова Большого с террасами материковой части побережья озера, сделал вывод, что остров продолжает испытывать устойчивые поднятия, поскольку его террасы имеют более высокие гипсометрические отметки. Приведенные заключения [2-4] противоречат выводам А.А. Бухарова [5], который считал, что район Ушканьих островов и значительной части Академического хребта с миоцена – раннего плиоцена представлял собой единое возвышенное пространство и лишь в конце плейстоцена – начале голоцена Академический хребет был отделен от Ушканьего порога, что подтверждается данными многоканального сейсмического зондирования о существовании мощного молодого разлома, проходящего в широтном направлении южнее Ушканьих островов. Тектоническое опускание по серии ступенчатых сбросов с амплитудой опускания 400-500 м привело к затоплению Академического хребта, а следовательно, острова не могли подняться на их современную высоту, как это утверждал В.В. Ламакин, поскольку для образования неотектонического вздутия с амплитудой 1000 м в течение 10 000 лет потребовалась бы скорость поднятия более 10 см/год. Исходя из этого, район Ушканьих островов существовал как остаточная горная возвышенность, по мнению А.А. Бухарова [5], на протяжении всего неоген-четвертичного периода.

Из приведенных выше противоречивых заключений из самых известных публикаций, частично или специально посвященных террасам Ушканьих островов, становится очевидным, что массив Ушканьего архипелага по-прежнему остается ключевым участком для общего решения вопроса о механизме формирования байкальских террас.

Проведенные нами исследования позволили выделить на Большом Ушканьем острове по западному и северо-восточному его секторам превосходно выраженные в рельефе 12–13 уровней озерных террас. На всех уровнях в шурфах нами был обнаружен галечный, уплощенный, хорошо окатанный материал, причем окатанность достигает высоких значений – коэффициент окатанности (Ко) равен 50–80 % и выше, что является одним из доказательств озерного генезиса площадок. Двенадцатая терраса острова расположена в его срединной части, обладает очень широкой и уплощенной субгоризонтальной, слегка неровной поверхностью и отделяется от вершинной площадки небольшим перегибом по профилю склона. Она приподнята над уровнем озера на 200–205 м, и на ее поверхности встречаются единичные гальки 2–3-го класса окатанности, а также отдельные слабоокатанные глыбы. В разрезе этой террасы шурфами вскрываются превосходно окатанные (*Ко*=73.4 %) гравийно-галечные отложения преимущественно кварцитового состава.

Вдоль северной бровки этой террасы нами были обнаружены валообразные, вытянутые соответственно береговой линии озера гряды высотой до 3-4 м, шириной от 1 до 5 м, протяженностью до 30 м и более, сложенные преимущественно валунами. Очевидно, что это комплекс реликтовых форм, маркирующих положение древних береговых линий, который сформировался при высоком стоянии уровня озера в геологическом прошлом, представленный серией береговых валов и баров, а ложбина за ними – это депрессия на месте бывшей лагуны. Подобный комплекс реликтовых форм был обнаружен нами на восточном побережье Южнобайкальской впадины, где он зачастую венчает плоские абрадированные поверхности отдельно стоящих возвышенностей. Интересно, что в работе А.А. Бухарова [5] эти валообразные гряды были определены следующим образом: «...галечниковые жилы, по-видимому, представляют собой реликты донной морены, сохранившейся в виде «микрооз» или «микрокамов», а карбонатные гряды — друмлины — результат движения относительно мощного среднеплейстоценового ледника». Исходя из наших наблюдений при сопоставлении данных образований с подобными им на других участках побережья Байкала, это утверждение А.А. Бухарова не нашло подтверждения.

Для построения цифровой модели рельефа (DEM — Digital Elevation Model) мы использовали набор архивных аэрофотоснимков, сделанных в июле 1960 г. Аэрофотосъемка была выполнена с высоты около 2050 м над уровнем моря (1600 м над уровнем Байкала) объективом «Руссар-33» с фокусным расстоянием 100 мм и углом зрения 104°, рабочая область каждого снимка покрывает квадратную площадку со стороной 1.4 км. Всего было использовано 20 перекрывающихся снимков - 4 ряда по 5 снимков, которые были оцифрованы с разрешением 30 см на пиксель. DEM строилась при помощи программы PCI Geomatica OrthoEngine. При привязке снимков использовались: расположенный на острове пункт Государственной триангуляционной сети, семь точек, координаты которых были замерены GPS-приемником во время полевых работ, около 50 точек побережья, которые имеют известную высоту 456 м. Разрешение полученной модели составило 3 м на точку (для сравнения – цифровая модель рельефа SRTM, наиболее подробная из публично доступных, имеет разрешение 90 м на точку). В процессе обработки DEM в целях получения производных морфометрических данных были построены трехмерные изображения Ушканьих островов, профили поперечного сечения, вычислены углы наклона поверхности с помощью утилиты gdaldem из программного пакета GDAL. Известно, что уклоны поверхностей абразионных террас не превышают 15°, а для аккумулятивных террас уклоны обычно составляют не более 5°. Исходя из этого участки береговой зоны, лишенные характерной лестницы террасовидных поверхностей, мы условно отнесли к тектогенным уступам. Было установлено, что плоскости выявленных нами уступов проходят субпараллельно главным разломам, ограничивающим о. Бол. Ушканий с севера и с юга, причем если южный сбросовый уступ хорошо выражен в рельефе острова, то северный не настолько очевиден и состоит, по-видимому, из нескольких ступеней. Ранее в результате глубоководных изучений склонов Байкальской впадины, проведенных А.А. Бухаровым и В.А. Фиалковым [6], «...с северной стороны Бол. Ушканьего прослежена широтная зона разлома с уступом дна на глубине 450 м». И только с северной стороны острова в процессе глубоководных погружений, по данным А.А. Бухарова [5], были обнаружены три озерные террасы, а по нашим представлениям эти террасы могли быть сброшены ниже уровня воды в озере, поскольку они локализованы только на этом участке.

О существовании проходящего в широтном направлении южнее Ушканьих островов разлома писал в своей работе еще В.В. Ламакин [2], а, по дан-

ным А.А. Бухарова [5], это разлом очень молодого (постплиоценового?) возраста, так как «...плоскость его, прослеживающаяся от вершины острова до нижних двух байкальских террас, срезала все остальные террасы острова». Мы пришли к заключению, что А.А. Бухаров упустил из виду присутствующие здесь фрагменты террасовидных поверхностей на высоте 105-115 м, возраст которых, по нашим данным, не древнее 125 тыс. лет, что соответствует этапу стояния высокого уровня Байкала [7]. Известно, что проявления тыйской тектонической фазы (0.15-0.12 млн лет) выразились в формировании молодых тектогенных уступов и приращении высоты бортового уступа Байкальской впадины, тогда же, очевидно, имели место разрывы и смещения озерных отложений [7]. Неравномерное и фрагментарное распределение озерных террас в пределах такого компактного участка береговой зоны озера как о. Бол. Ушканий, несомненно, нужно связывать с проявлениями блоковой тектоники и образованием крутых сбросовых уступов на отдельных участках берегового склона острова.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Иркутской области (проект № 14–45–04163–р сибирь а).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Черский И.Д. Отчет о геологическом исследовании береговой полосы озера Байкал, произведенном по поручению Восточно-Сибирского отдела Русского географического общества // Зап. ВСО РГО. 1886. Т. 12. Ч. 1. 405 с.

2. Ламакин В.В. Ушканьи острова и проблема происхождения Байкала. М.: Географгиз, 1952. 189 с.

3. Ескин А.С., Пальшин Г.Б., Гречищев Е.К., Галазий Г.И. Геология и некоторые вопросы неотектоники Ушканьих островов на Байкале // Мат-лы по геологии Вост. Сибири / Отв. ред. Н.А. Логачев. Иркутск: ВСФ АН СССР, 1959. Вып. 2. С. 129–152.

4. Кононов Е.Е. Высокие террасы озера Байкал // Геология и геофизика. 1993. № 3. С. 201–208.

5. Бухаров А.А. Кайнозойское развитие Байкала по результатам глубоководных и сейсмостратиграфических исследований // Геология и геофизика. 1996. Т. 37, № 12. С. 98–107.

6. Бухаров А.А., Фиалков В.А. Новые данные о геологическом строении и неотектонике Байкальской впадины по данным глубоководных исследований // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 11. С. 69–76.

7. Mats V.D., Yefimova I.M. Paleogeographic scenario of the Late Cretaceous – Cenozoic for the central part of the Baikal region // Geodynamics & Tectonophysics. 2011. V. 2, № 2. P. 175–193.

## FEATURES OF FORMATION MECHANISM OF THE BAIKAL TERRACES IDENTIFIED IN THE STUDY OF THE TERRACE COMPLEX ON THE USHKAN ISLANDS

#### I.M. Yefimova, F.L. Zuev

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Special detail geological-geomorphological studies have been made to determine the quantity, hypsometric position, age and genesis of the terraces of the Ushkany Islands and the contribution of differentiated neotectonic movements and variations of Lake Baikal level to terrace formation process. The geological-geomorphological studies have been conducted with the performance of GPS-leveling profiles and penetration and sampling of the deposits overlying the terrace-like surfaces. Using the GPS-leveling data as a base, series of profiles reflecting the topography of terrace surfaces have been performed that made it possible to improve their hypsometry, plot a coverage diagram for the terraces, most detailed thus far, and construct a digital elevation model for the Ushkany Islands. New data on the Neopleistocene-Holocene geodynamic activity of some parts of the Baikal shore have been obtained from the results of correlation between the heights for the island terraces and the mainland river terrace staircases.

Keywords: Baikal, change of lake level, lake terrace, height value, genesis, paleogeography, neotectonics

\*\*\*

## УДК 551.3.051+550.93

## U-РЬ ДАТИРОВАНИЕ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ ИЗ ОСАДКОВ ОЗЕРА БАЙКАЛ И ЕГО ОКРУЖЕНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОИСКА ПАЛЕОЦУНАМИ

А.В. Иванов, Е.И. Демонтерова, С.Г. Аржанников, А.В. Аржанникова

## Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Оз. Байкал расположено непосредственно на границе между двумя крупными блоками земной коры, имеющими различную геологическую историю, а соответственно и возраст. Восточный берег озера сложен исключительно палеозойскими и мезозойскими породами, тогда как на западном берегу обнажаются преимущественно докембрийские породы. Такое различие геологического строения берегов позволяет определять, с какого берега в озеро поступал осадочный материал, посредством U-Pb датирования цирконов. Нами рассматривается, как этот инструмент может быть использован для выявления палеоцунами, связанных со сходом в озеро оползневых и обвальных масс. Ключевые слова: U-Pb датирование, циркон, Байкал, катастрофа, цунами

Оз. Байкал расположено непосредственно на границе между двумя крупными блоками земной коры, имеющими различную геологическую историю, а соответственно и возраст. Восточный берег озера сложен исключительно палеозойскими и мезозойскими породами, тогда как на западном берегу обнажаются преимущественно докембрийские породы. Такое различие геологического строения берегов дает принципиальную возможность для определения, с какого берега поступал осадочный материал в озеро посредством оценки возраста кристаллизации детритовых минералов из осадков. Наиболее подходящим минералом для этого является циркон. Во-первых, он устойчив к выветриванию и сохраняет в себе информацию о U-Pb возрасте материнских магматических или метаморфических пород. Во-вторых, он может быть датирован с использованием лазерной абляции, соединенной с массспектрометром с индуктивно-связанной плазмой (ЛА-ИСПМС), что является экспрессным и относительно недорогим методом анализа.

Несмотря на то, что до сих пор никто не проводил анализ распределения значений возраста цирконов, отобранных непосредственно из осадочной толщи подводной части оз. Байкал, очевидно, что, например, в Центральном Байкале должны преобладать цирконы, приносимые р. Селенгой. Именно Селенга дает основной вклад осадочного материала в эту часть Байкала. На рис. 1 (вверху) приведено распределение U-Pb датировок детритовых цирконов из устья Селенги, полученных методом ЛА-ИСПМС [1]. Ожидаемо, в спектре датировок преобладают значения возраста, характерные для Забайкалья, а именно - пики на 140, 190, 245, 290, 410 и 500 млн лет. На рис. 1 (внизу) показаны спектры распределения U-Pb датировок детритовых цирконов, отобранных из позднедокембрийских осадочных отложений западного берега Байкала [2]. Ожидаемо, в их спектре преобладают цирконы с палеопротерозой-архейскими и рифейскими возрастами, а именно - главные пики на 720, 900, 1800-1900 млн лет и множество мелких пиков вплоть до 3250 млн лет. Рис. 1 наглядно показывает контрастность геологического строения западного и восточного берега озера.



Рис. 1. Распределение возрастов детритовых цирконов, поступающих в оз. Байкал с восточного и западного берега (верхний и нижний рисунок, соответственно) по данным ЛА-ИСПМС [1, 2]. На графике посредине приведены данные для цирконов из юрских конгломератов [4]. Стрелками отмечены основные характерные пики с указанием их возраста в млн лет.

Изучая так называемый Пра-Манзурский аллювий, мы обнаружили [1], что более 90 % цирконов из этих отложений по возрасту соответствуют цирконам восточного, т.е. противоположного, берега Байкала (рис. 2). Такое распределение возрастов цирконов не может быть в принципе объяснено эволюционным развитием реки Пра-Манзурка. Имея свой водосборный бассейн в пределах докембрийских пород в верхнем течении Пра-Манзурки, где были отобраны пробы для анализа, при нормальном развитии реки цирконы просто обязаны показывать преимущественно докембрийский возраст. Даже допуская, что Пра-Манзурка - это древняя река, древнее озерной линзы Байкала, и является продолжением Селенги, все равно при эволюционном развитии реки, среди цирконов преобладали бы докембрийские зерна. Н.А. Логачевым и др. [3] в палеоманзурских отложениях отмечались забайкальские гальки. Для объяснения данного факта делалось предположение, что эти отложения сформировались при перемыве юрских конгломератов, залегающих на платформе. Однако распределение U-Pb датировок по цирконам из праманзурских отложений нельзя объяснить только перемывом юрских конгломератов по ряду причин (данные по юрским конгломератам из [4]). Во-первых, среди праманзурских цирконов есть меловой пик на 140 млн лет (рис. 2), которого по очевидным причинам нет в юрских конгломератах (рис. 1, в середине). Во-вторых, в праманзурских цирконах соотношение палеозойских и мезозойских пиков отличается от таковых в юрских конгломератах. В-третьих, в юрских конгломератах достаточно хорошо выражены пики докембрийских цирконов, которые крайне редки в праманзурских отложениях. Таким образом, чтобы объяснить фактическое распределение датировок цирконов из праманзурских отложений, не остается иного пути, как искать следы аномальных катастрофических процессов.

Нами была сформулирована гипотеза [1, 5], что значительная часть праманзурских отложений на самом деле не является речным аллювием, а представлена крупными массивами отложений катастрофического потока, вызванного заплеском на западный берег волны мегацунами. Такое мегацунами могло сформироваться только при сходе в озеро гигантского оползня, следы которого видны на дне Байкала в районе устья Голоустной. Ранее аномальный рельеф на дне Байкала в этом месте интерпретировался в качестве древней дельты р. Голоустной [6].

Время оползневого события и связанного с ним мегацунами остается ключевым нерешенным вопросом. Нами за основу взяты данные термолюминесцентного датирования праманзурских песков [7], которые после корректной статистической обработки указывают на возраст 117±28 тыс. лет [1]. Анализ

осадочных отложений в дельте Селенги, по данным сейсмического профилирования, говорит о том, что в это время уровень Байкала был на 200 м выше современного [8]. Максимальные высоты, на которых залегают палеоманзурские отложения на вершинах Прибайкальского хребта, составляют 820 м [9]. Таким образом, разница между палеоуровнем озера (~450+200 м) и максимально высоким залеганием праманзурских отложений, при средней мощности последних в 20 м (~820+20 м), составляет примерно 190 м. Это минимальная оценка требуемой высоты волны мегацунами. Учитывая размеры предполагаемого оползня [1] и имеющиеся экспериментальные зависимости по моделированию оползневых цунами [10], максимально возможная волна мегацунами в месте схода оползня оценивается в 240 м. Иными словами, модельные оценки «по порядку величин» согласуются с геологическими данными.



Рис. 2. Распределение возрастов детритовых цирконов среди палеоманзурских отложений западного берега оз. Байкал [1]. Сплошные стрелки указывают на пики «аномальных цирконов», совпадающих с селенгинскими цирконами, доля которых в общей выборке превышает 90 %. Важно, что среди этих пиков есть меловой (140 млн лет) и что соотношения пиков близки к таковым из дельты Селенги. Пунктирные стрелки показывают на редкие пики цирконов из местных источников сноса.

Пример исследования детритовых цирконов из праманзурских отложений наглядно показывает способ поиска катастрофических заплесков, вызванных цунами при сходе оползней в озеро, а также при сходе подводных оползней. Цирконы с аномальным возрастом (палеозойские и мезозойские для западного берега и раннепротерозойские для восточного) среди осадочных отложений могут являться маркерами таких катастрофических событий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–05–00183).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ivanov A.V., Demonterova E.I., Reznitskii L.Z., Barash I.G., Arzhannikov S.G., Arzhannikova A.V., Hung C.-H., Chung S.-L., Iizuka Y. Catastrophic outburst and tsunami flooding of Lake Baikal: U-Pb detrital zircon provenance study of the Palaeo-Manzurka megaflood sediments // International Geology Review. 2015. doi:10.1080/00206814.2015.1064329.

2. Гладкочуб Д.П., Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Донская Т.В., Писаревский С.А., Николь Г., Мотова З.Л., Корнилова Т.А. Ранние этапы развития Палеоазиатского океана: данные по LA-ICP-MS датированию детритовых цир-

конов из позднедокембрийских толщ южного фланга Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 10. С. 1472–1490.

3. Логачев Н.А., Антощенко-Оленев Н.А., Базаров Д.Б., Галкин В.Л., Голдырев Г.С., Ендрихинский А.С., Золотарев Г.Г., Сизиков А.И., Уфимцев Г.Ф. Нагорья Прибайкалья и Забайкалья. М.: Наука, 1974. 360 с.

4. Демонтерова Е.И., Иванов А.В., Михеева Е.А., Аржанникова А.В., Фролов А.О., Аржанников С.Г., Брянский Н.В., Павлова Л.А., Резницкий Л.З., Зарубина О.В. Источники и палеогеографические условия формирования юрских континентальных осадков на юге Сибирской платформы (по Sm-Nd и U-Pb данным) // Доклады Академии наук. 2016. (В печати).

5. Ivanov A.V., Arzhannikov S.G., Demonterova E.I., Arzhannikova A.V. Reply to V.D. Mats's 'Comment on Ivanov, A.V., Demonterova, E.I., Reznitskii, L.Z., Barash, I.G., Arzhannikov, S.G., Arzhannikova, A.V., Hung, C.-H., Chung, S.-L., and Iizuka, Y. Catastrophic outburst and tsunami flooding of Lake Baikal: U–Pb detrital zircon provenance study of the Palaeo-Manzurka megaflood sediments // International Geology Review. 2016. V. 58. doi:10.1080/00206814.2016.1147388.

6. Хлыстов О.М., Нишио Ш., Манаков А.Ю., Сугияма Х., Хабуев А.В., Белоусов О.В., Грачев М.А. Опыт картирования кровли приповерхностных газовых гидратов озера Байкал и извлечение газа из них // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 9. С. 1415–1425.

7. Трофимов А.Г., Малаева Е.М., Куликов О.А., Попова С.М., Кулагина Н.В., Шибанова И. В., Уфимцев Г.Ф. Манзурский аллювий (материалы по геологии и палеогеграфии). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 1995. 50 с.

8. Romashkin P.A., Williams D.F. Sedimentation history of the Selenga Delta, Lake Baikal: simulation and interpretation // Journal of Paleolimnology. 1997. V. 18. P. 181–188.

9. Кононов Е.Е. Байкал. Аспекты палеогеографической истории. Иркутск: ИрГТУ, 2005. 128 с.

10. Heller V., Hager W.H. A universal parameter to predict subaerial landslide tsunamis? // Journal of Marine Science and Engineering. 2014. V. 2. P. 400–412.

# U-Pb DATING OF DETRITAL ZIRCONS FROM SEDIMENTS OF LAKE BAIKAL AND ITS ADJACENT AREA AS A TOOL FOR THE SEARCH OF A PALEOTSUNAMI RECORD

A.V. Ivanov, E.I. Demonterova, S.G. Arzhannikov, A.V. Arzhannikova

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Lake Baikal is located between two large blocks of the Earth's crust, which have different geologic history and, therefore, different age. The eastern lakeshore is composed entirely of the Paleozoic and Mesozoic rocks, whereas Precambrian rocks crop out predominantly at the western lakeshore. Such difference in the geologic structure of the shores allows determining wherefrom sedimentary material entered the lake by using the U-Pb detrital zircon dating. We consider the way this tool can be used to search for record of paleotsunami associated with landsliding and rock collapsing into the lake. *Keywords:* U-Pb dating, zircon, Baikal, catastrophes, tsunami

\*\*\*

УДК 551.4.042(517.3+571.5)

## ОПАСНЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МОНГОЛО-СИБИРСКОГО РЕГИОНА (ФАКТОРЫ, ОЦЕНКА, КОНТРОЛЬ)

Е.А. Козырева<sup>1</sup>, О.А. Мазаева<sup>1</sup>, А.А. Рыбченко<sup>1</sup>, К. Баярсайхан<sup>2</sup>, С. Дэмбэрэл<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт Астрономии и Геофизики АНМ, Улан-Батор, Монголия

Аннотация. Проведена идентификация опасных экзогенных геологических процессов, и разработана концепция обеспечения экзогеодинамической безопасности Монголо-Сибирского региона. С применением различных методов инженерной геологии (системного подхода, инженерно-геологического районирования, наблюдений на ключевых участках) и геоморфологии (метод Хортона, бассейновый подход) выполнена оценка опасных экзогенных геологических процессов. получены результаты геодинамического мониторинга процессов, построены карты. Получены данные по динамике развития абразионных, карстово-эрозионных, эрозионных процессов. Мониторинг береговых процессов Ангарского каскада ГЭС выполняется на шести участках Иркутского водохранилища и четырех участках в южной части Братского водохранилища. На Братском водохранилище сочетание эрозионного и карстового процессов определило экстремальные величины роста карстово-эрозионного оврага. Объем оврага за период с 2004 по 2008 г. увеличился в 2.4 раза, ширина по верху достигла 15-19 м, глубина увеличилась до 8.5 м. На территории Улан-Баторской агломерации (11 ключевых участков) происходит линейный прирост оврагов. Линейное приращение большинства оврагов составило от 0.03 м до 0.29 м, максимальный рост протяженности двух оврагов – 0.89–0.92 м. За 2012–2013 гг. в большинстве оврагов наблюдалось преобладание боковой эрозии над глубинной, сопровождающейся незначительным расширением оврагов (до 0.5 м) и аккумуляцией делювиально-пролювиальных отложений в тальвеге. В период 2013-2015 гг. у большинства оврагов наблюдалось увеличение площади поперечных створов. Динамика роста составила от 0.21 до 2.53 м<sup>2</sup>. Максимальные приращения площади створов зафиксированы в оврагах, расположенных на ключевых участках с большей водосборной площадью и глубиной расчленения элементарных водосборов. Анализ климатического фактора показал, что период 2013-2015 гг. характеризовался большим количеством ливневых дождей в сравнении с периодом 2012-2013 гг. Показатели динамики развития современных групп экзогенных геологических процессов в разных областях Монголо-Сибирского региона отличаются площадями пораженности территории процессами, активностью и интенсивностью проявления, повторяемостью и нуждаются в постоянном мониторинге.

Ключевые слова: Монголо-Сибирский регион, опасный экзогенный геологический процесс, мониторинг, абразия, эрозия

Территория Монголо-Сибирского региона по совокупности природных (климатических, геологосейсмических, геоморфологических и др.) условий имеет высокий потенциал к развитию опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП). Исследуемый регион характеризуется развитием комплекса геологических процессов эндогенного и экзогенного генезиса. В основе оценки опасных геологических процессов лежит концепция системного подхода к изучению всех компонентов геологической среды, с учетом взаимодействия эндогенной и экзогенной энергии формирования современного рельефа. Для Монголо-Сибирского региона такую концепцию впервые использовал Н.А. Флоренсов в своих работах. После комплексного анализа последствий сильнейшего Гоби-Алтайского землетрясения Н.А. Флоренсов показал соотношение эндогенной (морфоструктурной) и экзогенной (денудационной) составляющих в истории развития рельефа региона. Два взаимосвязанных литодинамических потока, действующих в литосфере и на ее поверхности, образуют единый круговорот вещества земной коры [1]. В формировании современного облика земной поверхности участвуют внутренние силы Земли и внешняя энергия, на которую накладывается всевозрастающий антропогенный фактор. Динамика экзогенных процессов, формы их проявления отражают результат взаимодействия всех видов энергий. Геологический процесс - это последовательная смена состояний объекта во времени. При изучении геологической среды важным является учет всех процессообразующих факторов и получение достоверной информации о динамике современных процессов посредством мониторинга геологической среды. Выявление закономерностей развития экзогенных процессов, установление современной динамики развития процессов являются актуальной научнотеоретической задачей, позволяющей решать проблемы обеспечения геоэкологической безопасности регионов.

В основу научно-исследовательских работ положена концепция системного подхода. Системный подход является одним из этапов развития современной теории и методологии общетеоретических исследований [2–6].

Мониторинг развития экзогенных геологических процессов проводится на территории юга Восточной Сибири и в пределах Улан-Баторской агломерации на территории Монголии. Существует мониторинговая сеть со специально оборудованными наблюдательными площадками, в пределах которой ведутся регулярные морфометрические измерения или постоянная запись количественных данных на электронные носители. Для каждого процесса фиксируется группа оптимально информативных параметров, которые дают представление об активности и интенсивности (динамике) процессов в современных природно-техногенных и климатических условиях. Экзогеодинамический мониторинг является сложной и многоуровневой системой, которая включает соподчиненные ступенчатые (иерархические) исследования и наблюдения, дальнейший анализ данных с применением различных статистиченный геологический процесс, мониторинг, абразия, эрозия ских и математических методов обработки информации, построения пространственных и временных прогнозов.

В работе по оценке опасных экзогенных геологических процессов применяется сочетание методов инженерной геологии [4, 7–15], геокриологических [16, 17], климатологических [18, 19]. В работе широко используются аналитические методики [20], специальные программные комплексы для анализа и обработки полученных данных, построения электронных карт, моделей, схем.

Опасные геологические процессы и их идентификация. Опасный природный процесс (dangerous natural process) - любые изменения состояния породных, водных, воздушных биотических или смешанных образований природы, обусловленные естественными земными или космическими причинами, которые могут привести к негативным для человека, объектов хозяйства или окружающей среды (живой природы) последствиям [21]. В практике научноприкладных работ по обеспечению безопасности жизнедеятельности человека традиционно больше внимания уделяется вопросам сейсмобезопасности регионов. Однако помимо сейсмичности присутствует большая группа экзогенных геологических опасностей, развитие и экстремальное проявление которых (экзогенных геологических процессов) (ЭГП) существенно осложняет условия освоения территорий, является причиной возникновения социально-экономического ущерба.

Территория Монголо-Сибирского региона подвержена развитию всех групп экзогенных процессов: связанных с воздействием комплекса климатических факторов (выветривание); группы гравитационных процессов (оползни, обвалы, сели); процессов, вызванных деятельностью поверхностных и подземных вод. На территории распространены криогенные процессы и явления, связанные с распространением многолетнемерзлых грунтов и глубокого сезонного промерзания.

Для региональных исследований в Монголо-Сибирском регионе идентификация опасных экзогенных процессов (ОЭГП) имеет стратегический характер. Под идентификацией опасных геологиче-ЭГП нами понимаются инженерноских геологические исследования, направленные на установление условий и причин возникновения, выявление количественных параметров динамики, пространственно-временных координат и вероятности проявления ОЭГП с максимальными для региона величинами, способными значительно преобразовывать геологическую среду в сравнении с другими региональными экзогенными процессами (процесс распознавания опасности). Распознавание опасности от проявления того или иного процесса является основой для дальнейшего проведения оперативных мероприятий, направленных на обеспечение безопасности и устойчивости в развитии геологического пространства и повышение качества жизни населения в целом.

Регионально-опасные экзогенные процессы территориально изменчивы. Для горных районов юга Восточной Сибири опасными являются селевые

процессы, для платформенной области – техногенные оползни и карст зоны влияния Братского водохранилища. На территории Улан-Баторской агломерации наиболее опасными являются процессы, связанные с поверхностными водотоками – водокаменные и грязекаменные потоки.

Оценка потенциальной эрозионной опасности для территории Улан-Баторской агломерации выполнена с использованием бассейнового подхода. Систематизация водосборных бассейнов проведена с применением метода Хортона [22]. Местным базисом эрозии для водосборных бассейнов является р. Туул. На основе инженерно-геологического районирования и морфометрического анализа элементарных водосборных бассейнов организовано 11 ключевых участков для мониторинга динамики формирования оврагов.

Водосборные бассейны, входящие составными частями в анализируемый Улан-Баторский бассейн, являясь его сегментами, рассматриваются как система речных бассейнов определенных порядков, участвующих в формировании современного рельефа, включая развитие экзогенных процессов. На площади бассейнов «в результате выветривания и мобилизации вещества, склоновых и флювиальных процессов одновременно формируется рельеф и рыхлые отложения. Сток воды создает специфические формы рельефа, широко распространенные на континентах планеты. Собственно говоря, почти вся суша в геоморфологическом плане представляет собой совокупность (макросистему) бассейнов» [23]. По системе Хортона определен порядок временных водотоков с анализом ее структуры. Анализируются водосборные бассейны, примыкающие к основному водотоку - реке Туул - устьевыми частями. Считаются водосборы первого порядка, имеющие один водоток, выходящий устьем к реке. Второй появляется вследствие слияния двух водотоков первого порядка. Третий появляется в результате слияния двух водотоков второго порядка и так далее.

В результате статистической обработки выявлено следующее.

Водосборных бассейнов первого порядка 136 сегментов. Их площади колеблются от 0.115 до 1.8, в среднем это значение 0.45 км<sup>2</sup>, всего они занимают площадь в 61.387 км<sup>2</sup>. Длина водотока в среднем 0.94 (максимум 2.658, минимум 0.256) с уклонами поверхности от 2 до 21°.

Водосборов второго порядка 75. Общая их площадь 128.911 км<sup>2</sup>, средняя величина 1.72 км<sup>2</sup> (минимум 0.197, максимум 23.627 км<sup>2</sup>). Длина водотоков от 0.638 до 27.423 км. Уклоны поверхности от 4 до 19.96°.

Третьего порядка водосборные бассейны (47) занимают площадь в 312.849 км<sup>2</sup>. Площадь водосборов изменяется от 1.105 до 30.122 км<sup>2</sup>. Длина водотоков варьируется в пределах от 3.424 до 49.083 км. Уклоны в среднем  $10.7^{\circ}$  (от 2.54 до 16.21°).

Водосборов четвертого порядка всего 11 сегментов. Они покрывают площадь в 513.502 км<sup>2</sup>, максимум – 197.664, минимум – 16.025. Длина водотоков от 50.117 до 441.19 км. Уклоны поверхности в среднем 7.52° (от 3.87 до 12°). Площади водосборов пятого порядка, примыкающие к местному базису эрозии, составляют 1990.109 км<sup>2</sup>, сумма 11 сегментов. Средняя площадь водосборной поверхности пятого класса составляет 180.92 км<sup>2</sup>. Длина речной сети разветвленных водотоков достигает среднего значения в 399.67 км, минимально от 167.963 км до наибольшей протяженности в 701.857 км. Уклоны от 4.6 до 13.27°.

Статистическая обработка геоморфологических данных водосборных бассейнов и их группировка предоставляют возможность описания количественных параметров условий формирования водотоков. В целях оценки геоэкологической опасности при анализе водосборных бассейнов к данным о группировке водотоков по порядкам дополняется информация по геолого-литологическим особенностям каждого водосбора данными мониторинга по динамике и активности экзогенных геологических процессов.

Динамика экзогенных геологических процессов. Показатели динамики развития современных групп экзогенных геологических процессов в разных областях Монголо-Сибирского региона отличаются площадями пораженности территории процессами, активностью и интенсивностью проявления, повторяемостью и другими параметрами.

Мониторинг береговых процессов Ангарского каскада ГЭС относится к мониторингу регионального, локального и детального уровней. Изучение режима ЭГП выполняется на шести участках Иркутского водохранилища и четырех участках в южной части Братского водохранилища. Действующая система мониторинга включает площадки наблюдений за абразионными, эрозионными, карстовыми процессами.

Результаты мониторинга берегов Иркутского водохранилища показывают, что наибольшая динамика переработки береговой линии отмечается на участках, сложенных лессовидными суглинками. Так, в 2015 году на участке «Патроны 1» по результатам наблюдений максимальная величина размыва составила 1.47 м.

В меньшей степени подвержены размыву берега, сложенные литифицированными отложениями. Например, на участке «Тальцы», где береговой склон сложен сцементированными песчаносуглинисто-галечными отложениями, за последнее время не отмечается отступания береговой линии [24].

Мониторинг на Братском водохранилище проводится в пределах южной акватории водоема. Береговая линия водоема формируется в различных инженерно-геологических условиях. На формирование берегов влияют такие процессы, как абразия, эрозия, оползни и карст. Анализ взаимосвязи динамики ЭГП и различных механизмов их развития в береговой зоне показал, что наибольший прирост их объема происходит при сочетании карстовых и эрозионных процессов. На участке Хадахан (залив Шалоты) была выявлена наибольшая динамика роста оврага, образовавшегося в результате сочетания карстового и эрозионного процессов. История его развития началась с образования в 1976 г. карстового провала на автодороге Хадахан – Закулей, который соединился с расположенным ниже по склону оврагом. Сочетание процессов определило экстремальные величины прироста этого карстовоэрозионного оврага. Объем оврага за период с 2004 по 2008 г. увеличился в 2.4 раза, ширина по верху достигла 15–19 м, глубина увеличилась до 8.5 м.

В настоящее время эрозионно-карстовая форма выработала всю длину склона и остается неизменной по протяженности, меняется только ее объем (в результате врезания днища и разрушения бортов). Фактором активизации карстово-эрозионной формы, наряду с количеством осадков, являются колебания уровня водоема. Тесная взаимосвязь уровня подземных вод с уровнем водохранилища определяет выщелачивание сульфатно-карбонатных пород и активизацию карста в зоне подпора береговой зоны водоема.

На территории Улан-Баторской агломерации мониторинговая сеть создана вследствие российскомонгольского сотрудничества и в результате комплексных научно-исследовательских работ на территориях городов. С учетом первичного ранжирования водосборных бассейнов мониторинг эрозионного процесса показал, что происходит линейный прирост оврагов в пределах локальных участков. Линейное приращение вершин большинства оврагов не превысило 1 м и составило от 0.03 до 0.29 м. Максимальные приращения протяженности зафиксированы в двух оврагах и составили 0.89–0.92 м.

Положительная динамика (одновременное углубление и расширение оврага, линейный рост вершины) была зафиксирована в оврагах участка Налайх, развивающихся в пределах водосборов с более высокими абсолютными отметками водоразделов (область средневысотных гор), имеющих большую глубину расчленения (115 м) и площадь водосбора.

Анализ изменения поперечных профилей показал, что на большинстве оврагов происходит расширение оврагов за счет обвалов грунта, формирования нависающих карнизов. Величина бокового приращения оврагов варьируется от 0.03 до 0.46 м. Расширение бортов оврагов сопровождается уменьшением глубины оврага. Так, например, расширение бортов оврага на 0.22 и 0.46 м, зафиксированное в поперечном профиле, привело к уменьшению глубины оврага на 0.7 м. В среднем уменьшение глубины оврагов в поперечных створах составило 0.03– 0.24 м. На отдельных поперечных профилях в основании бортов оврага зафиксирован боковой размыв, то есть наблюдается активная боковая эрозия.

Таким образом, за период 2012–2013 гг. в большинстве оврагов наблюдалось преобладание боковой эрозии над глубинной, сопровождающееся незначительным (до 0.46 м) расширением оврагов и аккумуляцией делювиально-пролювиальных отложений в днище. В водосборных бассейнах с большей глубиной расчленения, площадью водосбора преобладала глубинная эрозия, что отразилось в положительной динамике роста ширины, глубины и протяженности оврага.

В период 2013–2015 гг. у большинства обследуемых оврагов наблюдалось постоянное увеличение площади поперечных створов. Динамика роста составила от 0.21 до 2.53 м<sup>2</sup>. Максимальные приращения площади створов зафиксированы в оврагах, расположенных на ключевых участках с большей водосборной площадью и глубиной расчленения элементарных водосборов. Анализ климатического фактора показал, что период 2013–2015 гг. характеризовался большим количеством ливневых дождей в сравнении с периодом 2012–2013 гг.

Концепция обеспечения экзогеодинамической безопасности на региональном уровне. Принятие технических решений по обеспечению экзогеодинамической безопасности территорий без научного обоснования и анализа особенностей развития опасных геологических процессов может оказаться малоэффективным и финансово-затратным мероприятием.

Повторяемость катастрофических селей Северного Прибайкалья составляет раз в 100 лет [25]. Сели малой, средней и большой мощности происходят гораздо чаще, чем разрушительные катастрофические сели большой транспортирующей силы. Наибольший социально-экономический ущерб фиксируется в периоды массового селеформирования, вызванного атмосферными осадками при проникновении на территорию крупных циклонов. Затяжные дожди и ливни формируют крупные водные потоки на локально ограниченных территориях с сопредельными речными долинами. При таком сценарии может отмечаться до десятка единовременных выбросов селевых и водных потоков. Совокупная разрушительная сила их значительна. Так, летом 2014 г. произошел сход семи селевых потоков в районе п. Аршан в предгорье Тункинских гольцов [26]. Погиб один человек, были пострадавшие, разрушено большое количество зданий и хозяйственных объектов. Данное геологическое событие вызвало введение чрезвычайной ситуации на территории Тункинского района и принятие экстренных мер по эвакуации части населения из зоны разрушения и затопления.

Таким образом, последовательное выполнение определенных этапов научно-исследовательских и научно-технических работ позволило получить комплекс количественного и качественного материала, способный повысить геоэкологическую безопасность территорий на разных уровнях детализации и фиксировать параметры состояния геологической среды в области оценки развития опасных геологических процессов.

Совокупность последовательных действий по изучению и контролю состояния геологической среды, исследования, охарактеризованные в данной научно-исследовательской работе, представляют собой концепцию обеспечения геоэкологической безопасности территорий. Последовательность реализации отдельных блоков концепции безопасности состоит из идентификации экзогеодинамической опасности, организации и проведения мониторинговых работ, оценки геоэкологической безопасности в части развития опасных экзогенных геологических процессов, разработки рекомендаций по дальнейшему использованию и детализации информации.

Для научно обоснованного градостроительного планирования следует выполнять специализированные инженерно-геологические детальные изыскания и прогнозные расчеты вариантов развития опасных геологических процессов в каждом исследуемом районе. Полученная разноуровенная и детализированная информация о состоянии геологической среды в результате мониторинга является основой для принятия проектных решений, выбора конкретных технических мероприятий по селезащите, селеотведению, инженерно-технической организации защитных сооружений.

Выводы. В пределах Монголо-Сибирского региона организована и поддерживается в рабочем состоянии мониторинговая сеть по наблюдению за динамикой развития опасных экзогенных геологических процессов. 2. Для каждого района исследований необходим анализ и контроль состояния геологической среды, идентификации опасности от развития экзогенных геологических процессов. Регионально-опасные экзогенные процессы территориально изменчивы. 3. В результате мониторинга получены количественные данные по динамике развития отдельных экзогенных процессов: абразионные, карстово-эрозионные, эрозионные. 4. Для территории Улан-Баторской агломерации с использованием бассейнового подхода выделено пять классов водосборных бассейнов, что дало основания для количественного описания условий формирования водных потоков и применения статистической обработки данных.

5. Предложена концепция обеспечения геоэкологической безопасности территорий, включающая совокупность выполнения определенных блоков работ, направленных на идентификацию экзогеодинамической опасности, организацию и проведение мониторинговых работ, оценку геоэкологической безопасности в отношении развития опасных экзогенных геологических процессов, разработку рекомендаций по дальнейшему использованию и детализации информации.

Результаты по анализу физико-механических свойств грунтов получены с использованием материально-технической базы ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–55–44031–Монг а).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гоби-Алтайское землетрясение / Ред. Н.А. Флоренсов, В.П. Солоненко. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 391 с.

2. Шеко А.И., Максимов М.М., Лехатинов А.М. Методика составления карт интенсивности развития и прогноза экзогенных геологических процессов в горно-складчатых областях // Проблемы инженерно-геологического картирования. М.: Изд-во МГУ, 1975. С. 252–262.

3. Литвин В.М. Опыт региональной оценки интенсивности проявления экзогенных геологических процессов на юге Восточной Сибири // Инженерная геология. 1991. № 6. С. 72–81.

4. Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика. СПб.: Наука, 2001. 416 с.

5. Королев В.А. Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем: Учебное пособие / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: КДУ, 2007. 416 с.

6. Трофимов В.Т., Королев В.А. Место инженерной защиты территорий, зданий и сооружений в системе экологической безопасности // Инженерные изыскания. 2011. № 7. С. 28–31.

7. Королев В.А. Мониторинг геологической среды. М.: Изд-во МГУ, 1995. 272 с.

8. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов: общая и прикладная: Учебное пособие для инженерностроительных вузов. Либроком, 1973. 288 с.

9. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л., 1977. 479 с.

10. Сергеев Е.М. Инженерная геология. М.: Изд-во МГУ, 1978. 384 с.

11. Бондарик Г.К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М:. Недра, 1981. 256 с.

12. Золотарев Г.С. Методика инженерно-геологических исследований: Учебное пособие. М.: МГУ, 1990. 384 с.

13. Опасные экзогенные процессы / В.И. Осипов и др. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.

14. Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г. Экологическая геология: Учебник. М.: «Геоинформатика», 2002. 415 с.

15. Экологические функции литосферы / В.Т. Трофимов, Д.Г. Зилинг, Т.А. Барабошкина и др. М.: Изд-во МГУ, 2000. 432 с.

16. Ершов Э.Д. Криолитогенез. М:. Недра, 1982. 558 с.

17. Ершов Э.Д. Общая геокриология. М.: Изд-во МГУ, 2002. 682 с.

18. Величко А.А. Основные особенности реликтовой криогенной морфоскульптуры и общие принципы ее картирования // Палеокриология в четвертичной стратиграфии и палеогеографии. М.: Наука, 1973. С. 121–134.

19. Будыко М.И. Климат в прошлом и будущем. М.: Гидрометеоиздат, 1980. 352 с.

20. Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2010. 287 с.

21. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / Под редакцией А.Л. Рагозина. М:. Издательская фирма «Крук», 2003. 320 с.

22. Козырева Е.А., Мазаева О.А., Рыбченко А.А., Дэмберэл С. Опасные геологические процессы (условия, идентификация) и обеспечение геоэкологической безопасности Улан-Баторского бассейна // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Выпуск 8. Труды Х Российско-Монгольской конференции по проблемам астрономии и геофизики «Солнечно-земная физика и сейсмогеодинамика Байкало-Монгольского региона», Иркутск: Институт земной коры СО РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН, 2015. С. 139–150.

23. Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. 163 с.

24. Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Тарасова Ю.С., Жентала М., Ягус А. Трансформации береговых зон водохранилищ в ходе эксплуатационного периода (Южное Приангарье, Верхнесилезский регион) // Вестник ИрГТУ. 2012. № 3. С. 42–50.

25. Лехатинов А.М. Экзогенные геологические процессы и их прогноз (зона БАМ и сопредельные территории): Автореф. дис. ... доктора геол.-мин.наук. Москва – Иркутск, 2004. 75 с.

26. Kadetova A.V., Rybchenko A.A., Kozireva E.A., Pellinen V.A. Debris flows of 28 June 2014 near the Arshan village (Siberia, Republic of Buryatia, Russia) // Landslides. 2016. V. 13, Is. 1. P. 129–140.

## DANGEROUS EXOGENOUS GEOLOGICAL PROCESSES OF MONGOLIAN-SIBERIAN REGION (FACTORS, EVALUATION, CONTROL)

E.A. Kozyreva<sup>1</sup>, O.A. Mazaeva<sup>1</sup>, A.A. Rybchenko<sup>1</sup>, C. Bayarsaikhan<sup>2</sup>, S. Demberel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia <sup>2</sup> Institute of Astronomy and Geophysics, the Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

Abstract. Hazardous exogenous geological processes have been identified, and the concept of providing exogeodynamic safety for the Mongolian-Siberian region has been developed. Dangerous exogenous geological processes have been estimated using different engineering geology (systems approach, engineering-geological zoning, key-site monitoring) and geomorphology (Horton technique, basin approach) methods, with the geodynamic monitoring results obtained and maps drawn. The data has been obtained for dynamics of abrasion, karst erosion and erosion processes. Monitoring of coastal processes of the Angara HPP cascade is performed at 6 sites of the Irkutsk reservoir and 4 stations in the southern part of the Bratsk Reservoir. Bratsk-Reservoirrelevant combination of erosion and karst processes predetermined extremely high karst-erosion gully formation rates. The gully grew 2.4 times during 2004–2008, being 15-19 m wide at its top and 8.5 m deep. The Ulaanbaatar agglomeration area (11 key points) is characterized by the linear extension of gullies ranging from 0.03 to 0.29 m as a whole and attaining its maximum of 0,89-0,92 m for the two of them. During 2012-2013, most of the gullies showed the dominance of lateral erosion over vertical erosion associated with some extension of gullies (up to 0.5 m) and accumulation of deluvial-proluvial deposits in the thalweg. During 2013-2015, most of the gullies exhibited an increase in the transverse cross-sectional area. The dynamics of growth ranged from 0.21 m<sup>2</sup> to 2.53 m<sup>2</sup>. The maximum incremental transverse cross-sectional areas have been recorded for the gullies located at key sites with a larger drainage area and a greater depth of dissection of elementary drainage basins. Analysis of climatic factors has shown that showers were more frequent in 2013-2015 than in 2012-2013. The indicators of dynamics of the groups of modern exogenous geological processes in the Mongolian-Siberian region involve affected areas, activity, intensity of occurrence and recurrence, and require constant monitoring.

Keywords: Mongolian-Siberian region, dangerous exogenous geological processe, monitoring, abrasion, erosion

\*\*\*

УДК 551.7+551.8(571.53)

## МЕГАЦУНАМИ И МАНЗУРСКИЙ АЛЛЮВИЙ ИЛИ ПОЗДНЕНЕОПЛЕЙСТОЦЕНОВАЯ СУДЬБА р. ПРА-МАНЗУРКИ

## Е.Е. Кононов

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Обсуждены новые материалы по проблеме праманзурского канала стока, опубликованные в последние годы. Гипотеза о формировании манзурского аллювия в результате мегацунами изначально базируется на ошибочном предположении о наличии в районе устья р. Голоустной опущенного блока. По геофизическим данным «блок» представляет собой древнюю дельту р. Голоустной, о чем свидетельствуют рыхлые слоистые озерные толщи мощностью более 400 м, перекрывающие этот «блок». А следовательно, все дальнейшие построения, связанные с этим блоком, спекулятивны и не имеют ничего общего с реальными палеогеографическим событиями. Ключевые слова: озеро Байкал, мегацунами, байкальский сток

У большинства исследователей озера не вызывает никакого сомнения то, что у такого огромного водоема, каким является Байкал, с его сложной тектонической историей вполне могла иметь место неоднократная смена каналов стока [1]. В качестве наиболее вероятных каналов стока байкальских вод в недавнем геологическом прошлом - эоплейстоцене - неоплейстоцене - в настоящее время рассматриваются: система древних долин Лено-Ангарского междуречья, объединяемых под общим названием Пра-Манзурка, и древняя Култучно-Ильчинская долина в районе юго-западной оконечности Байкальской котловины. Аргументов в пользу существования этих каналов стока в геологическом прошлом приведено в литературе много [1-3], но, тем не менее, имеется достаточно много «темных пятен», которые не позволяют однозначно утверждать, что история байкальских стоков восстановлена достоверно. В последние годы было опубликовано довольно много версий по различным аспектам формирования и смены каналов стока озера, что вызывает необходимость обсудить некоторые из них.

Очень оригинальные версии о происхождении и возрасте манзурской толщи, а следовательно, праманзурского канала стока высказали А.В. Иванов, Е.И. Демонтерова и др. в статье «Catastrophic outburst and tsunami flooding of Lake Baikal: U–Pb detrital zircon provenance study of the Palaeo-Manzurka megaflood sediments», опубликованной в июле 2015 г. в журнале «International Geology Review» [4].

В названной статье авторы, желая обосновать свою идею о мегацунами на Байкале, предлагают параллельно решить проблему стока озерных вод через древнюю праманзурскую долину и попутно пытаются объяснить еще целый ряд спорных проблем палеогеографической истории озера Байкал на позднекайнозойском этапе его развития. Хотелось бы бегло обсудить некоторые предположения и версии авторов, связанные с проблемой праманзурского стока (Далее курсивом приведены фрагменты текста обсуждаемой статьи, переведенные на русский язык). «... в отложениях палео-Манзурки рядом с с. Харбатово были найдены гранитые глыбы до 1 м в диаметре и больше (рис. 3), они располагаются

на расстоянии около 100 км вниз по течению от их потенциального источника (рис. 1с). В связи с этим наблюдением возникает вопрос о механизме переноса больших валунов на такие расстояния. В соответствии с диаграммой Hjulström, чтобы течение реки сдвинуло валун диаметром 1 м, скорость потока должна составлять  $~8\pm 1 \text{ м/c}^{-1}$  (Sundborg 1956), что в два-три раза выше максимальной скорости течения Лены (3.0 м/c<sup>-1</sup> во время наводнения 1936 г.) или Манзурки (2.4 м/c<sup>-1</sup> во время наводнения 1966 г.) (Konovalova 1949; Borisova 1968).Стр. 4.

Приведенные расчеты о том, что найденные глыбы были перенесены потоком, имевшим скорости порядка 8-9 м/с, можно было бы считать корректными, если бы они совпали с расчетами по остальным компонентам и параметрам манзурской толщи. Сделанные расчеты [1] по определению средней скорости, глубины потока, критерия А.Н. Ляпина, числа Фруда (Fr) и др. приводят к выводу, что палеопоток представлял собой крупную реку горно-равнинного типа со средней скоростью потока от 1.08 до 1.97 м/с. Эти данные получены по результатам многотысячных замеров в разных частях разреза «манзурки» на всем протяжении древней долины. Установлено, что углы наклона галек в среднем 20-30°, что соответствует максимальной скорости потока 1.5-2.0 м/с [3]. Невозможно представить, как могла основная толща манзурских отложений сформироваться потоком, имевшим скорость 1.5-2.0 м/с, а глыбы из этих же отложений переносились со скоростью 8-9 м/с. Согласно данным А.Б. Вистелиуса [3], для того чтобы обломок, к примеру, такой устойчивой породы, как кварцит, достиг 4-го класса окатанности, необходимо всего 40 км. Глыбы, показанные авторами рассматриваемой статьи, явно имеют 1-2-й класс окатанности, и дальность их переноса (в зависимости от состава породы) не может превышать 8-23 км.

Появление глыб в разрезе «манзурки» можно объяснить гораздо проще. В донных осадках Байкала давно зафиксированы многочисленные находки обломков, и их происхождение большинством исследователей объясняется ледовым (айсберговым) переносом [2]. Почему подобные обломки не могли таким же образом появиться в манзурской толще?

Еще одним неразрешенным вопросом авторы обсуждаемой статьи считают проблему «происхождения гальки манзурского аллювия, состав которой соответствует составу вулканических пород мезозоя, которые изначально были расположены к югу от Байкала (Забайкалье) и затем переотложены в области кратона к северу от Байкала в форме обломочных пород юрского периода (Logachev и др. 1964, 1974)... Оба региона (Забайкалье и область отложений юрского периода), однако, находятся за пределами предполагаемого местонахождения бассейна палео-Манзурки» (стр. 4).

Автором настоящей статьи были детально изучены десятки разрезов манзурской свиты от м. Роговик на западном склоне Приморского хребта до с. Кистенево в долине р. Лены [1, 3]. Выяснилось, что материал манзурского аллювия в значительной степени формировался за счет поступления в русло древней реки дезинтегрированной гальки юрских

конгломератов, дополнительным источником материала могли быть конгломераты ушаковской свиты. Данные убедительно говорят о том, что для формирования зрелой аллювиальной толщи не надо было больших расстояний, достаточен был путь длиной от 1–3 до 10–13 км, т.е. сточная прорезь могла располагаться на расстоянии не более 10–15 км восточнее от сохранившихся фрагментов древней долины [3]. Таким образом, фактические данные достаточно однозначно свидетельствуют о местном, юрском, «следе» обломочного материала «манзурки».

«U-Pb-датирование зерен детритовых цирконов, собранных с трех участков отложений палео-Манзурки, выявило, что возраст цирконов палео-Манзурки сопоставим с возрастом цирконов, собранных на Селенге (рис. 5). Все шесть основных максимальных значений, зафиксированных для цирконов из аллювия Селенги, которые являются характерными для бассейна Селенги (Donskaya и др., 2013), повторяются для цирконов из отложений палео-Манзурки....Для того чтобы объяснить обратное соотношение возраста цирконов (рис. 6), а также неразрешенные вопросы, упомянутые выше, мы предлагаем катастрофическую модель происхождения русла палео-Манзурки (стр. 7). Очевидно, что отложения палео-Манзурки были депонированы за очень короткий срок вследствие наводнения, вызванного катастрофическим выбросом вод Байкала в палео-Манзурку....» (стр. 9). Далее, анализируя данные перерасчета TL-датирования, показанные в виде гистограммы вероятностного возраста, А.В. Иванов с соавторами выделяют на ней отчетливые ... «пики кривой 117 ± 28 или 126 ± 24 тыс. л., если не принимать во внимание минимальный и максимальный TL-возраст. Каждое из этих двух значений частично совпадает в пределах планки погрешностей со сроками с понижением уровня воды в Байкале на 40 м, случившимся во время морской изотопной стадии (MIS) 5, на основе сейсмического профилирования (Urabe и др. 2004)». (стр. 9). Таким образом, авторы связывают формирование и существование праманзурского направления стока с катастрофой, случившейся около 100 тыс. л. н. в районе устья р. Голоустной и, следовательно, резко омолаживают манзурский аллювий.

В тексте обсуждаемой статьи указано, что отбору были подвергнуты и нижние и верхние части разреза Манзурки, а следовательно, зерна цирконов могли попасть в толщу манзурского аллювия еще в начальные стадии развития древней реки. Это должно было бы произойти в начале неоплейстоцена, но не позже начала среднего неоплейстоцена, когда, по мнению М.И. Кузьмина [5], произошла перестройка речной сети в районе Центрального Прибайкалья. Известно, что манзурская свита местами залегает гипсометрически выше современных водотоков, местами ее отложения вскрыты бурением ниже дневной поверхности. Н.А. Логачев вполне резонно объяснил это постманзурскими деформациями, что свидетельствует о геологически длительном времени, прошедшем после этапа ее седиментации. Эти данные однозначно опровергают представления о крайне молодом и, тем более, одномоментном образовании манзурской свиты, что, впрочем, однозначно следует и из биостратиграфической характеристики манзурских отложений, которую еще никто не опроверг.

Как могли попасть цирконы в манзурский аллювий? Кроме изложенного авторами статьи катастрофического способа транспортировки цирконов из Забайкалья, можно предложить к рассмотрению несколько более реальных вариантов, один из которых уже изложен выше. Если проанализировать направления современных поверхностных течений на Байкале [3], взяв за отправную точку район дельты р. Селенги, то можно увидеть, что существует устойчивое течение от дельты поперек Байкала до западного берега и далее на юго-запад вдоль озерного берега практически до мыса Кадильного. Прекрасный устойчивый способ транспортировки рыхлого материала на льдинах из района дельты Селенги в русло древней долины, при условии, что древняя река в то время функционировала. Второй вариант переноса материала мог быть связан с эпохами похолодания. В периоды похолоданий происходит резкое понижение уровня озерных вод, что, к примеру, во время тазовского оледенения привело к тому, что озерная линза из-за недостатка воды распалась на три – северную, южную и центральную [5] и дельтовые отложения р. Селенги могли достигать западного берега. Таким образом, можно предположить, что и в другие эпохи похолодания могли быть созданы благоприятные, реальные условия по транзиту цирконсодержащих отложений из Забайкалья в русло древней долины.

Существует ли в реальности блок – «создатель» цунами, где этот блок, и по каким данным он установлен? Убедительных доказательств существования в районе устья р. Голоустной опущенного блока авторами не предоставлено. Есть данные геофизических исследований [6], согласно которым предполагаемый блок представляет, скорее всего, авандельту древней р. Пра-Голоустной, сложенную слоистыми

толщами осадочных отложений мощностью более 400 м. Для формирования такой толщи озерных отложений необходимо время. По данным Е.В. Безруковой и др. [7], полученным при анализе споровопыльцевого материала из скв. ВДР-96-1, возраст осадков на глубине 158-197 м около 4-5 млн лет. Если экстраполировать эти возрастные данные на слоистые толщи на поверхности блока, то можно предположить, что на их формирование ушло ни менее 7 млн лет, т.е. осадочная толща над предполагаемым блоком начала формироваться задолго до катастрофы. И еще авторам как-то надо объяснить наличие выходов газогидратов на поверхности блока. Газогидраты имеют биогенное происхождение, связаны с рыхлыми донными осадками древней авандельты р. Голоустной и не могли сформироваться в кристаллических толщах предполагаемо рухнувшего блока.

Сама гипотеза о мегацунами, несмотря на свою привлекательность и сенсационность, базируется изначально на ошибочной версии о существовании в районе устья р. Голоустной опущенного блока. Геофизические исследования не подтверждают этого. Следовательно, все построения, связанные с обрушившимся в озеро блоком, спекулятивны и не имеют ничего общего с реальными палеогеографическими событиями.

Любые новации, основанные на физических явлениях-данных должны быть проверены геологической практикой. История геологических исследований знает немало примеров, когда явления-данныевыводы, казалось бы безупречные с точки зрения точных наук, не выдержали геологической проверки. Авторы статьи, ссылаясь на катастрофические прецеденты в геологической истории ряда водных бассейнов, сразу же утверждают, что такое же могло произойти и на Байкале, не приводя никаких фактических доказательств возможности формирования на Байкале волны мегацунами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кононов Е.Е., Мац В.Д. История формирования стока вод Байкала // Известия МинВУЗов. Геология и разведка. 1986. № 6. С. 91–98.

2. Логачев Н.А., Ломоносова Т.К., Климанова В.М. Кайнозойские отложения Иркутского амфитеатра. М.: Наука, 1964. 195 с.

3. Кононов Е.Е. Байкал. Аспекты палеогеографической истории. Иркутск, 2005.125 с.

4. Ivanov A.V., Demonterova E.I., Reznitskii L.Z., Barash I.G., Arzhannikov S.G., Arzhannikova A.V., Chan-Hui Hung., Sun-Lin Chung, Iizuka Y. Catastrophic outburst and tsunami flooding of Lake Baikal: U–Pb detrital zircon provenance study of the Palaeo-Manzurka megaflood sediments // International Geology Review. London: Tailor & Francis, 2015. doi:10.1080/00206814.2015.1064329.

5. Кузьмин М.И. Во льдах Байкала. Новосибирск: Изд-во «Гео», 2001. 140 с.

6. Хлыстов О.М., Нишио Ш., Манаков А.Ю., Сугияма Х., Хабуев А.В., Белоусов О.В., Грачев М.А. Опыт картирования кровли приповерхностных газовых гидратов озера Байкал и извлечения газа из них // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 9. С. 1415–1425.

7. Безрукова Е.В., Кулагина Н.В., Летунова П.П., Шестакова О.Н. Направленность изменений растительности и климата Байкальского региона за последние 5 млн лет // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 5. С. 739–750.

#### MEGATSUNAMI AND MANZURKA ALLUVIUM OR THE LATE NEOPLEISTOCENE HISTORY OF THE PALEO-MANZURKA RIVER

## E.E. Kononov

V.B. Sochava Institute of Geography, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The discussion presented here is based on some recently published materials concerning the paleo-Manzurka channel runoff. The hypothesis of the Manzurka alluvium formation because of megatsunami is based on the original erroneous assumption that a subsided block can be found near the mouth of the Goloustnaya River. According to geophysical data, the "block" is

the ancient Goloustnaya River delta, as evidenced by the "block"-overlying layers of loose lacustrine sediments more than 400 m in thickness. Therefore, further assumptions about that block are speculative and have nothing to do with real paleogeographic events.

Keywords: lake Baikal, mega-tsunami, Baikal runoffs

\*\*\*

УДК 551.4.01/02

# ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ СИБИРИ ПО ОПАСНЫМ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ

С.Б. Кузьмин

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. В основу районирования Сибири по опасным геоморфологическим процессам положены: 1) пространственные закономерности основных морфоструктур и протекающих на них геоморфологических процессов; 2) территориальная организация хозяйства, которая резко меняется из-за изменения всей системы территориально-производственных связей в России; 3) ближайшие перспективы социально-экономического развития отдельных районов Сибири и опасные геоморфологические процессы, которые в результате этого могут активизироваться или возникнуть вновь. Опасные геоморфологические процессы выделены по отношению к конкретным видам природопользования, которые преобладают в геоэкологических районах Сибири в настоящий момент или планируются в ближайшей перспективе (5–10 лет). *Ключевые слова:* опасный геоморфологический процесс, природный и антропогенный фактор опасности, геоэкологиче ское районирование, Сибирь

В последнее время в мире, как и в России, отмечается стремительный рост числа и масштабов стихийных бедствий и катастроф, материального и морального ущерба от них. Это требует создания новой стратегии национальной безопасности, унифицированных методик построения карт опасных природных процессов, которые позволили бы сопоставлять угрозы для отдельных территорий и субъектов РФ. Эти тематические и интегральные карты послужат основой для разработки федеральных и региональных нормативных документов, с учетом которых органы управления принимают решения по использованию территорий, предупреждению и ликвидации ЧС.

Крупнейшим стратегически важным регионом России является Сибирь. Суровые природноклиматические условия Сибири влекут за собой масштабную активизацию опасных природных процессов при ее хозяйственном освоении. Это требует повышения качества прогноза этих процессов, усовершенствования знаний о их закономерностях для предотвращения просчетов в политике обеспечения экологической безопасности.

Районирование Сибири по опасным геоморфологическим процессам базируется на общих принципах геоэкологического районирования, но введен ряд корректирующих моментов: отклик рельефа на антропогенное воздействие, возникающие при этом взаимосвязи в геоморфосистемах, их трансформация. Геоэкологические районы объединяют природные, природно-ресурсные и хозяйственные уровни организации рельефа, что вызывает определенные трудности в проведении границ между ними. Однозначного решения этого вопроса нет, так как случаи совмещения природных И хозяйственноадминистративных границ – скорее исключение, чем правило, поэтому в качестве рубежей высокого ранга принимаются границы субъектов РФ, а границы более низкого ранга проводятся с учетом особенностей структуры рельефа.

Для районов устанавливаются главные природные и антропогенные факторы, опре-деляющие геоморфологическую опасность, ведущий тип природопользования, поскольку от этого зависит, какие геоморфологические процессы будут опасными. В основе районирования лежит принцип совмещения контуров районов, определяемых геоморфологическими и хозяйственными условиями, степенью вовлечения ландшафтов в хозяйственное использование, однотипностью факторов воздействия на рельеф.

В результате анализа объектов райони-рования были поставлены следующие задачи: 1) выбор адекватного исходного их описания; 2) выбор метода классификации; 3) содержательный анализ и интерпретация результатов. Одним из основных принципов классификации опасных геоморфологических процессов является ее соответствие содержательному характеру задач районирования. В зависимости от числа исходных единиц различают одномерную и многомерную классификации. Примером одномерной классификации (типологизации) является метод ведущего фактора. Он учитывает фактор, определяющий все другие компоненты, и ему соответствует типологическое районирование, т.е. процедура разбиения объектов на типы все более высокого таксономического ранга. Многомерная классификация основана на последовательности одномерных классификаций. Сначала осуществляется типологическая группировка объектов районирования отдельно по каждому показателю, а затем формируются группы объектов путем последовательного наложения соответствующих одномерных классификаций (тематических слоев). Такая классификация и вытекающее из нее комплексное районирование осуществляется классическими методами наложения (сопоставления контуров) частных видов геоморфологического и природно-хозяйственного районирования. При этом линии совпадения или близкого расположения границ частных видов районирования принимаются за границы геоэкологических районов, что позволяет охватывать наиболее существенные черты и делает метод наложения действенным и верифицируемым.

Использован способ районирования, который связан с многоаспектной типологизацией объектов. Он обеспечивает развернутое представление районов в результате построения мысленно-логических матриц природно-хозяйственных условий. Они являются неформальными моделями, а их уровням соответствуют нечисловые геоморфологические и хозяйственные показатели, которые могут не находиться в иерархической зависимости друг от друга. Выделение районов осуществляется путем объединения отдельных элементов разных уровней логических матриц или наложения одномерных группировок (тематических слоев), как это делается при интегральных эколого-хозяйственных оценках. В дополнение использован подход к многомерной классификации объектов, который основан на качественных показателях их сходства/различия по всему комплексу геоморфологических процессов и видов природопользования и применении методов таксономии. Это позволяет в полной мере реализовать принцип комплексности с переходом к обобщению объектов районирования, представить данные в наглядной форме посредством ГИС-технологий.

Сложность элементов районирования требует для их описания использовать детерминированный, стохастический, нечеткий (размытый) подход. В соответствии с принципом дополнительности Бора необходимо учитывать фактор неполноты и неопределенности как объективное условие принятия обоснованных управленческих решений на основе предлагаемого районирования. Такие решения становятся возможными только после введения категории «цель». Вне ее состояние геоморфологических процессов по отношению к хозяйству не является хорошим или плохим, предпочтительным или непредпочтительным, опасным или неопасным. Оно начинает становиться таким лишь будучи вовлеченным в категориальные схемы ценностей, построенные субъектом – лицом или коллегиальным органом, принимающим административно-управленческое решение по развитию природопользования.

Единицы эколого-геоморфологического			Виды хозяйственной деятельности, подвергающиеся	
районирования			воздействию опасных геоморфологических процессов	
Регион	Район	Подрайон	Существующие	Планируемые
I. Западно-	I.1. Северо-	I.1.a. Ямальский	Оленеводство, рыболовство,	Нефтегазодобывающая,
Сибирская	Западно-		пушной промысел, морской	трубопроводный транс-
низменность	Сибирский		транспорт	порт
		I.1.б. Нижнеобский	Салехардский транспортный	Нефтегазодобывающая,
			узел, оленеводство, пушной	туризм
			промысел, нефтегазодобыча	
		I.1.в. Тазовский	Газодобывающая. Транспорт	Нефтегазодобывающая.
			трубопроводный, железнодо-	Транспорт водный, тру-
			рожный, автомобильный.	бопроводный
			Электроэнергетика. Оленевод-	
	10.10		ство	
	1.2. Южно-	1.2.а. Ханты-	Нефтегазодобывающая и пере-	Аграрно-промышленная,
	Западно-	мансиискии	раоатывающая, энергетиче-	туризм
	Сиоирский		ская, лесопромысловая, про-	
			мышленно-пригородная. гру-	
			иодорожный артотранспорт	
		I 2 6 UVILIMO-	Нефтегазолобывающая лесо-	
		Кетский	промышленная охото-	n pupilo npombienobus
		Кетекии	рыболовно-промысловая	
		I.2.в. Ачинский	Мясомолочное животноводст-	Землелелие. химическая
			во, деревообрабатывающая	
		І.2.г. Среднеир-	Нефтеперерабатывающая, хи-	Горнодобывающая
		тышский	мическая, машиностроение,	
	II.1. Course		аграрный комплекс	
		I.2.д. Барабинский	Зерновое земледелие, живот-	Горнодобывающая
			новодство, цветная металлур-	
			гия, химическая, машино-	
			строение, пригородное сель-	
			ское хозяйство	T
П. Плоского-	П.Г. Северо-	П.1.а. Гаимырскии	Пушнои промысел, оленевод-	Гопливно-горнорудная
рья и низ-	Сиоирскии	II 1 6 Varauraură		Fana and the second
менности Росточной		п.т.о. латантский	пушной промысел, оленевод-	1 азодооывающая
Сибири	II 2 Chanua			Daanaforka Macronowija
Сибири	п.2. Средне- Сибирский	п.2.а. путорано- Тунгусский	и орнодооывающая, цветная	газработка месторожде- ний цефти и газа
		i yili yeekiin	мысел песное хозяйство	пт пефти и газа
		II 2 б Анабаро-	Охото-рыболовно-	Горнорудная горно-
		Оленекский	промысловая, геологоразвелка	химическая
			опеневолство	

Главные виды хозяйственной деятельности в геоэкологических районах Сибири

Продолжение таблицы Единицы эколого-геоморфологического Виды хозяйственной деятельности, подвергающиеся возрайонирования действию опасных геоморфологических процессов Район Регион Подрайон Существующие Планируемые II.2.в. Ангаро-Горнорудная, лесное хозяйство, Гидроэнергетика, нефте-Тунгусский охото-рыболовно-промысловая газодобывающая Лесозаготовка, II.2.г. Ангаро-Высокоперспек-Оленеводство, алмазодобываю-Нефтегазодобывающая Ленский гидроэнергетика, тивная развищая, горнодобывающая деревообрабатывающаяся нефтевающая, цветная газодобывающая металлургия, промышленность II.3.б. Вилюйугольная, ското-Скотоводство, очаги земледелия, Якутский газоперерабаводство, земледеский добывающей и обрабатывающей тывающий комплекс лие, машинопромышленности II.3.в. Леностроение, нефте-Оленеводство, охотничьи про-Горнорудная и горнодоперерабатываю-Апланский мыслы, лесная и горнорудная бывающая щая, химическая промышленность III. Горы III.1. Горн.алтай Горнорудная, лесная Рекреация Южной Си-III.2. Кузбасский Цветная и черная металлургия, Аграрный комплекс \_ бири угледобывающая и химическая. крупное электротехническое и тяжелое машиностроение III.3. Саяно-III.3.а. Западно-Молочно-мясное скотоводство, Горнорудная промыш-Тувинский Саянский овцеводство, зерновое земледеленность лие III.3.б. Тувин-Мясо-шерстное овцеводство, мя-Добыча полиметалличесомолочное скотоводство, охотских и медных руд, рекский ничьи промыслы реация, горнодобывающая III.4. Восточно-III.4.а. Предсаян-Молочно-мясное скотоводство, Горнодобавающая Саянский ский овцеводство, земледелие III.4.б. Горноса-Лесной промысел, скотоводство Горнорудная, рекреация янский III.5. Байкало-Лесные промыслы, горнодобы-Горнодобывающая Патомский вающая, в т.ч. золоторудная III.6. Прибайкаль-III.6.а. Байкаль-Охото-рыболовно-промысловая, Рекреация, туризм, сельрекреация, туризм, лесное хозяйский ский ское хозяйство ство, скотоводство III.6.б. Чаро-Лесные промыслы, оленеводст-Горнорудная промыш-Витимский во, очаги горнодобывающей ленность промышленности III.7. Забайкаль-III.7.a. Верхневи-Лесные промыслы, очаги горно-Долинное земледелие, ский тимский рудной и деревообрабатываюживотноводство щей промышленности III.7.б. Шилко-Лесное и сельское хозяйство, пе-Горнодобывающая, лесо-Хилокский перерабатывающая, лесорерабатывающая промышленность, машиностроение, горнохимическая рудная, пригородное сельское хозяйство III.7.в. Онон-Овцеводство, скотоводство, об-Туризм, земледелие Аргунский ширные очаги горнодобывающей промышленности IV. Горы и IV.1. Становой Оленеводство, лесные промыс-Металлургические комравнины селы, горнорудная, пригородное бинаты веро-востока сельское хозяйство Сибири IV.2. Верхояно-IV.2.а. Верхоян-Пушной промысел Горнодобывающая Улаханский ский IV.2.б. Улахан-Редкие очаги горнодобывающей Горнорудная ский промышленности IV.3. Яно-IV.3.а. Янский Дальнейшее развитие Оленеводство, коневодство IV.3.б. Верхне-Угольная промышлен-Оймяконский Оленеводство, пушной промыиндигирский ность сеп IV.4. Черский IV.4.а. Западно-Редкие очаги золотодобычи Горнодобывающая черский IV.4.б. Восточ-Редкие очаги горнорудной про-Горнодобывающая ночерский мышленности IV.5. Юкагиро-Очаги горнорудной промышлен-Олово- и золотодобы-Анюйский ности вающая IV.6.а. Алазей-IV.6. Яно-Промыслы пушного и морского Дальнейшее развитие Колымский ский зверя, рыбные промыслы IV.6.б. Нижне-Оленеводство, пушной промы-Дальнейшее развитие индигирский сел



Карта районирования Сибири по опасным геоморфологическим процессам. Условные обозначения см. на карте, а наименования геоэкологических районов – в таблице.

Изложенные представления легли в основу районирования Сибири по опасным геоморфологическим процессам (рисунок). Его границы определены в рамках административных единиц федерального уровня. В территориальной системе РФ выделяются: 1) структура, образуемая в соответствии с экономическим районированием на основе территориального разделения труда. Оно ведет к производственной специализации, обособлению экономических районов, развитию межрайонной кооперации, обмену продукцией и услугами, определяет основные закономерности и формы территориальной организации производства; 2) структура, отвечающая государственному устройству и определяющая совокупность равноправных субъектов РФ; 3) региональная структура, отражающая территориальноадминистративное устройство каждого субъекта РФ; определяется спецификой расселения и сложностью управления централизованного социально-экономическими процессами; 4) районы для реализации региональных комплексных программ.

Определены три уровня районирования: 1) регион – соответствует структуре 1; 2) район – соответствует структурам 2 и 3; 3) подрайон – соответствует структуре 4. Регионы и районы выделены на морфоструктурной основе. Для подрайонов учитывался класс геоморфо-логических процессов по их генезису. Опасные геоморфологические процессы выделялись по их реально существующему или возможному в ближайшей перспективе (5–10 лет) негативному воздействию на главные виды хозяйственной деятельности в единицах районирования (таблица). Ведущими критериями при оценке по природно-геоморфологическому фактору являлись основные характеристики рельефа (высота, расчлененность) и преобладающие по площади и интенсивности рельефообразующие процессы. Опасность по антропогенному фак-тору обусловливается преобразованием рельефа в результате хозяйственной деятельности и характеризуется площадью нарушенных земель и глубиной (масштабом) их трансформации.

Большинство отраслей экономики Сибири имеет широкое площадное распространение. Они как сами активно воздействуют на рельеф, так и подвергаются столь же активному воздействию со стороны геоморфологических процессов, и к ним применяется специальный региональный подход. Но многие отрасли экономики, такие как машиностроение, металлургия, химическая и легкая промышленность, концентрируются в крупных городах Сибири. Предприятия этих отраслей функционируют на землях, уже распланированных при строительстве, где уже проведена оценка опасных геоморфологических процессов, учтено их распространение, сила и масштаб проявления в соответствии со специальными методиками, поэтому города нами не анализируются. Опасные геоморфологические процессы определены и согласованы по специальным нормативным документам: СНиП 22-01-95 «Геофизика опасных природных воздействий», СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства», СНиП 22-02-2003 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов», а также на основе нормативных документов МЧС.Районирование Сибири по опасным геоморфологическим процессам в круге задач, решаемых МЧС РФ, будет способствовать обоснованию и внедрению особой федеральной и региональной политики по предупреждению и ликвидации ЧС

природного и природно-техногенного характера. Для достижения этого структурам МЧС, совместно с админист-ративным аппаратом, необходимо решать ряд многокритериальных задач, поскольку они затрагивают интересы как регионов, так и страны в целом. Для Сибири особенно актуально то обстоятельство, что в условиях рыночных отношений и высокой конкуренции, активно протекающего в стране импортозамещения новые черты приобретает такой районообразующий фактор, как территориальная комплексность хозяйства. Главным ее показателем становится четкое соответствие хозяйства региона его природным и экономическим условиям, рациональное сочетание хозяйственных отраслей на базе ведущих специализирующих производств и их территориальной концентрации, относительное сходство отраслевой структуры. Но при этом важным условием комплексного развития регионов становится эффективная система защиты населения и хозяйства от стихийных бедствий и катастроф, профилактика ЧС природного и природно-техногенного характера. Проведенное районирование Сибири по опасным геоморфологическим процессам будет способствовать выполнению этого условия.

## GEOECOLOGICAL ZONING OF SIBERIA BASED ON HAZARDOUS GEOMORPHOLOGICAL PROCESSES

#### S.B. Kuzmin

V.B. Sochava Institute of Geography, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Zoning of Siberia based on hazardous geomorphological processes involves: 1) spatial distribution of the main morphological structures and their related geomorphological processes; 2) territorial organization of the economy that is changing dramatically due to changes in the interrelated territorial-production systems of industry in Russia; 3) the immediate prospects of social and economic development of some regions in Siberia that can either activate or reactivate hazardous geomorphological processes. Hazardous geomorphological processes are identified in relation to certain types of nature resource management that now prevail in the geoecological regions of Siberia or are expected in the next 5-10 years.

Keywords: hazardous geomorphological process, natural and man-made hazard, geoecological zoning, Siberia

\*\*\*

УДК 551.4+551.8+556.55

## СЕЙСМОГЕОДИНАМИКА КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ СЕЛЕЙ НА ЮЖНЫХ СКЛОНАХ ХРЕБТА КОДАР

В.К. Лапердин<sup>1</sup>, В.А. Саньков<sup>1,2</sup>, А.А. Добрынина<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Аннотация. В работе обсуждается потенциал геодинамических и сейсмотектонических факторов (активные разломы и сейсмичность) развития селевых проявлений в районе сочленения юго-западной части Чарской впадины, поднятия хребта Кодар и Муйско-Чарской междувпадинной перемычки северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы, которые, наряду с мерзлотными, гидрологическими и климатическими условиями, определяют высокую степень селевой опасности территории.

*Ключевые слова:* сейсмогеодинамика, современная сейсмичность, палеосейсмичность, сель, Байкальская рифтовая система

Хребет Кодар относится к селеопасным районам России. Одно из последних проявлений селевых процессов произошло 27 июля 2001 г. на южном склоне хребта в районе озер Малое и Большое Леприндо и привело к остановке движения по трассе БАМ. Сели района по генезису относятся к дождевым, а по механизму зарождения - к оползнеэрозионному типу. Известно, что проявление селей, их объемы, частота повторяемости и уровень риска в значительной степени зависят от интенсивности развития экзогенной группы процессов и характера техногенного преобразования геологической среды. Вместе с тем, общие фоновые и прямые предпосылки селеформирования создаются также под влиянием геодинамических и сейсмотектонических факторов, которые являются предметом настоящего исследования.

Современный рельеф территории исследований сформировался в результате рифтогенных процес-

сов, обусловивших дифференцированные движения по разломам разных порядков. Оживление тектонических движений началось в конце неогена. Опускание отдельных блоков и воздымание других с их последующим разрушением обусловили сложное ступенчатое строение современных форм хребта Кодар. В позднем плейстоцене в восточной части Муйско-Чарской перемычки возникли впадины озер Малое и Большое Леприндо.

Территория проявления опасных селевых выбросов расположена в юго-западной части Чарской впадины Байкальской рифтовой системы, на сочленении с Муйско-Чарской междувпадинной перемычкой. Наивысшая активность тектонических движений здесь проявилась в позднем плиоцене – плейстоцене [1]. В региональном плане район исследований находится в пределах участка сужения зоны динамического влияния северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы. Этим здесь обусловлена высокая концентрация активизированных разломов, связанных с дивергентным движением Сибирского и Забайкальского блоков. Разломы земной коры формируют борта рифтовых впадин, а также внутреннее строение впадин разного порядка и междувпадинных перемычек. В районе озера Большое Леприндо такую роль играют разломы северо-восточного, субширотного и северо-западного направления при преимущественном распространении первых. Образование этих систем разломов происходило за счет активизации древних разрывных нарушений, первоначальная активность которых относится к архею и началу палеозоя (широтная и северо-западная системы) [1]. В современном рельефе разломы неотектонической активизации выражены главным образом в виде уступов, а также рвов и трещин растяжения. По кинематическим типам они делятся на сбросы (наиболее распространенные), сдвиги и взбросы. Амплитуды вертикальных смещений для сбросов варьируются в зависимости от ранга разлома. Вблизи участка железной дороги на южном склоне хребта Кодар выделены СВ разломы, хорошо выраженные в рельефе системой тектонических уступов. С ними связаны относительно недавние (после последнего ледникового периода) сейсмотектонические деформации, обусловившие существенную перестройку геоморфологического и гидрографического облика склона. В частности, отдельные водотоки, впадающие в оз. Большое Леприндо в зоне транзита, имеют каньонообразные долины, первоначально представлявшие собой зоны сейсмотектонических нарушений, разработанные затем речной эрозией.

Субширотные разломы выражены сбросовыми уступами и кинематически сопряжены с разломами СВ системы. Согласно работе [2], эти структуры имеют левостороннюю сдвиговую компоненту смещений. В пределах изучаемой площади такой сдвиг установлен по левому борту долины р. Сюльбан. Наряду с упомянутыми достаточно редко встречающимися взбросами и сдвигами [3, 4], в районе присутствует большая группа субширотных разрывов, имеющих признаки активизации в голоцене. Эти сбросы, выраженные уступами и трещинами отрыва, хорошо прослеживаются в ледниковых отложениях и послеледниковых конусах выноса. Именно по трещинам отрыва и сформировались верхние части русел селеопасных ручьев. Такие же разрывы распространены в долине р. Сюльбан, а также на перемычке между впадинами озер Большое и Малое Леприндо.

Разломобразование на южном склоне хр. Кодар сопровождалось формированием мощных зон дробления коренных пород, образованием тектонических трещин и разломов различного типа. В зонах крупных тектонических нарушений широко распространены груборассланцованные породы – тектониты, милониты, катаклазиты и брекчии, которые, быстро разрушаясь, образуют осыпи щебнистомелкоглыбового материала, легко транспортируемого склоновыми потоками. Кроме того, благодаря интенсивному тектоническому дроблению, облегчаются процессы выветривания коренных пород, которые создают вдоль склонов гор многокилометровые скопления рыхлообломочного материала различных фракций – от мелких глинистых и песчаных частиц до обломков и глыб метровых размеров. Тектонические трещины и разломы различного характера способствуют возникновению гравитационных процессов и форм – обвалов, оползней, осыпей, оползнейсплывов, благодаря которым создаются запасы грубообломочного материала в тальвегах временных и постоянных водотоков, формирующего твердую фазу селевых потоков.

Важнейшей особенностью тектонического развития рассматриваемой территории является интенсификация разнонаправленных движений в современную эпоху. О воздымании хр. Кодар свидетельствуют русла ручьев, врезанные в коренные породы и ледниковые отложения в верхней и средней части селеопасных бассейнов на глубину 5–7 м.

Одним из главнейших эндогенных факторов селеобразования в пределах рассматриваемой территории является высокая степень сейсмической активности Станового нагорья [3, 5]. В настоящее время юго-западная часть Чарской впадины характеризуется умеренной сейсмичностью. За период инструментальной регистрации здесь произошло более 2700 событий с энергетическим классом (К) от 5 до 15.5. Угол наклона графика повторяемости равен -0.39, из чего период повторяемости землетрясений с классом K=13 для данного района оценивается в 30 лет, K=14 – 60–70 лет и K=15 – 160 лет. Характер реализации сейсмических событий в исследуемом районе и его окрестностях относится к смешанному типу – здесь реализуются как отдельные землетрясения, так и рои землетрясений и афтершоковые последовательности [6]. Эпицентры землетрясений группируются в кластеры и широкие полосы северо-восточной ориентации в Чарской впадине и в районе Муйско-Чарской междувпадинной перемычки и в полосы северо-западной и субширотной ориентации в районе хребта Удокан, что говорит о приуроченности сейсмических событий к активным разломам.

В ряде работ [7-9 и др.] отмечено, что движение дисперсных образований, особенно на крутых склонах, в процессе их увлажнения дождевыми и талыми водами может начаться и при сравнительно слабых землетрясениях - порядка 4-5 баллов. С учетом большой частоты слабых землетрясений в пределах данной территории, а также высокой нормы атмосферных осадков, явление оползания рыхлых склоновых отложений имеет широкое распространение и играет важную роль в формировании твердой фазы селевых потоков. Часто в долинах селеопасных бассейнов наблюдаются хорошо выраженные следы обрушения делювиальных накоплений. Частые, хотя и слабые, подземные толчки приводят к расслаблению внутренних связей бровок в горных массивах и их обрушению, осыпанию или оползанию, создавая тем самым потенциальные запасы твердой фазы селевых потоков в руслах временных и в прирусловой зоне постоянных водотоков

Катастрофические землетрясения сопровождаются значительными нарушениями горных склонов в эпицентральных зонах, которые проявляются в виде крупных сейсмотектонических трещин, трещин оседания, обвалов, оползней. Такие явления наблюдались при сильных инструментально зарегистрированных землетрясениях Станового нагорья вблизи района исследований - Муйском (27.06.1957 г., M=7.1), Нюкжинском (05.01.1958 г., M=6.5) и Олекминском (14.09.1958 г., М=6.4). О том же свидетельствует серия палеосейсмогенных структур, зафиксированных в пределах Кодаро-Удоканской зоны. В непосредственной близости от района исследований располагаются несколько известных палеосейсмодислокаций – Баронка, Довачан, Сюльбанская, Верхнесакуканская, Чина-Вакатская [10, 11]. Сотрясения при связанных с ними палеоземлетрясениях достигали 9-10 баллов. Таким образом, территория характеризуется высокой сейсмической активностью в разрезе голоценового и современного этапов развития. Уровень сотрясаемости весьма высок, его можно отнести к потенциально важным факторам накопления твердой фазы селей.

Проведенное нами исследование позволяет рассматривать позднекайнозойскую геодина-мику, разломообразование и сейсмичность как важнейшие факторы формирования условий для селеобразования на южных склонах хребта Кодар. Сейсмотектонические процессы создали и продолжают активно создавать общие фоновые и прямые предпосылки селеформирования в результате повышения базиса эрозии и землетрясений, определяющих формирование очагов накопления твердой составляющей селей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ружич В.В. Активные разломы в районе Кодарского тоннеля трассы БАМ // Сейсмотектоника и сейсмичность района строительства БАМ. М.: Наука, 1980. С. 77–86.

2. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника / Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. 207 с.

3. Геология и сейсмичность зоны строительства БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование / ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука. Сибирское отд-ние, 1985. 191 с.

4. Ружич В.В. О сочетании напряжений растяжения и сжатия в Байкальском рифте // Тектоника и сейсмичность континентальных рифтовых зон. М.: Наука, 1978. С. 27–32.

5. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмичность / С.И. Голенецкий, В.М. Кочетков, А.В. Солоненко и др. Новосибирск: Наука, 1985. 192 с.

6. Голенецкий С.И. Анализ эпицентрального поля и количественные оценки сейсмичности // Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья. Новосибирск: Наука, 1981. С. 19–46.

7. Солоненко В.П. Сейсмическое районирование Восточной Сибири (краткая объяснительная записка к карте 1962 г.). Иркутск, 1963. Т. 151. 30 с.

8. Лапердин В.К., Имаев В.С., Верхозин И.И., Качура Р.А., Имаева Л.П. Опасные геологические процессы на юге Якутии и сопредельных территориях. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2011. 240 с.

9. Лапердин В.К., Тржцинский Ю.Б. Сейсмогенные явления Байкальской рифтовой зоны // Тр. 4-го Международ. инж.-геол. конгресса. Дели, Индия, 1982. С.69–75.

10. Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья / В.П. Солоненко, Р.А. Курушин, С.Д. Хилько. М.: Наука, 1966. 231 с.

11. Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Семенов Р.М., Имаев В.С. Палеосейсмичность Прибайкалья // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36, № 1. С. 7–22.

## SEISMOGEODYNAMICS AS A FACTOR CAUSING MUDFLOWS ON THE SOUTHERN SLOPES OF THE KODAR MOUNTAINS

V.K. Laperdin<sup>1</sup>, V.A. Sankov<sup>1,2</sup>, A.A. Dobrynina<sup>1, 3</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Geological Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

*Abstract.* The paper considers the potential geodynamic and seismotectonic factors (active faults and seismicity) that contribute to the development of mudflows nearby the conjugation zone between the southeastern Chara basin, Kodar Mountains and Muya-Chara interbasin link in the northeastern flank of the Baikal rift system, which, together with the permafrost, hydrological and climate conditions, are related to high degree of mudflow hazard in the area.

Keywords: seismogeodynamics, modern seismicity, paleseismicity, mudflow, Baikal rift system

\*\*\*

УДК 551.4

# НАПРЯЖЕННОСТЬ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК И ОПАСНЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИТИХООКЕАНЬЯ

Е.В. Лебедева

Институт географии РАН, Москва, Россия

Аннотация. На территорию Дальнего Востока России составлена карта природно-обусловленной геоморфологической напряженности масштаба 1:8000000. Под геоморфологической напряженностью понимается предрасположенность территории к развитию катастрофических геоморфологических процессов. Напряженность оценивается в условных

баллах согласно региональному уровню обобщения. Оценка базируется на анализе сейсмичности, глубины расчленения рельефа, количества осадков и спектра доминирующих экзогенных процессов. Величина геоморфологической напряженности на Дальнем Востоке России колеблется от 3 до 16 баллов: в Западном Приохотье ее максимальные значения не превышают 7–10 баллов, на Сахалине достигают 10–12 баллов, на востоке Камчатки –13–15 баллов, на отдельных островах Курильской гряды – 16 баллов.

*Ключевые слова:* геоморфологическая напряженность, геоморфологическая обстановка, катастрофический процесс, окраинно-континентальный горный пояс, Дальний Восток

Дальний Восток относится к числу регионов, подверженных более интенсивному развитию катастрофических процессов: согласно статистике, число чрезвычайных ситуаций здесь примерно в два раза больше, чем в среднем по России [1]. Территории, характеризующиеся предрасположенностью к катастрофическому развитию процессов рельефообразования, мы предложили называть зонами повышенной напряженности геоморфологических процессов. или обстановками повышенной геоморфологической напряженности [2, 3]. Для таких регионов типично преобладание рельефа с высокими скоростями морфогенеза, наличие геоморфологических процессов, которые могут развиваться катастрофически, а также внешних факторов, под действием которых геоморфологические процессы территории экстремальный приобретают характер. Среди эндогенных факторов ведущую роль, бесспорно, играет сейсмичность, среди экзогенных интенсивное выпадение осадков, которое провоцирует широкий спектр катастрофических процессов. Совокупное влияние этих факторов многократно увеличивает вероятность реализации природных катастроф.

Мы предлагаем рассматривать напряженность как готовность геоморфологической системы выйти из состояния равновесия при изменении внешних и/или внутренних факторов с катастрофическим развитием процессов [2]. Подобными зонами повышенной геоморфологической напряженности являются, в том числе, окраинно-континентальные горные системы Притихоокеанья, для которых характерна высокая сейсмическая и вулканическая активность. Нестабильному состоянию геоморфологических систем и активному протеканию процессов рельефообразования здесь способствует глубоко и интенсивно расчлененный рельеф. Важную роль играет климатический фактор – количество и характер выпадения осадков.

изучены Были природные предпосылки напряженности геоморфологических процессов Дальневосточного региона [3, 4] и проведено мелкомасштабное картографирование с количественным учетом интенсивности воздействия провоцирующих природных факторов. Методика составления мелкомасштабных (1:2500000 -1:8000000)геоморфологической карт напряженности подробно была описана нами ранее [2 3]. Геоморфологическая напряженность оценивалась в условных баллах на основе анализа сейсмичности территории, количества осадков, глубины расчленения и спектра доминирующих геоморфологических процессов соответственно региональному уровню обобщения.

Это позволило получить полуколичественную рекогносцировочную оценку и выделить зоны

повышенной геоморфологической напряженности, т.е. участки с максимальными показателями факторов, способствующих активизации процессов морфолитогенеза. Конечно, такая оценка с применением условных баллов является достаточно грубой прикидкой, однако она позволяет выполнить рекогносцировочные исследования и определить наиболее опасные участки – зоны потенциальной напряженности геоморфологических процессов, где в дальнейшем необходимо проведение уже более детальных исследований.

Предварительный анализ природных предпосылок напряженности геоморфологических процессов на российском Дальнем Востоке [4] позволял ожидать преимущественное возрастание напряженности по направлению к Тихому океану в связи с увеличением силы воздействия как эндо-, так и экзогенных факторов – характером проявления современной тектоники и вулканизма, а также с возрастанием влагонасыщенности воздушных масс и близостью основного базиса денудации – уровня Тихого океана. Для выявления закономерностей площадного распределения зон напряженности геоморфологических процессов Притихоокеанья и выделения территорий потенциального риска развития катастроф было проведено картографирование ключевых участков, в качестве которых выбраны Западное Приохотье, Сахалин и Камчатка, в масштабе 1:2500000. По уточненной и доработанной методике составлена карта природнообусловленной напряженности геоморфологических процессов масштаба 1:8000000 на территорию Дальнего Востока России.

R континентальной части юга Дальнего Востока природно-обусловленная напряжен-ность геоморфологических обстановок колеблется от 3 до 10 баллов. Максимальной величины - 10 баллов она достигает на Баджальском хребте, расположенном на стыке Буреинского платформенного массива И Сихотэ-Алинской складчатой области. Он относится к зоне 8балльных землетрясений, глубина его эрозионного расчленения приближается к 1000 м, в год здесь выпадает до 1000 мм осадков, с которыми связаны летние паводки на реках и лавины в горах зимой. На южных склонах сводово-блокового поднятия Станового хребта напряженность достигает 9 баллов. Для этой активизированной окраины Алданского шита co следами плиоценчетвертичного вулканизма характерно глубокое расчленение (до 1000 м), сейсмичность до 7-8 баллов широкий спектр опасных и геоморфологических участков процессов. Для повышенной геоморфологической напряженности континентальной части Дальневосточного региона характерны такие опасные экзогенные процессы, как обвалы и осыпи, сели, лавины и эрозия [5, 6].

Гравитационные процессы дополнительно активизируются под воздействием сейсмических сотрясений. Так, на Баджальском хребте в историческое время имели место сейсмооползни, образовавшие подпрудные озера, а на Становике описаны сейсмогенные трещины и грабены, есть слелы сейсмообвалов.

геоморфологических Напряженность процессов, обусловленных природными факторами, для о. Сахалин колеблется от 6 до 12 баллов, всего здесь выделен 21 район. К территориям с чрезвычайно высокой напряженностью (10-14 баллов) отнесены 11 районов – п-ов Шмидта, Северо-Западная низменность, участки Западно- и Восточно-Сахалинских гор. При относительно небольшой глубине расчленения (редко более 400 м) количество осадков здесь велико и в горах нередко превышает 1000 мм, сейсмическая опасность достигает 9 баллов, степень опасности экзогенных процессов высокая. Среди опасных экзогенных процессов доминируют эрозия, сели, лавины, обвалы и оползни. Селеопасность гор Сахалина оценивается преимущественно как средняя, а лавиноопасность в осевых частях горных хребтов высокая [1].

На Камчатке выделено 48 районов С напряженностью от 7 до 15 баллов, из них 31 был отнесен к территориям с чрезвычайно высокой напряженностью, а 5 (части Кроноцкого и Шипунского полуостровов, хребтов Гамчен и Балаганчик, массивы Корякской и Карымской сопок) – к территориям с катастро-фической напряженностью в 15 баллов. Это участки с глубоко расчлененным рельефом (более 800 м), с годовым количеством осадков более 1000 мм и высокой сейсмичностью (10 баллов), с широким спектром опасных геоморфологических процессов, в т.ч. гравитационных сейсмогравитационных. И Селеопасность оценивается как средняя до высокой, в том числе многочисленны вулканические сели лахары. Лавинная опасность – от средней до очень высокой, активна эрозия, особенно на полях развития эффузивов [1]. За счет возрастания сейсмичности, количества осадков и глубины расчленения напряженность геоморфологических обстановок на некоторых островах Курильской дуги (в т.ч. Итуруп и Кунашир) достигает 16 баллов.

величина напряженности Итак. геоморфологических обстановок в регионе в целом колеблется от 3 до 16 условных баллов. Для Западного Приохотья максимальная геоморфологическая напряженность была оценена в 7-10 условных баллов, Сахалина - в 10-12, Восточной Камчатки – уже в 13-15, а отдельных островов Курильской гряды – в 16 баллов. Проведенные исследования подтвердили выдвинутую ранее гипотезу о нарастании природно-обусловленной территории C3 напряженности сектора Притихоокеанья с запада на восток. Интересно также отметить, что спектр опасных экзогенных процессов в зонах максимальной напряженности как континентальной, так и островной части Дальнего Востока в целом близок, но в силу отличия интенсивности воздействия провоци-рующих факторов различаются масштабы явлений и частота их возникновения.

Таким образом, составленная карта напряженности геоморфологических обстано-вок может рассматриваться как этап изучения и зонирования территории, позволяющий выделить участки, в наибольшей степени подверженные риску развития неблагоприятных экзогенных процессов, что весьма важно для таких неспокойных, но активно осваиваемых регионов, как окраинноконтинентальные горные системы Притихо-океанья. Предложенная методика дает возможность с достаточной степенью объективности выделять участки с факторами, обостряющими процессы рельефообразования: определены зоны потенциальной активизации геоморфологических процессов в районах с высокими показателями глубины эрозионного расчленения, сейсмоопасности и широким спектром активных геоморфологических процессов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Опасные природные процессы Дальневосточного региона России / Под ред. В.В. Разумова, А.П. Притворова. М.: Дизайн. Информация. Картография, 2008. 342 с.

2. Лебедева Е.В. Принципы составления карты напряженности геоморфологических процессов окраинноконтинентальных горных систем Дальнего Востока // Геоморфология и картография: Мат-лы XXXIII пленума Геоморфол. комиссии РАН. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2013. С. 507–511.

3. Лебедева Е.В., Шварев С.В., Готванский В.И. Природно-обусловленная напряженность геоморфологических процессов территории Дальнего Востока России // Геоморфология. 2014. № 4. С.48–59.

4. Готванский В.И., Лебедева Е.В. Влияние природных и антропогенных факторов на напряженность геоморфологических процессов на Дальнем Востоке // Геоморфология. 2010. № 2. С. 26–36.

5. Лебедева Е.В. Катастрофические геоморфологические процессы в приморских районах Западного Приохотья // Геоморфология. 1995. № 4. С. 35–42.

6. Карта современной динамики рельефа Северной Евразии (в пределах России и сопредельных стран). М-б 1:5000000 / Под ред. В.М. Котлякова. М.: ИГ РАН, 2003.

## UNFAVORABLE GEOMORPHOLOGICAL CONDITIONS AND EXOGENOUS HAZARDS AROUND THE PACIFIC RIM

## E.V. Lebedeva

Institute of Geography, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*Abstract.* Naturally unfavorable geomorphological conditions of the Russian Far East have been mapped at a scale of 1:8 million. Unfavorability of geomorphological environment implies that the territory is prone to catastrophic geomorphological processes.

Unfavorability is nominally graded according to the regional level of generalization. The gradation is based on the analysis of seismicity, amount of precipitation, depth of dissection, and spectrum of dominant exogenous processes. Geomorphological unfavorability in the Russian Far East region is graded 3 to 16, ranging from 7 to 10 in the western coast of the Sea of Okhotsk, from 10 to 12 in the Sakhalin, from 13 to 15 in the eastern Kamchatka, and is as high as 16 in some of the Kuril Islands. *Keywords:* geomorphological unfavorability, geomorphological conditions, catastrophic processes, continental marginal mountains, the Far East

\*\*\*

УДК 551.331.21

# РОЛЬ СЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ В ФОРМИРОВАНИИ ЛАНДШАФТНОЙ СТРУКТУРЫ

С.А. Макаров, Ж.В. Атутова

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. В статье представлена схема современной ландшафтной структуры окрестностей поселка Аршан (Республика Бурятия, Российская Федерация). Детально рассмотрены долины ряда рек, последствия схода селей по руслам которых были наиболее разрушительные. Обсуждаются результаты исследования последствий катастрофы. *Ключевые слова:* катастрофа, селевой поток, последствия, ландшафтная структура

В ночь на 28 июня 2014 г. в районе поселка Аршан Тункинского района Республики Бурятия в результате выпадения интенсивных ливневых осадков сошли селевые потоки. Последствия произошедшей природной катастрофы находят свое отражение в современной ландшафтной структуре, которая характеризуется распространением высокогорных гольцовых и подгольцовых, горно-таежных высокогорных и среднегорных, а также подгорных и межгорных понижений таежных геосистем (рис. 1).

Основные изменения ландшафтной структуры в результате схода селевых потоков наблюдаются в долинах реки Кынгарга и основных ее притоков. Катастрофические водонасыщенные отложения склонов и днищ каров сошли по глубоковрезанным долинам рек Артемьева, Первая и Вторая Шихтолайка, Харимта, Малая Харимта и трем безымянным ручьям. До этого ландшафты вышеназванных долин в высокогорной лесной зоне характеризовались распространением лиственничной, местами еловолиственничной растительности; в пределах котловины долинные комплексы были представлены лиственнично-елово-сосновыми, местами лиственнично-березово-сосновыми зеленомошнокустарничково-травяными лесами. После схода селевых потоков растительный покров был практически полностью погребен под мощной толщей крупноглыбового материала. Подобные крупноглыбовые ложбинные комплексы также имеют место на крутых склонах гольцовой и подгольцовой зоны Тункинских Гольцов.

Растительный покров долины р. Кынгарга в пределах окрестностей поселка Аршан до произошедшей катастрофы характеризовался развитием сосновых с примесью березы и лиственницы, местами с ивой и елью лесов, травяно-моховый покров которых в настоящее время покрыт слоем песчаноглинистых отложений. Мощный поток воды вызвал абразию берегов и эрозию днища речной долины. Днище долины р. Кынгарга до схода селя при выходе из гор напоминало обычную горную реку, где в русле располагались многочисленные валуны. После прохождения водокаменного селя в этом месте размыло почти всю обвальную массу, представленную глыбами мраморов, далее аккумулировались гравийно-галечно-песчаные отложения, а затем русло реки заново врезалось в эту толщу.

По левому берегу р. Кынгарга, по нижней тропе, на территории лечебных корпусов курорта «Аршан» поток воды привел к массовому развитию эрозии. В движение вовлекались валуны диаметром до 74 см. В ряде мест отложился супесчаный материал мощностью до 45 см. Мощным потоком воды были вовлечены в движение вывороченные с корнями деревья и кустарники, сформировавшие многочисленные завалы. Линейные объекты хозяйственной структуры (улицы пос. Аршан, автодороги) явились основными направляющими потоков паводковых вод, что привело к подтоплению частных подворий, подмыву дорожного полотна, аккумуляции наносов в лесных массивах и сельскохозяйственных угодьях, прилегающих к автодороге (рис. 2).

Изменения в ландшафтный рисунок окрестностей пос. Аршан грязе- и водокаменные потоки внесли также за счет их влияния на перестройку речной сети рек Харимта и Малая Харимта. В месте разветвления рек Харимта и Малая Харимта, в 4.2 км от автодорожного моста, произошло закупоривание селевыми отложениями русла р. Малая Харимта, после чего днище русла р. Харимта врезалось на глубину более 1 м. Кроме того, русло р. Харимта в нескольких сотнях метров выше развилки рек также было перегорожено селевыми отложениями. Водный поток сместился левее р. Малая Харимта и продолжил свое движение по ранее сухой безымянной ложбине, врезаясь в валунные отложения (рис. 3).



Рис 1. Ландшафтная схема окрестностей поселка Аршан. Геосистемы. Гольцовые и подгольцовые альпинотипные, редколесные: 1 – крутосклоновые кедровые, местами лиственничные редколесные горнокаменистые в сочетании с лугостепными и горнотундровыми комплексами. Горно-таежные высокогорные и среднегорные: 2 - крутосклоновые кедровые, местами лиственнично-кедровые травяно-моховые редкостойные горнокаменистые; 3 – крутосклоновые лиственничные, местами кедрово-лиственничные травяные и лишайниково-моховые редкостойные горно-каменистые; 4 – крутосклоновые сосново-лиственничные, местами лиственнично-сосновые травяные; 5 – крутосклоновые лиственничные, местами сосново-листвен-ничные редкостойные травяные на месте гарей; 6 – крутосклоновые лиственнично-березовососновые мохово-травяные. Подгорные и межгорных понижений (склонов и слабонаклонных днищ котловин) таежные: 7 – березово-лиственнично-сосновые с примесью кедра зеленомошно-кустарничково-травяные; 8 – березово-сосновые с примесью кедра и лиственницы травяно-кустарничково-зелено-мошные; 9 - сосновые с примесью березы и лиственницы кустарничково-травяные на месте бывших сельскохозяйственных угодий; 10 – подрост из сосны с примесью березы разнотравный на месте бывших сельскохозяйственных угодий; 11 – сосновые редкостойные с сосново-березовым подростом разнотравные на месте гарей; 12 - долинные сосновые с примесью березы и лиственницы, местами с ивой и елью травяно-моховые; 13 – долинные лиственничные, местами елово-лиственничные зеленомошно-травяные; 14 – долинные лиственнично-елово-сосновые, местами лиственнично-березово-сосновые зеленомошно-кустарнич-ково-травяные. Антропогенные комплексы: 15 – сельскохозяйственные угодья (пастбища и сенокосы); 16 – селитебные земли (территория пос. Аршан); 17 – автодороги. Последствия прохождения селевых потоков: 18 – зоны транзита наносоводных потоков и аккумуляции взвешенных наносов; 19 – зоны транзита грязекаменных потоков и аккумуляции валунного материала.



Рис. 2. Последствия прохождения наносоводных потоков в долине р. Кынгарга: a – подмытый левый берег,  $\delta$  – разрушенное здание на левом берегу, a – аккумуляция взвешенных песчаных наносов на пойменной террасе левобережья.



Рис. 3. Долина р. Харимта: *a* – участок русла реки, утративший водность после схода грязе- и водокаменного селя, с обозначенным стрелкой новым местом прохождения постоянного водного потока; *б* – древесно-каменные наносы в долине реки; *в* – новое место прохождения постоянного водотока

Отмеченные изменения в ландшафтной структуре имеют долговременный характер функционирования. Для исследования особенностей восстановления ландшафтных комплексов необходимо мониторинговое наблюдение. Кроме этого, целесообразно изучение собственно селевых геосистем ввиду того, что уничтожение растительного покрова, увеличение площади незадернованных склонов, сложенных рыхлыми и крупноглыбовыми отложениями, являются причиной активизации опасных экзогенных процессов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ИОО РГО и ООО «Премьер-Энерго» (Договор № 16/03/02).

## THE ROLE OF DEBRIS FLOWS IN THE FORMATION OF LANDSCAPE STRUCTURE

S.A. Makarov, Zh.V. Atutova

V.B. Sochava Institute of Geography, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* This article presents the contemporary landscape structural pattern for the vicinities of the village of Arshan (Republic of Buryatia, Russian Federation). Detailed consideration is being given to some of the river valleys whose bottoms experienced the most devastating effects of debris flows. The research results discussed here are related to the effects of catastrophic debris flows.

Keywords: disaster, debris flows, consequences, landscape structure.

\*\*\*

УДК 551.311.24(571.54)

## ГРАВИТАЦИОННО-СКЛОНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ТЕРРИТОРИИ ОКИНСКОГО ПЛОСКОГОРЬЯ

Ю.А. Масютина

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Дается краткое описание гравитационно-склоновых процессов, происходящих на Окинском плоскогорье (Восточный Саян). На территории плоскогорья развиваются все виды гравитационно-склоновых процессов: осыпание, обваливание, оползание. На отдельных участках имеют место водно-гравитационные склоновые процессы, происходит формирование небольших селевых потоков. Отмечается, что наибольшее развитие на территории плоскогорья приобрели процессы осыпания, которые приурочены в основном к участкам речных долин, прорезающих базальтовые плато, также осыпи широко развиты на склонах окружающих плоскогорье гор. Отмечено, что наибольшей активностью гравитационно-склоновых процессов характеризуются два участка плоскогорья – крайний северо-запад и крайний юго-

восток. К этим же участкам приурочено наибольшее количество очагов землетрясений, происходящих на плоскогорье. Обращается внимание на то, что гравитационно-склоновые процессы на плоскогорье представляют опасность, поскольку обвалы и осыпи характерны для некоторых участков автомобильной дороги. Лавинной опасностью характеризуются склоны окружающих плоскогорье гор, что представляет угрозу для туристов и для промышленных объектов. *Ключевые слова:* склон, гравитационно-склоновый процесс, плоскогорье, осыпь, обвал

Окинское плоскогорье представляет собой слабоволнистую поверхность с глубоко врезанными в нее долинами водотоков. Средние высотные отметки находятся в пределах 1800–2500 м. Восточная часть плоскогорья в целом является более поднятой и древней мел-палеогеновой поверхностью выравнивания. Западная его часть более выровненная, характеризуется широким распространением базальтовых покровов неогенового возраста. Именно левобережная часть Оки, по выражению С.В. Обручева [1], представляет собой «идеальное плато».

На склонах Окинского плоскогорья развиваются гравитационно-склоновые процессы, активность и интенсивность которых обусловливается совокупным действием многих факторов (углы наклона поверхности, характер отложений и подстилающих пород, увлажненность, сейсмическая активность территории).

Территория плоскогорья имеет сложное геологическое строение, здесь распространены протерозойские и палеозойские граниты, мраморы и известняки протерозоя, неогеновые и четвертичные базальты, аллювиальные и ледниковые четвертичные отложения [3]. Граниты являются наиболее прочными породами, на них в результате физического выветривания формируются характерные для плоскогорья курумы. На крутых склонах в пределах развития базальтов широко представлены осыпи и тела обвалов. Наиболее благоприятны для развития процессов осыпания рыхлые аллювиальные и ледниковые отложения.

Плоскогорье относится к районам 7–8-балльной сейсмической активности. Большинство зафиксированных землетрясений на рассматриваемой территории приурочено к зоне сочленения Окинского плоскогорья с хребтом Кропоткина и к юговосточной части плоскогорья [2]. Землетрясения могут провоцировать развитие гравитационносклоновых процессов: осыпей, обвалов, оползней, а также селей и лавин.

В общем, территория плоскогорья характеризуется преобладанием пологих склонов и широких плоских междуречных пространств. Верховья многих рек (Ока, Гаргана, Улзыты и др.) переработаны в троги и имеют широкие плоские днища, уклоны которых составляют  $2-10^{\circ}$ , на таких участках развиваются склоновые процессы массового перемещения материала – солифлюкция, дефлюкция, обусловленные течением оттаявшего увлажненного грунта по мерзлому субстрату. Результатом морозного выветривания является формирование курумов – характерных для плоскогорья форм морфоскульптуры. Гравитационно-склоновые процессы на данных участках плоскогорья широкого распространения не имеют.

Гравитационно-склоновые процессы развиваются лишь на крутых склонах, которые на территории плоскогорья приурочены в основном к склонам гор, окружающих плоскогорье. На территории плоскогорья можно выделить районы, где гравитационно-склоновые процессы наиболее активны. На северо-западе плоскогорья в зоне его сочленения с хребтом Кропоткина расположена Окинская котловина. Для этой части плоскогорья характерны наибольшие амплитуды высот, что создает благоприятные предпосылки для развития гравитационных процессов. На склонах хребта Кропоткина зафиксированы селевые борозды, осыпи. Крайний юго-восток плоскогорья, где расположена Ильчиро-Китойская котловина, также характеризуется активными гравитационно-склоновыми процессами. На склонах гор отмечено наличие осыпей, селевых прочесов.

Для долин рек левобережья Оки, Тиссы, Диби и их притоков, прорезающих базальтовые неогеновые покровы, характерны прямые крутые склоны 25-45° [4]. Долины этих рек имеют вид теснин и каньонов, в нижних их частях формируются многочисленные осыпи, на некоторых участках зафиксированы обвалы. Правобережная часть плоскогорья, как уже указывалось выше, характеризуется большей расчлененностью рельефа, междуречные участки здесь часто представлены гольцовыми массивами, достигающими абсолютной высоты в 2600 м. На склонах таких гольцов развиваются процессы осыпания. Долины рек правобережья Оки слабо врезаны в поверхность плоскогорья, и лишь в нижних участках течения врез усиливается и начинают развиваться процессы осыпания.

Широкое развитие имеют процессы оползания. Оползания больших масс пород для плоскогорья не характерны, однако в поймах многих рек происходят микрооползни – сплывы, которые начинают формироваться на склонах от 15°. Происходит оползание задернованной части грунта, что приводит к срыву растительного покрова, в результате на аллювиальных отложениях начинают развиваться процессы осыпания. Наиболее характерно такое микрооползание для участков нижнего течения рек Сусер, Сорок, а также для некоторых участков Оки.

Территория Восточного Саяна относится к лавиноопасным районам. На рассматриваемой территории лавины характерны для склонов окружающих плоскогорье хребтов. Лавинной опасностью характеризуются северо-западный и юго-восточный участки плоскогорья. Начало марта 2016 г. для южной части Восточного Саяна ознаменовалось серией сходов лавин. Третьего марта 2016 г. лавина сошла на промышленную зону у устья р. Ильчир, где осуществлялась добыча нефрита. В результате погиб один человек [5].

В пределах плоскогорья гравитационносклоновые процессы представляют опасность в районе автомобильных дорог. Многие участки дороги характеризуются опасностью камнепадов, обвалов. Склоны вдоль дороги на многих участках отличаются большой крутизной, обвалы и осыпи могут приводить к завалам дороги, глыбы камнепадов иногда достигают значительных размеров. На участке автомобильной дороги, соединяющем поселки Сорок и Орлик, зафиксирован обвал, перегородивший дорогу. Сооружения, защищающие дорогу от подобных явлений, на большей ее части отсутствуют.

Таким образом, на плоскогорье в целом гравитационные процессы развиты повсеместно, но приурочены в основном к долинам рек. Тем не менее на плоскогорье можно выделить участки, где гравитационно-склоновые процессы протекают более активно. Это, в первую очередь, северо-западная часть плоскогорья, где находится Окинская котловина. Здесь в связи с наибольшими на плоскогорье амплитудами высот склоновые процессы наиболее активны. Следующий участок – юго-восточная часть плоскогорья, где на склонах, окружающих плоскогорье, развиваются осыпи, небольшие склоновые сели, лавины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Обручев С.В. Восточная часть Саяно-Тувинского нагорья в четвертичное время // Известия ВГО. 1953. № 5. С. 533–546.

2. Николаев В.В., Демьянович М.Г. Сейсмотектоника Окинского плоскогорья // Сейсмогеология восточной части Алтае-Саянской области. Труды Института геологии и геофизики СО АН СССР. Вып. 399. Новосибирск: Наука, 1978. С. 42–48.

3. Карта полезных ископаемых СССР. Восточно-Саянская серия. М 1: 200 000. М.: ГУГК, 1966.

4. Геоморфологическая карта Бурятии / Под ред. Д-Д.Б. Базарова, И.Н. Резанова. М 1:500 000. Улан-Удэ: Геологический институт Бурятского филиала СО АН СССР, 1985.

5. Спасатели завершили поисковые работы в районе схода лавины в Бурятии. – URL.: http://www.interfax.ru/russia/497413 (дата обращения – 3.04. 2016).

## GRAVITY PROCESSES ON THE SLOPES OF THE OKA PLATEAU

#### Yu.A. Masyutina

V.B. Sochava Institute of Geography, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The article provides a brief description of the gravity processes occurring on the slopes of the Oka plateau (Eastern Sayan). The plateau slopes undergo all types of gravity processes: downhill rolling and sliding of rock fragments of different size, landslides, and rockfalls. Some parts of the slopes are subject to the processes involving gravitational water that cause small debris flows. The plateau is dominated by the processes often including falling, sliding, or rolling of individual rock fragments, confined mainly to the river valley segments cutting through the basalt plateaus and to the slopes of their bordering mountains. The article emphasizes that the most intense gravity processes occur on the slopes of the northwesternmost and southeasternmost parts of the plateau. These same parts are characterized by the largest number of source areas of earthquakes occurring on the plateau. Attention is drawn to the fact that the gravity processes on the plateau slopes are an environmental hazard because landsliding and talus slopes extend along some parts of the road. Avalanches can occur on the slopes of the plateau-bordering mountains and pose a threat to tourists and industrial facilities.

The article is of interest to students, post-graduates and specialists in geomorphology and allied disciplines. *Keywords:* slope, gravity processes on the slopes, talus, plateau, rockfall

\*\*\*

УДК 624.131.1+551.3+504.4 (571.53, 282.256.341)

# ОЦЕНКА ЭКЗОГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ РЕКРЕАЦИОННЫХ ТЕРРИТОРИЙ, ОСТРОВ ОЛЬХОН, БАЙКАЛ

#### В.А. Пеллинен, Е.А. Козырева

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Рассмотрены инженерно-геологические условия острова Ольхон. Выделены основные показатели экзогеодинамической опасности исследуемой территории, осложняющие строительство и эксплуатацию различных видов сооружений, а также установлены причины их возникновения. Предложена шкала степени экзогеодинамической опасности с обоснованием высокой, средней и низкой категории для исследуемой территории.

*Ключевые слова:* опасность, экзогеодинамика, геологическая среда, экзогенный геологический процесс, инженерногеологические условия, остров Ольхон, озеро Байкал

Интерес к научным прикладным И исследованиям в области оценки различных природных опасностей во многом объясняется отсутствием в настоящее время альтернативы решению многочисленных геоэкологических, экономических и социальных проблем, связанных с безопасным развитием отдельных территорий, особенно в районах проявления опасных экзогенных геологических процессов (ЭГП). Природные опасности, связанные с проявлением различных ЭГП, определяющие, в конечном итоге, характер и масштаб разрушений инфраструктуры, а также ее уязви-мость, разделяются на катастрофические (сели, паводки, лавины и т.д.) и долговременные (дефляция, карст и т.д.) [1]. Исследование ЭГП, связанных с хозяйственной деятельностью человека, имеет научное и практическое значение. Современное проявление опасных геологических процессов на осваиваемых территориях вынуждает разрабатывать подходы, направленные на снижение экзогео-динамической опасности и взаимодействия технических и природных систем [2]. В Прибайкалье одной из осваиваемых территорий является о. Ольхон (рис. 1), относящийся к национальному Прибайкальскому парку И испытывающий туристско-рекреационный тип нагрузки. На данной территории отдельные ЭГП в геологическом отношении имеют длительную историю развития и группу природных факторов, определивших их возникновение. Однако в течение последних 20 лет антропогенная нагрузка на геологическую среду острова растет в геометрической прогрессии, что способствует возникновению ЭГП, отрицательно новых влияющих на инфраструктурные объекты. Оценка опасности проявления ЭГП на о. Ольхон имеет свои особенности и связана с видом техногенного взаимодействия в процессе создания рекреационной инфраструктуры. В качестве количественного показателя оценки интенсивности проявления ЭГП используется пораженность территории, которая оценивается площадным или линейным коэффициентом. Коэффициент пораженности является не только количественным показателем интенсивности проявления процесса, но и в интегральной форме характеризует взаимодействие всех факторов, степень их влияния на данный процесс [3]. Принципы и методы оценки опасности, проявлением связанные экзо-генных с геологических процессов, в настоящее время разработаны Однако большинство слабо. исследователей придерживаются принципа, основанного на вероятности проявления того или иного процесса в пределах исследуемой территории. Кроме этого, дополнительно учитываются энергетические характеристики процессов (скорость развития, площадь, на которой они проявляются, и т.д.) [4].

инженерно-геологических Анализ условий исследуемой территории показал [5-15], что из всего широкого спектра ЭГП на острове развиваются выветривание, эрозионные, гравитационные, эоловые, карстовые, абразионные процессы и явления. Некоторые из них оказывают негативное влияние на функциони-рование рекреационной инфраструктуры и являются источником природной опасности. Таким образом, цель данной работы заключалась в комплексном изучении ЭГП о. Ольхон для выявления их особенностей при оценке экзогеодинамической опасности. Объектом исследований являются ЭГП острова.

Развитие ЭГП на острове обусловлено различными факторами, а источниками риска могут быть как отдельные ЭГП, так и их совместное проявление. На сегодняшний день на острове локально распространены ЭГП, образованные в результате природно-техногенных влияния факторов. Их возникновение обусловлено, прежде всего, развитием туристической инфраструктуры, а рекреационным строительством именно И прокладкой различных коммуникаций: дорог, линий электропередачи И канализаций. Олнако наибольшее распространение ЭГП связано с природными факторами, определяющими характер локализации и активизации комплекса процессов. К относятся: геологическое строение, ним неотектоника, рельеф и геоморфологические условия (расчлененность, крутизна, длина, форма и экспозиция склонов), климатические условия (температура, атмосферные осадки и интенсивность их выпадения, мощность снежного покрова, глубина промерзания грунтов и скорость снеготаяния), особенности распространения поверхностных и подземных вод, состав и свойства грунтов, структура и состояние растительного покрова.



Рис. 1. Обзорная карта объекта исследования.

Оценка экзогеодинамической опасности. Оценка исследуемой территории заключалась в рассмотрении инженерно-геологических условий (ИГУ) исследуемой территории. Далее на основе анализа картографического, фондового и фактического материала были построены картысхемы, в полной мере отражающие ИГУ района. На основе этих карт-схем была построена шкала экзогеодинамической опасности с обоснованием высокой, средней и низкой категории для острова Ольхон.



Рис. 2. Доля конкретного ЭГП от всей пораженной территории острова.

Для достижения поставленной цели решена следующая задача. Разработана структура электронной базы данных, состоящая из полигоновклеток, которой был присвоен номер и привязаны количественные данные. Созданная система использована для построения серии специальных карт-схем на основе программных продуктов QGIS Golden Surfer [16–18]. И Для получения необходимого количества данных и построения шкалы экзогеодинамической опасности выполнена оцифровка имеющегося растрового материала. Так, данные о геологическом строении острова были получены из геологической карты 1: 200000 масштаба и преобразованы в карту формаций, где все породы разделены на три группы: метаморфические, магматические и нормальноосадочные. Главным принципом объединения в формации является их генезис и определенные инженерно-геологические показатели (физикохимические, физические, деформационные, прочностные свойства пород И т.п.) [7]. Картирование распространения ЭГП выполнено на основе анализа космических снимков 2012-2014 гг. с разрешением 0.5 пикселя на метр. На основе данных растра были оконтурены и подсчитаны площади распространения основных типов ЭГП на территории острова (рис. 2). Морфо-метрические данные рельефа (крутизна и экспозиция склонов, эрозионное расчленение) получены в результате обработки цифровых SRTM снимков. Часть данных собрана в ходе ежегодных инструментальных измерений на ключевых участках экзогеодинамического мониторинга геологической среды острова Ольхон.



Рис. 3. Карта-схема распространения карстующихся пород и нормально-осадочных отложений (составлена по данным В.И. Устинова и др. [20]). 1 - современные аллювиальные, озерные, озерно-болотные, пролювиальные и эоловые отложения, представленные галечником, супесями, песками, суглинками и глинами; 2 нижнечетвертичные озерные и пролювиальные отложения, представленные песками, суглинками и глинами; 3 – миоценовые озерно-болотные отложения Халагайской свиты, представленные глинами карбонатными глинами, суглинками, супесями и песками; 4 - карстующиеся породы Ижемейской и Чернорудской свит, представленные сильно выветрелыми бурыми мраморами, графитовыми мраморами и кальцефирами; 5различные комплексы магматических и метаморфических пород раннепалеозойского возраста, представленные в основном сланцами, гнейсами, габбро, габбро-диоритами, амфиболитами, кварцитами и пегматитовыми жилами.

В составленной шкале экзогеодина-мической опасности выделены три степени: высокая, средняя и низкая. Они определялись по следующим критериям: распространение И мощность нормально-осадочных пород, представленных озерно-болотными, эоловыми, делювиальными, пролювиальными отложени-ями неогенчетвертичного возраста И карстую-щимися породами раннепалеозойского возраста [19] (рис. 3). Эти отложения являются основной средой развития главных ландшафтно-формирующих экзогенных геологических процессов. Следовательно, наличие в пределах района подобных отложений будет напрямую влиять на степень опасности. Вторым показателем опасности является крутизна склонов, которая определяется главным образом историей развития рельефа Приольхонья. Крутизна склонов играет определяющую роль в развитии рельефа, обусловливая возникновение различных ЭГП в пределах склона, а также особенности их проявления и энергию. На острове наиболее развиты склоны с крутизной 5, 10, 15, 20, 35, 60 и 75°, на которых развивается подавляющее большинство ЭГП (рис. 4.).

Третьим показателем опасности, по отношению к природным нагрузкам, является деятельность атмосферных, поверхностных, подземных и техногенных (утечки) вод. Оценка выполнялась по выделению площадей распространения заболоченности и подтопления территории. По данным дешифрирования космоснимков 2006, 2008, 2013 гг. и топоосновам масштаба 1: 50 000 нами были выделены предполагаемые заболоченные территории. В ходе полевых работ эти участки были

уточнены. Также установлено, что болота на территории острова отсутствуют, поскольку измеренные на всех участках мощности торфа не превышают 30 см [21]. Все выделенные участки можно отнести к заболоченным и территориально разделить на два вида. Одни примыкают к северодругие находятся в запалному побережью, понижениях горной части острова. Наиболее заболоченными являются территории, примыкающие к заливам Хужирский, Сарайский (западная часть), Харалдайский (восточная часть), Баян-Шунген (западная часть), Хага-Яман, а также к урочищам Ургентей и Ташкиней. Динамика заболачивания этих земель, а именно колебание уровня воды, меняется год от года и зависит от нескольких факторов: динамики подземных вод, экстремальных осадков (локальных ливней), уровня Байкала, деградации перелетков или многолетнемерзлых пород (ММП).



Рис. 4. Карта-схема углов наклона поверхности острова Ольхон. *1* – склоны с крутизной менее 15°; 2 – склоны с крутизной от 15 до 35°; *3* – склоны с крутизной более 35°.

ттт



Рис. 5. Карта-схема пораженности ЭГП территории острова Ольхон. 1 – территория с единичными проявлениями ЭГП на элементарную площадь, км<sup>2</sup>; 2 – территория с пораженностью ЭГП до 10 % на элементарную площадь, км<sup>2</sup>; 3 – территория с пораженностью ЭГП от 10 до 25 % на элементарную площадь, км<sup>2</sup>; 4 – линейные сооружения (дороги, линии электропередачи); 5 – населенные пункты, в которых находятся туристические базы отдыха, гостиницы; 6 – остановочный пункт паромной переправы.

Четвертым показателем опасности является развитие экзогенных геологических процессов, которое оценивалось через пораженность ЭГП. Для этого были проанализированы космические снимки 2006, 2008, 2013 гг. совместно с натурными исследованиями, что позволило построить картусхему пораженности ЭГП для территории острова (рис. 5). На основе анализа этих показателей построена шкала степени экзогеодинамической опасности для территории острова Ольхон (таблица).

	шкала степени экзогеодинамической опасности для острова Ольхон
Степень риска	Характеристика степени экзогеодинамической опасности острова Ольхон
Низкая	Мощность рыхлых отложений (элювий, делювий) не превышает одного метра или же полностью
	отсутствует. Крутизна склонов изменяется до 15°. Отсутствие заоолоченности и разгрузки родников.
	Единичные проявления различных типов процессов небольшой интенсивности и малой активности:
	динамика развития процессов практически не отмечается.
Средняя	Распространение карстующихся пород, лессовидных грунтов и других отложений четвертичного
	возраста. Крутизна склонов изменяется от 15 до 35°. Отмечаются небольшие заболоченные участки без
	свободного зеркала воды. На территории отмечаются денудационные процессы (плоскостной смыв),
	единично гравитационные. На останцах, обнажениях и клифах, сложенных метаморфическими
	породами чернорудской свиты, отмечаются кавернозность, небольшие гроты, полости и пещеры. На
	склонах, сложенных этими породами, единично проявляются небольшие, до 5 м в диаметре, воронки.
	Пораженность до 10 %.
Высокая	Мощность рыхлых отложений превышает 20 м. Распространение неогеновых глин, четвертичных
	суглинков, карстующихся пород с формами процесса (каверны, пешеры, воронки) и разновозрастных
	кор выветривания. Крутизна склонов более 35°, Заболоченность территории с открытыми зеркалами
	волы в виле небольших озершов и кочкарником разгрузка полземных вол в виле ролников
	Распространение ММП или передетков представлено в виде солифлюкции полигональности и пучения
	попространение или перенское споженици кристаллическими породами отменаются полнинения
	труннов в пределах клифов, сложенных криставлическими породами, отмечаются повышенная
	прещиноваются и наличие у подножия неокатанного материала, образованного вследствие обрушения
	или осыпания массива. Оползневые цирки имеют следы повторного смещения, борта оврагов и
	аоразионный оерег, сложенные рыхлыми породами, не задернованы. Наличие динамики у эоловых
	полей. Пораженность от 10 до 25 %.

Таким образом, проанализировав ИГУ всей территории острова, с учетом полученной шкалы, можно сделать вывод о том, что большая часть

побережья острова, а именно западная, от оз. Ханхой до м. Нюрга, имеет высокую степень экзогеодинамической опасности. Все это говорит о том, что территория острова, а особенно его прибрежная часть, требует грамотного подхода при ее освоении и использовании в туристскорекреационных целях. Отметим, что количественная оценка экзогеодинамической опасности должна базироваться на тщательном анализе ИГУ, а также факторов, обусловли-вающих развитие опасных ЭГП как природного, так и техногенного генезиса. Такая оценка крайне важна для грамотного развития особоохраняемых территорий. Результаты по состоянию грунтов были получены на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

Исследование выполнено при финансовой поддержке программ ФАНО № VIII.78.2. (0346-2014-0009) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16–55–44031– Монг а»).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рагозин А.Л. Оценка и картографирование опасности и риска от природных и техноприродных процессов (история, методология, методика и примеры) // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1993. №. 3. С. 16–41.

2. Леви К.Г., Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А. К оценке тектонического экзогеодинамического риска деформаций и разрушения трубопроводных систем в условиях Восточной Сибири // Современная геодинамика и опасные процессы в Центральной Азии. Вып. 5. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2006. С. 653–661.

3. Литвин В.М. Региональная инженерно-геологичес-кая оценка ЭГП юга Восточной Сибири: Дис. ... канд. геол.мин. наук. Иркутск, ИЗК СО АН СССР, 1989. 21 с.

4. Трофимов В.Т., Герасимова А.С., Красилова Н.С. Устойчивость геологической среды и факторы, ее определяющие // Геоэкология. 1994. № 2. С. 18–28.

5. Гречищев Е.К., Ладохин Н.П., Леонтьев О.К., Мякокин В.С. Карта геоморфологии и динамики берегов // Атлас Иркутской области. Москва – Иркутск: ГУГиК, 1962. С. 108–109.

6. Лут Б.Ф. Геоморфология дна Байкала и его берегов. М.: Наука, 1964. С. 5–123.

7. Инженерная геология Прибайкалья / Отв. ред. Г.Б. Пальшин. М.: Наука, 1968. 191 с.

8. Лещиков Ф.Н., Спесивцев В.И., Мирошниченко А.П. Оползневые деформации на берегах острова Ольхон // Береговые процессы в криолитозоне. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1984. С. 71–77.

9. Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А., Мазаева О.А., Хак В.А. Современная экзогеодинамика юга Сибирского региона. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. 155 с.

10. Уфимцев Г.Ф., Сковитина Т.М., Потемкина Т.Г., Филинов И.А., Щетников А.А. Узоры байкальских берегов // География и природные ресурсы. 2009. № 4. С. 12–19.

11. Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Щипек Т., Пеллинен В.А. Солифлюкционные оползни побережья острова Ольхон // Вестник ИрГТУ. 2011. № 4. С. 41–49.

12. Пеллинен В.А. Опасные инженерно-геологические процессы береговой зоны о. Ольхон // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы Всерос. совещ. и молодеж. шк. (23–29 сентябрь 2012 г.). Иркутск, 2012. Т. 2. С. 113–115.

13. Козырева Е.А., Пеллинен В.А., Мазаева О.А., Хабидов А.Ш. Типы берегов острова Ольхон на озере Байкал // Геоморфология. 2014. № 3. С. 74–84.

14. Лапердин В. К., Качура Р.А. Геодинамика опасных процессов в зонах природно-техногенных комплексов Восточной Сибири. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2010. 321 с.

15. Хименков А.Н., Власов А.Н., Сергеев Д.О., Козырева Е.А., Рыбченко А.А., Пеллинен В.А. Влияние криогенеза на развитие склоновых процессов степных территорий Прибайкалья // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2015. № 6. С. 535–542.

16. Аузина Л.И. Комплексный показатель как основа устойчивости подземной гидросферы // Город: прошлое, настоящее, будущее. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 152–158.

17. Пеллинен В.А., Щербина А.Н., Щербакова Ю.А. Эволюция подземной гидросферы центральной части территории г. Иркутска под влиянием техногенных нагрузок // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: Сборник избранных трудов НПК. Вып. 8. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. С. 190–195.

18. Пеллинен В.А. Районирование территории о. Ольхон по группам экзогенных геологических процес-сов // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (20–21 марта 2014 г.). Вып. 16. М., 2014. С. 319–323

19. Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V. The Olkhon geodynamic proving ground (Lake Baikal): high resolution satellite data and geological maps of new generation // Geodynamics&Tectonophysics. 2010. V. 1, № 4. P. 331–418.

20. Устинов В.И., Калинин Д.И., Шастин О.Б., Кульчицкий А.С. Геологическое строение и полезные ископаемые острова Ольхон. Отчет Ольхонской партии за 1969–1970 гг. Иркутск: Главвостокгеология ИТГУ, ИГЭ МГ РСФСР, 1972. 389 с.

21. Инишева Л.И. Болотоведение. Томск: Изд-во ТГПУ, 2009. 119 с.

# EXOGEODYNAMIC HAZARDS ASSESSMENT OF THE RECREATIONAL AREAS, THE OLKHON ISLAND, LAKE BAIKAL

#### V.A. Pellinen, E.A. Kozyreva

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. Consideration is being given to engineering-geological conditions of the Olkhon Island. Several criteria have been highlighted for exogeodynamic hazards of the studied area that make construction and operation of buildings difficult, and their

probable causes have been determined. Exogeodynamic hazard scale has been proposed providing substantiation of high, medium, and low categories for the studied area.

*Keywords:* hazard, exogeodynamics, geological environment, exogenous geological processes, engineering-geological conditions, Olkhon Island, Lake Baikal

\*\*\*

## УДК 550.34:504.53.06

# СЕЙСМИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ

## И.Н. Соколова, Н.Н. Михайлова

Институт геофизических исследований, Алматы, Казахстан

Аннотация. Сейсмические станции кроме тектонических землетрясений могут регистрировать множество других явлений естественной природы, вызванных экзогенными процессами. К ним относятся сход снежных лавин, сели, оползни, обвалы, ледовые землетрясения и др. Сигналы от них зачастую так и остаются нераспознанными на сейсмограммах и относятся к разряду сейсмических помех. На основе детального анализа данных станций Северного Тянь-Шаня установлен характерный вид записей от таких источников, описаны их параметры, проведено сравнение их записей с сейсмограммами взрывов и землетрясений.

Ключевые слова: экзогенный процесс, сейсмограмма

В настоящее время на территории Центральной Азии существует большое количество широкополосных сейсмических станций, данные которых передаются в реальном режиме времени в Казахстанский национальный центр данных в г. Алматы. В Центре данных ведется круглосуточный мониторинг сейсмических событий разной природы; в первую очередь, это землетрясения и промышленные взрывы. Остальным сигналам, присутствующим на сейсмограммах, традиционно практически не уделяется внимания. Они не идентифицируются и зачастую просто относятся к разряду помех. Существуют события, ошибочно обрабатываемые как тектонические землетрясения, но не являющиеся таковыми.

В последние годы в КНЦД удалось изучить волновую картину некоторых классов природных (нетектонических) явлений и точно идентифицировать их. Значительную часть таких событий составляют экзогенные процессы в районе Тянь-Шаня. Получены записи таких явлений, как сход снежных лавин и оползней, прохождение сильных селей. Тысячи слабых событий, ранее входивших в каталоги землетрясений, в настоящее время идентифицируются как ледовые и ледниковые землетрясения.

Оползни. По записям северо-тяньшаньских станций отобраны сейсмические записи оползней, произошедших в предгорьях Заилийского Алатау вблизи г. Алматы. Большинство зарегистрированных оползней произошли в бассейне р. Талгар и были зарегистрированы только станцией Талгар на расстояниях от 100 м до 6.8 км, но два самых мощных оползня 13.03.2004 г. зарегистрированы сейсмическими станциями TLG, K-B, MDO и TGN на расстояниях до 39 км. Была оценена кажущаяся скорость распространения сейсмических волн, генерируемых оползнем: *v*~1.6 км/с.



Рис. 1. Сравнение сейсмических записей событий разной природы: верхняя – тектоническое землетрясение 20 июня 1997 г. ( $t_0$ =20:07:05.6); средняя – карьерный взрыв 23 июля 1997 г. ( $t_0$ =4:56:51.0); нижняя – оползень 13 марта 2004 г. ( $t_0$ ~19:22). Вертикальная компонента. Станция Талгар.

Исследованы динамические и кинематические параметры сейсмограмм, проведено сравнение волновой картины оползней с «традиционными» источниками, такими как взрывы и землетрясения. На рисунке 1 сравниваются сейсмические записи событий разной природы, при примерно одинаковом эпицентральном расстоянии относительно станции Талгар. В отличие от записей взрыва и землетрясения, где максимум амплитуды достигается на первых секундах события, запись оползня не имеет четкого первого вступления, характеризуется медленным нарастанием амплитуд и является самой низкочастотной. Спектр, рассчитанный по волновой картине оползня, существенным образом отличается от спектров взрывов и землетрясений, он имеет два локальных максимума: 0.6-0.8 и 1 Гц. Сейсмические записи взрывов и землетрясений являются гораздо более высокочастотными [1].

По сейсмическим записям, полученным северотяньшаньскими станциями, были замерены максимальные амплитуды смещений (A) (фильтр 0.6 Гц), найдены отношения максимальных амплитуд к объему сошедшей оползневой массы (V), получена зависимость A/V от расстояния до оползня.

Уравнение линейной регрессии для построенной зависимости имеет вид:

#### $lg(A/V) = -0.66314 - 2.8374\Delta$ , R=-0.96,

где A – амплитуда смещения грунта (нм), V – объем оползневой массы (м<sup>3</sup>),  $\Delta$  – расстояние в км, R – ко-эффициент корреляции.

Наблюдается ярко выраженная линейная зависимость параметра A/V от расстояния. Отсюда следует важный практический вывод: существует принципиальная возможность быстрой оценки объема сошедшего оползня на основании анализа динамических характеристик сейсмограмм [1].

Лавины. В апреле 2010 г. центральноазиатскими сейсмическими станциями был зарегистрирован рой необычных событий в районе Таласского хребта, за 3 часа произошло 22 события, которые проидентифицированы как снежные лавины. На рисунке 2 приведена сейсмограмма одного из таких явлений. Длительность записи схода лавин гораздо больше, чем тектонических землетрясений. Для ряда событий с K>8 удалось построить фокальный механизм для лавин – тип подвижки определен как сброс. Интерпретация сейсмических записей снежных лавин позволяет достоверно определить место, точное время и хронологию событий.



Рис. 2. Сейсмограмма снежной лавины 19 апреля 2010 г., 19-55-30.7, Таласский хребет. Станция Манас.



Рис. 3. Сейсмическая запись селя 07.07.1963 г., станция TLG, расстояние ~20 км.



Рис. 4. Эпицентры событий по данным КНЦД (2004– 2008 гг.), выделена область ледниковых землетрясений.

Сели. В предгорьях Заилийского Алатау одним из наиболее опасных природных катаклизмов являются сели. Один из примеров – сель 7 июля 1963 г. из верховьев реки Иссык (гора Жарсай), который разрушил естественную плотину в западной части озера, опустошив водоем. Селевой поток унес около тысячи жизней и стал причиной значительных разрушений в городе Иссык. Река Иссык в результате схода селевого потока изменила русло. Иссыкский сель 1963 г. был одним из самых крупных и разрушительных селевых потоков на территории СССР. На рисунке 3 представлена запись селя, зарегистрированного станцией Талгар на расстоянии 20 км. На записи четко выделяются два эпизода схода селя, в 6 и 9 ч по GMT.

Ледниковые землетрясения. Впервые вопрос идентификации природы целого класса необычных сейсмических событий возник в 1999 г. после открытия в Восточном Казахстане новой сейсмической группы Маканчи. Аналитики Центра данных ИГИ РК обратили внимание на то, что практически ежедневно на записях станции наблюдаются очень похожие сигналы, слабой энергии с нечетким вступлением Р-волны. Эпицентры всех событий находятся на расстоянии примерно 500 км от станции Маканчи, диапазон азимутов на эпицентр составляет 185-190° [2]. В сети станций ИГИ РК эти сигналы чаще всего регистрируются сейсмической группой Маканчи и трехкомпонентной станцией Подгорное. Количество таких событий варьируется день ото дня, в определенные периоды может доходить до 50-70 толчков в день. Был составлен каталог этих событий за 2004-2008 гг. (рис. 4). Проведен анализ их пространственно-временного и энергетического распределения. Эпицентры их приурочены к так называемому «высотному» Тянь-Шаню. Известно, что это сейсмически активный район. Все очаги происходящих здесь землетрясений коровые, с глубиной менее 30 км. Однако в зоне концентрации исследуемых нами событий эпицентров сильных землетрясений практически не зарегистрировано.

Изучение распределения исследуемых землетрясений по энергетическим классам показало, что в абсолютном большинстве это события с K=6-7. Меньшие по силе события здесь просто не регистрируются представительно. Наблюдаются четкие суточные и сезонные вариации количества таких толчков. Вполне логично было предположить, что такие изменения связаны с изменением температуры в течение суток и в течение года.

Расположение области эпицентров таких землетрясений, как показали космические снимки, совпадает с расположением известных грандиозных ледников Западного Китая. С областью постепенного уменьшения высот горных хребтов на восток от максимально высокой его части совпадает и область максимальной концентрации событий. Было сделано предположение, что регистрируемые события являются не тектоническими, а ледниковыми землетрясениями. На это указывает их приуроченность к области самых больших ледников Тянь-Шаня, связанные с изменением температуры вариации количества толчков, а также близкая к нулевой глубина событий.

К исследованию волновой картины записей этих событий были привлечены данные северотяньшаньских станций: Кетмень, Шалкаде, Подгорное (рис. 5) и Кенсу. По волновой картине записей все события из рассматриваемого района можно разделить на два класса. К первому относится большинство регистрируемых землетрясений. Это приповерхностные события с классами энергии *K*=5–7.



Рис. 5. Сейсмическая запись ледникового землетрясения 22.03.2015 г., станция Подгорное, расстояние ~160 км.

Несмотря на то, что в первых вступлениях регистрируются прямые *P*-волны, они, как правило, очень нечеткие (так же, как и по Маканчи). *S*-волна выделяется более четко. Отсутствие четких вступлений *P*-волн не позволяет определить механизм очагов таких землетрясений с использованием стандартной методики. Возможный механизм событий с подобным типом записей описан в литературе и связывается с ледниковыми сейсмическими событиями, возникающими при разрушении льда при растяжении, их источником является раскрытие трещин близ поверхности ледника при понижении температуры.

Тектонические землетрясения отличаются большей глубиной. Доля их в общем числе событий незначительна.

Удалось изучить площадное распределение событий с разной волновой картиной. Так, для событий на периферии зоны после прямой *S*-волны отсутствуют другие типы волн, типы механизмов – взбросы или сбросы [3]. Эти землетрясения связаны со сложной системой разломов и являются коровыми землетрясениями. Другой тип событий: вдоль долин рек цепочками вытянуты эпицентры событий,
на записях которых присутствует волна Rg. Как правило, это сбросы. Эти события поверхностные, связаны с ледниками, возможно со сходом ледников и их обрушением. Третий тип: в области максимальной концентрации эпицентров наблюдается волновая картина с Rg и дополнительной волной и все типы механизмов очагов. Это поверхностные очаги, определенно связанные с ледниками.

Правильная интерпретация записей нетрадиционных сейсмических источников и исключение их из сейсмических бюллетеней позволяют улучшить качество каталогов и более точно оценивать параметры сейсмического режима.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соколова И.Н., Шепелев О.М. Идентификация оползней на сейсмограммах // Вестник НЯЦ РК. 2005. Вып. 2 (22). С. 165–168.

2. Михайлова Н.Н., Комаров И.И. Ледниковые землетрясения Центрального Тянь-Шаня // Вестник НЯЦ РК. 2009 Вып. 3. С. 120–126.

3. Полешко Н.Н., Михайлова Н.Н. Механизмы очагов змлетрясений в зоне ледникового Центрального Тянь-Шаня // Вестник НЯЦ РК. 2012. Вып. 1. С. 61–67.

## SEISMIC RECORDING OF EXOGENIC PROCESSES AT NORTHERN TIEN SHAN

I.N. Sokolova, N.N.Mikhailova

Institute of Geophysical Research, Almaty, Kazakhstan

*Abstract.* In addition to tectonic earthquakes, seismic stations can also record many other natural processes generated by exogenic processes. These are avalanches, mudflows, landslides, collapses, glacial earthquakes, and others. Signals from these processes seen on the seismograms can often be undetectable and are interpreted as seismic noise. The detailed analysis of the data recorded at the Northern Tien Shan stations has provided the possibility to identify characteristics of records obtained therein, describe the parameters of recorded events, and compare these records with seismograms of explosions and earthquakes. *Keywords:* exogenic process, seismogram

\*\*\*

УДК 551.4

## ПОДВОДНЫЕ ОПОЛЗНИ И ДРУГИЕ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДНА ОЗЕРА БАЙКАЛ ПО ДАННЫМ МНОГОЛУЧЕВОЙ ЭХОЛОКАЦИИ

А.В. Хабуев<sup>1</sup>, М.А. Соловьева<sup>2</sup>, О.М. Хлыстов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Аннотация. Исследования детальной батиметрической карты, полученной в ходе многолучевой эхолокации, позволили обнаружить проявления оползневых процессов на северо-западном склоне Кукуйской гривы. На основе батиметрии удалось выделить и картировать различные типы оползневых структур, подтвержденные сейсмоакустическим профилированием.

Ключевые слова: многолучевая эхолокация, геоморфология, оползень

Байкал - самое древнее (более 25 млн лет) и самое глубокое озеро в мире (1637 м) [1]. В последнее десятилетие ведется активное изучение геологического строения Байкальской котловины и уточнение рельефа дна. В 2009 году в результате исследования дна Байкала многолучевым эхолотом было обнаружено крупное оползневое тело на северозападном склоне подводной возвышенности - Кукуйской гривы [2]. Возвышенность расположена на авандельте реки Селенги, самой крупной из впадающих в Байкал рек. Интенсивное осадконакопление в районе ее дельты способствует активному развитию литодинамических процессов в средней котловине озера, которые имеют не только большое практическое значение (инженерные задачи), но и являются важным фактором осадконакопления.

Кукуйская грива представляет собой вытянутое в северо-восточном направлении поднятие в преде-

лах комплекса авандельты р. Селенги. Грива ограничивается с юго-востока хорошо выраженным глубоким каньоном и характеризуется относительно пологим северо-западным склоном. Возвышенность располо-жена на плоском участке авандельты р. Селенги, интервал средних глубин - 300-350 м. Минимальная глубина над гривой составляет около 190 м. Ее северо-западный склон во многих местах представляет собой стенки отрыва оползневых блоков различных размеров. На его отдельных участках, между изобатами 350 и 400 м, можно отметить резкий перегиб в рельефе дна, вплоть до довольно крутого обрыва высотой 30-80 м. Ниже обрыва склон выполаживается до 6-8°. В интервале глубин 1050-1100 м наблюдается переход от склона авандельты к выровненному, субгоризонтальному дну центральной части котловины озера.



Сейсмофациальная схема верхнего комплекса отложений. *1* – сейсмофация «A-1»; *2* – сейсмофация «A-2»; *3* – сейсмофация «A-3»; *4* – предположительные границы оползневого массива у подножия склона; *5* – стенка отрыва оползневых тел; *6* – границы сейсмофаций; *7* – изолинии рельефа дна (сечение изобат 25 м).

На основе данных многолучевого эхолотирования, а также сейсмоакустических профилей, полученных профилографом и электроискровым источником типа «спаркер» в экспедициях TTR-Class@Baikal в 2014 и 2015 годах, было обнаружено, что современные оползневые процессы в большинстве случаев выражаются незначительной деформацией структуры верхней части разреза и широко развиты в пределах склона гривы. Анализ имеющихся данных позволил выделить три сейсмофации в пределах верхнего комплекса отложений и построить схемы распределения структур, сформированных гравитационными процессами (рисунок). Признаки самого обширного современного оползания обнаружены в северной части Кукуйской гривы. Здесь на данных многолучевой эхолокации фиксируется масштабный оползневой цирк. Размеры цирка в плане – 3.2×3.3 км, высота стенки отрыва достигает 170 м. Положение материала, перемещенного склоновыми процессами при образовании цирка, определялось по повышению у подножия склона напротив цирка. Сейсмоакустические данные позволили уточнить положение оползневого тела и определить, что оно погребено под более молодыми

отложениями, характеризующими спокойную гемипелагическую седиментацию последнего этапа геологического развития района.

Как следует из анализа данных батиметрической съемки и сейсмоакустического профилирования, осадконакопление на северо-западном фланге Кукуйской гривы во многом определялось гравитационным перемещением материала по склону. Оползневые деформации приповерхностных осадков и обнаруженные погребенные тела оползней свидетельствуют о нескольких эпизодах активизации склоновых процессов, разделенных во времени. Современные оползневые процессы в большинстве случаев выражаются незначительной деформацией структуры верхней части разреза и широко развиты в пределах склона гривы. Палеооползни представляют собой небольшие одиночные тела, погребенные под толщей слоистых недеформированных отложений. Это свидетельствует о смене характера гравитационных процессов, которая может быть связана с изменением скорости осадконакопления и составом отложений во время ледниковых эпох, а также с колебаниями уровня воды в озере.

#### ЛИТЕРАТУРА

Атлас Байкала / Гл. редактор Г.И. Галазий. М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1993. 160 с.
 Casier R., Naudts L., Cuylaerts, M., Khlystov O., De Batist M. Reassesment of gas hydrate occurrences in Lake Baikal based on the analysis of BSRs on 180 seismic reflection profiles and on the identification of submarine landslides // Book of abstracts of the 10th International Conference on Gas in Marine Sediments, Listvyanka, 2010. P. 95–96.

## UNDERWATER LANDSLIDES AND OTHER GEOMORPHOLOGICAL FEATURES OF THE BOTTOM OF LAKE BAIKAL FROM THE MULTIBEAM ECHOSOUNDING DATA

## A.V. Khabuev<sup>1</sup>, M.A. Solovyeva<sup>2</sup>, O.M. Khlystov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Limnological Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia
<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*Abstract.* The study of the detailed bathymetric map based on a multibeam echosounding survey allowed identifying landslide occurrences on the northwestern slope of the Kukuy Griva. Bathymetry has been used to identify and map the landslide structures of different types, which have been confirmed by seismoacoustic profiling. *Keywords:* multibeam echosounding, geomorphology, landslides

# РАЗДЕЛ V

# ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ КАК ОТРАЖЕНИЕ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ И ГЕОСФЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ. ПРОГНОЗ И ПРЕВЕНТИВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО СНИЖЕНИЮ РИСКА ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

УДК 550.34

# УПРАВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИМ РИСКОМ ПРИ ЗАСТРОЙКЕ ТЕРРИТОРИЙ СО СЛОЖНЫМИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ

Р.Р. Акбашев<sup>1</sup>, И.Н. Василюк<sup>1</sup>, А.Б. Бубнов<sup>2</sup>, Т.Г. Константинова<sup>3</sup>, А.И. Тараканов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ООО «Изыскатель», Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>2</sup> Департамент по недропользованию по Дальневосточному федеральному округу, Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>3</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>4</sup> ООО «ИнжГеоКам», Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация. В статье рассматривается применение инженерных методов защиты зданий и сооружений от сейсмических воздействий в сейсмоопасном регионе (Камчатка). Используются различные методы улучшения инженерногеологических и сейсмических условий площадок строительства: водопонижение, замена слабых грунтов, изменение планировочных отметок, создание уплотненного основания свайным полем. Произошедшие изменения приращения сейсмического балла в результате проведенных мероприятий проверяются проведением инструментальных сейсморазведочных методов оценки сейсмичности. Исследуется поведение зданий при различных инженерно-геологических условиях в результате воздействия сильного Камчатского землетрясения 1971 г.

*Ключевые слова:* сейсмическое микрорайонирование, замена грунта, повышение уровня планировочной отметки, дренажная система, применение свайных фундаментов, конструктивное решение

На территории Российской Федерации в регионах Северного Кавказа, юга Сибири и Дальнего Востока интенсивность сейсмических сотрясений достигает от 8 до 10 баллов по 12-балльной макросейсмической шкале MSK-64. Камчатский полуостров имеет высокую сейсмическую опасность. Для г. Петропавловска-Камчатского, с исходной сейсмичностью 9 баллов по карте ОСР-97А, в зависимости от грунтовых и гидрогеологических условий расчетная сейсмичность площадок строительства изменяется от 8 до 10 баллов. Довольно высокий уровень сейсмичности требует применения специфических конструкторских расчетов проектируемых сооружений, в особенности при расчетной сейсмостойкости выше 9 баллов, когда требуется получение специальных технических условий (СТУ) и проведение сложных конструкторских расчетов. Определяемая расчетная сейсмичность в силу специфичности инженерно-геологических и сейсмических условий может иметь промежуточное значение и незначительные неточности, или же допуски в расчетах изменяют расчетную сейсмичность кратно 1 баллу, причем не обязательно в сторону повышения.

В ряде случаев, при промежуточной расчетной сейсмичности района или близкой к промежуточной, реально возникает необходимость рассмотреть возможность понизить сейсмичность при соблюдении заданного нормативными документами уровня сейсмической безопасности – сейсмического риска. Для этого проводятся специализированные детальные инженерно-геологические и сейсморазведочные исследования. Авторами замечено, что при расчете приращения сейсмической интенсивности за грунтовые условия методом сейсмических жесткостей верхняя низкоскоростная толща до 3 м, характеризующаяся скоростями поперечных волн  $V_{\rm s}$ =100–150

м/с, вносит существенный вклад в приращение сейсмической интенсивности на исследуемой площадке.

В геологических средах, представленных двухслойной геологической моделью, часто верхняя часть разреза состоит из слабых грунтов, относящихся к III категории по сейсмическим свойствам, а нижняя относится ко II категории или даже к I. Положение уровня грунтовых вод в слабых грунтах бывает распространено вблизи поверхности земли. Приращение сейсмической интенсивности может составлять более 0.5 балла, и расчетная сейсмичность повышается до одного балла относительно фонового значения.

Рассмотрим случаи, когда возможно выполнить подготовку инженерно-геологических условий на некоторых площадках застройки. Технологический уровень строительства к настоящему времени заметно возрос, и появились возможности изменения инженерно-геологи-ческой обстановки некоторых площадок. Есть возможности выполнять вырезку слабых приповерхностных грунтов толщиной до 2–4 м, а иногда и более, проводить их замену созданием подушки из высокопрочного ПГС, обеспечить послойное уплотнение его мощными виброкатками с систематическим контролем уплотнения или понизить зеркало грунтовых вод на заданную величину с помощью дренажа глубокого заложения (до 5–7 м).

Названные мероприятия были выполнены на некоторых участках территории г. Петропавловска-Камчатского, и часть бывших 10-балльных зон по карте СМР была переведены в 9-балльные посредством проведения мероприятий строительной подготовки. На отдельных участках выполнялась вырезка слабых приповерхностных грунтов с низкоскоростными параметрами сейсмических волн, засыпка высокопрочных грунтов ПГС и при высоком стоянии УГВ выполнялся дренаж глубокого заложения (до 7 м). По истечении 15-25 лет с момента застройки таких территорий выборочно была произпроверка изменения ведена инженерногеологической и сейсмической обстановки участков застройки и сопряженных с ними площадок. В результате на многих застроенных площадках произошло снижение сейсмичности до 1 балла. Величина приращения сейсмического балла, определенная методом сейсмических жесткостей (РСН 60-86), снижалась до -(0.6÷0.7) балла. Но не во всех геологических разрезах возможно понижение сейсмичности, поэтому часть площадок перевести в зону меньшего уровня сейсмичности не удалось.

Одна из площадок города, расположенная в северо-восточной части г. Петропавловска-Камчатского в 10-балльной зоне, была отведена под строительство храма Преподобного Сергия Радонежского, на ней была выполнена строительная подготовка территории.

Величина приращения сейсмической интенсивности в результате проведения комплексных инженерно-геологических изысканий составила +0.6 балла. В результате комплексного анализа было рекомендовано убрать верхний 4-метровый слой, представленный слабыми грунтами, относящимися к III категории по сейсмическим свойствам ( $V_S \approx 100-150$  м/с), засыпать площадку прочным щебнистым грунтом и послойно уплотнить насыпной грунт. Было рекомендовано понизить УГВ, который располагался на момент изысканий на глубине от 3 м и ниже, путем строительства дренажной системы. Повторно проведенные сейсморазведочные работы подтвердили эффективность принятых мер. Сейсмичность строительсной площадки уменьшилась до 9 баллов.

Вместо забивных свай возможно устройство буронабивных свай большого диаметра, достигающих по глубине высокопрочных несущих горизонтов нижележащего грунта. Применение названных методов требует деликатного и грамотного отношения, однако не каждая строительная организация способна их надежно и ответственно использовать.

Монолитное домостроение создает надежное обеспечение сейсмостойкого строительства. Такое направление, как применение уплотненных грунтовых массивов свайным полем под строящимися зданиями, имеет существенный ресурс сейсмической защиты зданий и сооружений. Применяются весьма эффективные плитные варианты фундаментов и даже свайно-плитные. тудой 7.2. К этому времени территория города до 80 % была застроена зданиями деревянных конструкций. Каменную застройку представляли дома из мелких блоков, крупноблочные, крупнопанельные здания и здания каркасной и комплексной конструкции. Промышленные, портовые сооружения и здания общественного назначения в основном были представлены каркасными строениями, зданиями с неполным каркасом и несущими стенами из мелких, реже крупных блоков.

Результаты макросейсмического обследования повреждений зданий при землетрясении 1971 г. показали, что из обследованных деревянных домов 86 % видимых повреждений не имели или получили легкие структурные повреждения. 1-2-этажные дома из мелких блоков получили такие же повреждения, как и деревянные. Более половины обследованных 3-5-этажных каменных зданий получили повреждения второй степени. В аварийное состояние пришли от 12 до 19 % каменных строений города, но здание производственного холодильника на водонасыщенных грунтах хорошо перенесло сейсмическое воздействие, потому что в его основании было создано поле свай длиной до 20 м. При организации свайного поля под памятник В.И. Ленину в центре города на слабых грунтах происходило уплотнение грунтового массива, грунт выпучивался буграми из-за выдавливания забивными сваями. Поле свай буквально выдавливало грунты в зону меньшего сопротивления, т.е. вверх. Эффективность такого подхода авторами планируется проверять проведением полномасштабных сейсморазведочных работ и оценкой приращения сейсмичности как внутри такого свайного поля, так и за его пределами.

Итак, на Камчатке применяются комплексные системные подходы к управлению расчетной сейсмичности некоторых проблемных в сейсмическом отношении площадок строительства применением предпостроечных подготовительных мероприятий. Такие методологии стали возможны благодаря всестороннему и детальному теоретическому обеспечению определенными видами работ, применению сейсморазведочных методов исследований, проектных конструктивных расчетов и специфических методологий строительства. Систематика такого подхода позволяет расширить ресурс применения комплексных решений при освоении территорий и повысить оптимизацию строительства на проблемных площадках с достаточно надежным обеспечением необходимого уровня сейсмической защиты строительства зданий и сооружений.

Приведем пример последствий сильного Камчатского землетрясения 25 ноября 1971 г. с магни-

# SEISMIC RISK MANAGEMENT AT BUILDING DEVELOPMENT IN DIFFICULT ENGINEERING-GEOLOGICAL CQNDITIONS (KAMCHATKA)

R.R. Akbashev<sup>1</sup>, I.N. Vasylyuk<sup>1</sup>, A.B. Bubnov<sup>2</sup>, T.G. Konstantinova<sup>3</sup>, A.I. Tarakanov<sup>4</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> «Izyskatel» LLC, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Subsurface Management Department for the Far Eastern Federal District, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Kamchatsky Regional Seismological Center, the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> «InzhGeoKam» LLC, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

*Abstract.* The article deals with the use of engineering methods protecting the buildings and structures against destructive effects of earthquakes in seismic regions (Kamchatka). Use is being made of various methods to improve the geological and seismic conditions at construction sites: dewatering, soft ground improvement, change of construction marker positions, and soil compaction in a pile field base.

The measure-caused changes in seismic intensity increment are checked using field survey methods for seismic assessment. A study has been made of the geotechnical behavior of buildings under the effect of the strong Kamchatka earthquake of 1971. *Keywords:* seismic microzoning, ground improvement, changing the construction marker positions to more appropriate, drainage systems, use of pile foundations, constructive decisions

\*\*\*

УДК 550.2

## МИКРОМЕТЕОРИТЫ ИЗ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА БАЙКАЛ В РАЙОНЕ БУГУЛЬДЕЙСКОЙ ПЕРЕМЫЧКИ

Е.В. Антипин<sup>1</sup>, Н.И. Акулов<sup>1</sup>, Е.Г. Вологина<sup>1</sup>, Л.А. Павлова<sup>2</sup>, С.С. Воробьева<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

*Аннотация.* Представлены результаты исследования микрометеоритов в современных донных отложениях озера Байкал. Приведены первые данные о строении и составе исследованных микрометеоритов. По данным микрозондового анализа, они содержат Fe, O, C и Zn.

Ключевые слова: озеро Байкал, донные отложения, микрометеорит, состав, структура

Ранее нами изучались микрометеориты из верхнеплейстоценовых отложений озера Байкал [1]. В докладе приведены результаты по исследованию 15 микрометеоритов из современных (поверхностных) осадков озера Байкал (рисунок), которые были извлечены из керна грунтовой трубки, поднятой на станции ВАІК11-11 (Бугульдейская перемычка) с помощью научно-исследовательского судна «Ти-тов». Координаты отбора керна – 52°26.547' с.ш. 106°03.018' в.д. Глубина озера в месте отбора донных осадков составляет 450 м.



Микрометеориты, извлеченные из керна ВАІК11-11 из интервалов глубин от поверхности дна озера: 0-5 см – Е; 20–25 см – А, Б, Г, Д; 40–45 см – В.

Бугульдейская перемычка разделяет Южную и Среднюю котловины озера и представляет собой приподнятый участок дна оз. Байкал, сложенный отложениями р. Селенги. Современное осадконакопление здесь происходит в сравнительно спокойных условиях. Кроме того, скорости осадконакопления достаточно высоки – от 0.2 [2] до 0.86 мм/год [3]. Это позволяет проводить высокоразрешающие исследования донных отложений для изучения космического вещества, поступающего на Землю в виде микрометеоритов.

Микрометеориты извлечены из интервалов 0-5 см, 10-15 см, 20-25 см и 40-45 см от поверхности дна озера, затем проанализированы на электроннозондовом рентгеноспектральном микроанализаторе JXA8200. В результате микрозондовых исследований было выявлено, что в составе микрометеоритов главными элементами являются Fe, O, C и Zn. Coдержание железа варьируется от 25.7 до 72.6 %, кислорода - от 1.3 до 38.2 %, углерода - от 4.3 до 53.1 %, цинка – от 0.1 до 32.1 %. Кроме того, некоторые из них содержат Si (до 4.5 %), Cu (до 1.59 %) и Al (до 1.76 %). В малых количествах присутствуют Мп, Mg, Ca и S. По классификации, предложенной О. А. Корчагиным [4], все исследуемые микрометеориты относятся к α-микрометеоритам І типа, так как железо занимает основное место в их составе. Необходимо отметить, что никель в данных микрометеоритах не обнаружен.

Все обнаруженные микрометеориты обладают сферической или близкой к ней формой. Их поверхность в большинстве случаев неровная и покрыта сложным графическим узором. Лишь некоторые микрометеориты имеют идеально гладкую поверхность. Диаметр микрометеоритов колеблется в пределах от 26 до 91 мкм и в среднем составляет 63 мкм. Особый интерес представляет частично разрушенный микрометеорит (рисунок, Д). На его хрупком изломе видны прямоугольные грани раскристаллизованного микрокристалла. Наиболее вероятная причина появления подобных сколов связана с избирательной коррозией, которая прошла вдоль границы микрокристаллов. Установлено, что избирательная коррозия всегда проявляется не только в минеральных агрегатах, но и в обесцинкованных латунных сплавах [5]. В результате потери цинка железомедистые (латунные) сплавы становятся хрупкими и легко разрушаются. Такое коррозионное растрескивание обусловливает хрупкий излом в микрометеоритах. По всей видимости, это происходит в процессе взаимодействия коррозионной водной среды озера и внутренних микрометеоритных напряжений, которое приводит к появлению тре-Трещины обладают межкристаллитным, ЩИН. транскристаллитным или смешанным характером. Важно отметить, что изначально они концентрируются на локальном участке микрометеорита.

В позднеголоценовых осадках озера Байкал присутствует космическая пыль в виде микрометеоритов, количество которой составляет 0.6 % от общей массы минералов тяжелой фракции осадочных отложений.

Все исследуемые современные микрометеориты по составу являются цинково-железистыми и относятся к α-микрометеоритам I типа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Акулов Н.И., Антипин Е.В., Павлова Л.А. Микрометеориты из верхнеплейстоценовых отложений озера Байкал // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2015. № 3 (52). С. 95–104.

2. Кузьмин М.И., Карабанов Е.Б., Каваи Т., Вильямс Д., Бычинский В.А., Кербер Е.В., Кравчинский В.А., Безрукова Е.В., Прокопенко А.А., Гелетий В.Ф., Калмычков Г.В., Горегляд А.В., Антипин В.С., Хомутова М.Ю., Сошина Н.М., Иванов Е.В., Хурсевич Г.К., Ткаченко Л.Л., Солотчина Э.П., Йошида Н., Гвоздков А.Н. Глубоководное бурение на Байкале – основные результаты // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 1-2. С. 8–34.

3. Вологина Е.Г., Штурм М. Типизация голоценовых отложений и районирование бассейна озера Байкал // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 8. С. 933–940.

4. Корчагин О.А. Ископаемые микрометеориты, микротектиты и микрокриститы: методика исследований, классификация и импакт-стратиграфическая шкала // Стратиграфия в начале XXI века – тенденции и новые идеи. Очерки по региональной геологии России. М.: ГЕОС, 2013, вып. 6. С. 112–142.

5. Иванов В.Н. Словарь-справочник по литейному производству. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.

### MICROMETEORITES FROM SURFACE SEDIMENTS OF LAKE BAIKAL NEAR THE BUGULDEIKA LINK

E.V. Antipin<sup>1</sup>, N.I. Akulov<sup>1</sup>, Y.G. Vologina<sup>1</sup>, L.A. Pavlova<sup>2</sup>, S.S. Vorobyova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Limnological Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The paper reports the results of a study of micrometeorites in recent bottom sediments of Lake Baikal. Presented here are the first data on the structure and composition of the studied micrometeorites, for which the microprobe analysis has shown the presence of Fe, O, C and Zn.

Keywords: Lake Baikal, bottom sediments, micrometeorite, composition, structure

\*\*\*

УДК 550.372

## ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАК ОТРАЖЕНИЕ ЛУННО-СОЛНЕЧНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Е.А. Баталева, В.Ю. Баталев

#### Научная станция РАН, Бишкек-49, Киргизия

Аннотация. Представлен анализ результатов магнитотеллурического мониторинга, выполненного при проведении мощного промышленного взрыва (2.8 кТ) в районе Токтогульского водохранилища (Камбарата). Рассмотрены временные ряды вариаций кажущегося электросопротивления, основных и дополнительных импедансов в зависимости от азимута в районе Камбаратинского взрыва и в корреляции с лунно-солнечными приливными воздействиями. Особое внимание уделено вопросам точности определения магнитотеллурических передаточных функций, получаемых при обработке данных мониторинга. Рассмотрены результаты обработки в различных модификациях.

*Ключевые слова:* магнитотеллурический мониторинг, временные ряды, распределение электропроводности, лунносолнечный прилив, Тянь-Шань, земная кора, деформация

Научная станция РАН на протяжении долгих лет разрабатывает методы и аппаратуру для регистрации и анализа изменений физических параметров геологической среды как откликов геодинамических процессов, возникающих в земной коре при техногенных и природных воздействиях [1–3]. Для решения вопроса об эффективности некоторого физического параметра в качестве прогностического необходимо прежде всего исследовать его чувствительность к изменению соответствующих свойств среды. С этой целью был проанализирован отклик на мощный промышленный взрыв (Камбаратинский взрыв в районе Токтогульского водохранилища (рис. 1) мощностью 2.8 кТ) таких параметров, как кажущееся сопротивление и фаза импеданса в зависимости от периода зондирования и азимута [4–6].

Дальнейшие исследования результатов МТмониторинга, полученных в пункте Камбарата, состояли в определении коэффициентов корреляции электромагнитных параметров с лунно-солнечными приливными воздействиями (рис. 1), оценке чувствительности основных и дополнительных импедансов (как реальной, так и мнимой части) к деформациям (рис. 2, рис. 3) и сопоставлении результатов магнитотеллурического зондирования, полученных в режиме синхронной (remote reference) и стандартной обработки азимутального мониторинга.



Рис. 1. Схема проведения Камбаратинского промышленного взрыва (22 декабря 2009 г.): *1* – место взрыва; 2 – расположение магнитотеллурической станции Феникс (Phoenix) MTU 5D; *3* – разломные структуры; *a* – распределение коэффициентов корреляции для вариаций дополнительного импеданса Zxx и вертикальной компоненты лунно-солнечных приливных воздействий в системе полярных координат; *б* – вариации кажущегося сопротивления в зависимости от азимута. Масштаб полярных диаграмм соответствует кругу на карте рельефа.



Рис. 2. Частотно-временные ряды азимутального МТ-мониторинга реальной и мнимой части дополнительного импеданса Zxx в сопоставлении с сейсмичностью для Камбаратинского эксперимента. По горизонтальной оси отложено время в часах, по вертикальной оси – логарифм периода, справа от частотно-временных рядов – эффективные глубины проникновения поля. Интенсивность вариаций показана цветом. Вертикальными линиями показаны моменты землетрясений на расстояниях до 100 км от пункта наблюдения, эпицентры вызванных взрывом землетрясений – около 16 км.



Рис. 3. Высокие значения коэффициентов корреляции компонент тензора импеданса и вертикальной компоненты лунно-солнечных приливных воздействий до землетрясения и их снижение после землетрясения за счет предполагаемых релаксационных процессов. Положительные и отрицательные значения коэффициентов корреляции являются максимальными для кластеров полярных корреляционных диаграмм.

Для феноменологического описания и анализа возможных механизмов взаимосвязи электромагнитных параметров с деформационными процессами нами предложен оригинальный способ построения полярных диаграмм. Его отличие от стандартного заключается в том, что по оси радиусов откладывается период зондирования, или эффективная глубина проникновения поля, а значения амплитуд вариаций электромагнитных параметров или коэффициентов корреляции отображаются цветом или изолиниями. Ось азимутов соответствует направлениям, по которым производится пересчет компонент тензора импеданса. Характер распределения коэффициентов корреляции для вариаций основных и дополнительных импедансов и вертикальной компоненты лунно-солнечных приливных воздействий свидетельствует о взаимосвязи ориентации тектонических нарушений и кластеров полярных диаграмм. Поведение вариаций электромагнитных параметров во времени в зависимости от частоты (глубины зондирования) и азимута имеет сложный характер и зависит от степени присутствия в общем деформационном процессе сейсмотектонических деформаций, периодических лунно-солнечных приливов и других факторов. Эти деформации через некоторые механизмы взаимосвязи [7-9] отражаются в частотновременных рядах вариаций электромагнитных параметров, причем наиболее чувствительными оказались дополнительные импедансы (рис. 3). Обработка материалов мониторинга в режиме синхронной (remote reference) технологии к значительному улучшению качества не привела.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Брагин В.Д., Баталев В.Ю., Матюков В.Е. Электромагнитный мониторинг в сейсмоактивной Северо-Тянь-Шаньской зоне // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. 2008. № 5. С. 269–272.

2. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11, № 4. С. 29–40.

3. Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. Проявление геодинамических процессов в вариациях электропроводности (по результатам магнитотеллурических исследований) // Современное состояние наук о Земле: Материалы международной конференции, посв. памяти В.И. Хаина. М.: Изд-во МГУ, 2011. С. 193–198.

4. Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. Связь вариаций электропроводности с напряженно-деформационным состоянием среды по данным магнитотеллурического мониторинга // Современные проблемы геодинамики и геоэколо-

гии внутриконтинентальных орогенов: Материалы Пятого международного симпозиума, 19–24 июня 2012 г., Бишкек. Москва-Бишкек, 2012. С. 10–16.

5. Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов // Физика Земли. 2013. № 3. С.105–113.

6. Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю. Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженного состояния среды // Геофизические исследования. 2014. Т. 15, № 4. С. 53–64.

7. Bogomolov L., Bragin V., Fridman A., Makarov V., Sobolev G., Polyachenko E., Schelochkov G., Zeigarnik V., Zubovich A. Comparative analysis of GPS, seismic and electromagnetic data on the Central Tien Shan Territory // Tectonophysics. 2007. V. 431. P. 143–151.

8. Брагин В.Д., Мухамадеева В.А. Изучение вариаций анизотропии электрического сопротивления в земной коре на территории Бишкекского геодинамического полигона электромагнитными методами // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы: Материалы Четвертого международного симпозиума 15–20 июня 2008 г. Бишкек-Москва, 2009. С. 74–84.

9. Busby J.P. The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations // Geophysical Prospecting. 2000. V. 48. P. 677–695.

## VARIATIONS OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS AS A REFLECTION OF THE LUNAR-SOLAR EFFECTS AND GEODYNAMIC PROCESSES

## E.A. Bataleva, V.Yu. Batalev

Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek-49, Kyrgyzstan

*Abstract.* Presented here is the analysis of results of magnetotelluric monitoring performed during the powerful industrial explosion (2.8 kT) in the Toktogul reservoir area (Kambarata). Consideration is being given to the time series of the apparent resistivity variations, main and additional impedances depending on the azimuth near the Kambarata explosion and in correlation with lunar and solar tidal influences. Particular attention is paid to the accuracy of determining the magnetotelluric transfer functions obtained from processing of the monitoring data. The data processing results are presented in different modifications. *Keywords:* magnetotelluric monitoring, time series, conductivity distribution, lunar and solar tides, Tien Shan, Earth's crust, deformation

\*\*\*

УДК 550.343.4

# ЗАВИСИМОСТИ ОСНОВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКУЮ ОПАСНОСТЬ

Е.В. Брыжак<sup>1</sup>, В.И. Джурик<sup>1, 2</sup>, А.Ю. Ескин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

Аннотация. Расчетные методы сейсмического микрорайонирования широко применяются при оценке влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. Это связано с их оперативностью и наименьшей трудоемкостью. Кроме того, балльность однозначно не определяет сейсмическую опасность, необходимы данные о преобладающих частотах при сильных землетрясениях, о длительности колебаний, форме спектров колебаний и другие. Но без комплексирования расчетных и инструментальных методов невозможно достаточно точно судить о строении верхней части разреза. Для облегчения этой задачи необходимо установить зависимости основных расчетных параметров. В статье представляются зависимости различных параметров от мощности рыхлых отложений для различных состояний грунта. Было использовано три расчетных модели, для которых мощность верхней части разреза последовательно увеличивалась до 320 м. Максимальные ускорения с увеличением мощности 80 м незначительно меняются, дальнейшее увеличение мощности приводит к снижению значений максимальных ускорений. Резонансные частоты снижаются с увеличением мощности для всех указанных состояний. Зависимости максимальных значений спектра согласуются с отмеченным характером изменения максимальных ускорений, но в то же время несут дополнительную информацию о величинах распределения энергии колебаний на определенных частотах.

*Ключевые слова*: сейсмическая опасность, акселерограмма, сейсмическая модель, максимальное ускорение, резонансная частота

В задачах сейсмического микрорайонирования принято использовать различные расчетные методы, позволяющие приближенно оценить возможные резонансные периоды грунта и вид ожидаемых акселерограмм [1]. Расчетные методы, как наиболее оперативные и менее трудоемкие, широко применяются для оценки сейсмоопасности коренных систем грунт-сооружение, так как к настоящему времени накоплен неоспоримый опыт, свидетельствующий о том, что балльность однозначно не определяет сейсмическую опасность колебаний грунтов при землетрясениях расчетной интенсивности. Для проектирования сейсмостойких сооружений необходимы данные о преобладающих частотах при сильных землетрясениях, о длительности колебаний, форме спектров колебаний и др. [2]. Расчет ответственных сооружений рекомендуется проводить непосредственно с использованием акселерограмм сильных землетрясений, поскольку частотный состав колебаний при слабых землетрясениях, форма их спектров не соответствуют спектральному составу колебаний при сильных землетрясениях. Комплексирование расчетных и инструментальных методов позволяет более точно судить о строении верхней части разреза. Для облегчения этой цели необходимо установить зависимости основных расчетных параметров. Представляются некоторые результаты по получению таких зависимостей. В качестве примера представляются полученные расчетным путем зависимости от мощности рыхлых отложений для их мерзлого, воздушносухого и водонасыщенного состояния. Для этого были использованы модели № 1-3 (таблица) с последующем увеличением мощности рыхлых отложений до 320 м.

						Пар	аметры р	расчетных моделей
№ модели	Тип (состояние грунта)	<i>h</i> (м)	V <sub>Р</sub> (м/с)	V <sub>S</sub> (м/с)	ρ (τ/м <sup>3</sup> )	∆ <i>I</i> (баллы)	А <sub>мах</sub> (см/с <sup>2</sup> ) NS Z	<i>I</i> (баллы)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Мерзлые							
Nº1	Мерзлые	10	2500	1300	2.0	0	424	9
	рыхлые и разрушенные	20	2600	1360	2.1		157	15.7
	Ниже коренные породы	10	2700	1450	2.5			
	(T=0-1 °C)	$\infty$	3000	1600	2.6			
	Талыс	е рыхл	ные воз,	душно-(	сухие			
N <u>∘</u> 2	Рыхлые	2	600	300	1.8	0	510	9
	талые до 20 м	8	800	400	1.9		184	3.8
	Ниже скальные	10	900	450	2.0			
		10	2700	1450	2.5			
		$\infty$	3000	1600	2.6			
	Талые	рыхлі	ые водо	насыщ	енные			
Nº3	Рыхлые	14	1700	520	2.1	+1	888	10
	Водонасыщенные до 20 м	16	1800	560	2.2		258	4.7
	Ниже скальные	10	2700	1450	2.5			
		$\infty$	3000	1600	2.6			



Зависимости  $A_{\max}$  (1), резонансной частоты (2), максимальных значений спектра для горизонтальной составляющей (3), максимальных значений спектра для вертикальной составляющей (4) от мощности рыхлых отложений для моделей  $\mathbb{N}$  1 (*a*),  $\mathbb{N}$  2 (*б*),  $\mathbb{N}$  3 (*в*) (таблица) с последующем ее увеличением до 320 м.

Максимальные ускорения для трех состояний (рисунок, 1) с увеличением мощности от 10 до 40– 80 м или незначительно меняются, или незначительно возрастают как для горизонтальной, так и для вертикальной составляющей. Дальнейшее увеличение мощности рыхлых отложений приводит к снижению интенсивности максимальных ускорений, и это снижение может быть значимым. Некоторое исключение из сказанного приходится на Z компоненту для водонасыщенных отложений.

Резонансные частоты для мерзлого, воздушносухого и водонасыщенного состояния грунтов (рисунок, 2) снижаются с увеличением их мощности для всех указанных состояний, но относительно резкие снижения по величине для равных мощностей наблюдаются при переходе от мерзлых грунтов к талым. Например, для мощности рыхлых отложений, равной 40 м, резонансная частота при переходе от мерзлого к талому воздушно-сухому состоянию снижается от 8 до 2 Гц, а к водонасыщенному состоянию – до 2.7 Гц. Незначительное изменение резонансных частот для двух последних состояний частично можно объяснить сравнимыми величинами значений скоростей поперечных волн.

Зависимости максимальных значений спектра для горизонтальной (рисунок, 3) и вертикальной (рисунок, 4) компонент представлены для фиксированных частот от мощности рыхлых отложений. В общем, они согласуются с отмеченным характером изменения максимальных амплитуд, но в то же время несут дополнительную информацию о величинах распределения энергии колебаний на определенных частотах, связанных со слоистостью разреза и значениями декрементов затухания в каждом слое.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15–17–20000).

# ЛИТЕРАТУРА

1. Сейсмическое микрорайонирование / Отв. ред. О.В. Павлов, В.А. Рогожина. М.: Наука, 1984. 235 с.

2. Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Дреннов А.Ф., Ескин А.Ю. Методика формирования исходного сейсмического сигнала с целью районирования сейсмической опасности городских агломераций (на примере г. Иркутска) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2012. Т. 5, № 2. С. 96–110.

## RELATIONS BETWEEN THE MAIN CALCULATED PARAMETERS IN ASSESSING THE GROUND CONDITIONS IMPACT ON THE SEISMIC HAZARD

## E.V. Bryzhak<sup>1</sup>. V.I. Dzhurik<sup>1, 2</sup>, A.Yu. Eskin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia
 <sup>2</sup> Diamond and Precious Metal Geology Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

*Abstract.* Seismic zoning involves the use of different calculation methods to estimate approximately the potential resonance periods of the soil and the type of the expected accelerograms [1]. Calculation methods are widely used for rapid and easy assessment of seismic hazard to soil-foundation-structure systems, as an undeniable experience gained so far indicates that seismic intensity does not uniquely determine seismic hazard of ground motion during earthquakes of estimated intensity. Seismic design of building structures requires determining the dominant frequencies during strong earthquakes, duration and spectral shape of ground motions, and other characteristics. [2]. It is recommended that analysis of critical structures be made directly on accelerograms of strong earthquakes since the frequency content of weak ground motions and their spectral shape do not correspond to the spectral composition of strong ground motions. The combination of theoretical calculations with instrumental methods provides a better understanding of the structure of the upper section. To do this requires computation of the correlation between the basic design parameters. Presented here are some examples showing how to obtain such correlations. *Keywords:* seismic hazard, accelerogram, seismic model, maximum acceleration, resonance frequency

\*\*\*

УДК 913:528.9+551.435+502.5+627.8.03

# КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ – ВОДОХРАНИЛИЩЕ НА Р. ЭГИЙН-ГОЛ, МОНГОЛИЯ. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Леви К.Г., Мирошниченко А.И.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Рассмотрены предварительные результаты картографического моделирования водохранилища на р. Эгийнгол, Монголия. Приводятся морфометрические характеристики реки и будущего водохранилища. Рассматриваются погодно-климатические изменения в районе озер Северной Монголии и Российского Алтая.

*Ключевые слова*: картографическое моделирование, водохранилище, озерный водоем, морфометрия, погодноклиматические изменения, дендрохронология

Введение. Размышления на тему строительства гидроэнергетических сооружений в долине р. Селенги на территории Монголии существовали уже в 60-х годах прошлого века, но до реализации этих идей дело так и не дошло. В 2012 г. эта идея полу-

чила новое рождение, вылившееся в различные общественные слушанья и предварительные оценки вероятных экологических последствий для р. Селенги и оз. Байкал. История вопроса детально рассмотрена в [1]. При этом, однако, забыли, а Международная экологическая коалиция «Реки без границ» напомнила, что «... Монголия не выполнила заключенные в 2005-2008 годах договоренности с Россией о создании совместной концепции управления охраны бассейна р. Селенги и об участии российских специалистов в оценке воздействий в ходе создания технико-экономического обоснования (ТЭО) ГЭС на Эгийн-гол (приток реки Селенги, которая является крупнейшим притоком Байкала). Как показало российско-монгольское совещание 30-31 марта 2015 года в Улан-Баторе, монгольская сторона явно не будет разрабатывать ТЭО и ОВОС плотин в бассейне Селенги в продуктивном взаимодействии с российской...». Именно это и побудило нас промоделировать ситуацию, не касаясь экологических проблем.

Планы правительства Монголии по созданию комплекса гидроэнергетических сооружений. Для развития производительных сил Монголии правительство озаботилось созданием комплекса гидроэнергетических и мелиорационных сооружений по переброске воды северных рек в Гобийские аймаки (рис. 1). Однако представляется, что эта идея недостаточно продумана. Подобная мысль о переброске стока рек Западной Сибири в Среднюю Азию разрабатывалась в СССР в 50-х годах прошлого столетия [2], но, к счастью, в середине 80-х годов проект был закрыт силами СО РАН. Правда, в нынешнем, XXI, веке, похоже, в России эта идея возрождается вновь.

Водохранилище на р. Эгийн-гол – результат картографического моделирования. В основу моделирования были положены данные радарной топографической съемки (Shuttle radar topographic mission (SRTM3)). Базовые данные – это морфометрические характеристики собственно р. Эгийн-гол и варианты предварительного моделирования будущего водохранилища.

Морфометрические характеристики р. Эгийн-Гол: протяженность реки 475 км от оз. Хубсугул (Хатгал) – высота над уровнем моря 1645 м (50°25'07"N – 100°09'05"E) – до слияния с р. Селенгой – высота над уровнем моря 829 м (49°23'18"N – 103°37'28"E); средний уклон долины – 0.0017; площадь водосборного бассейна – 49100 км<sup>2</sup>.

Предварительные морфометрические характеристики водохранилища на р. Эгийн-Гол: площадь зеркала водохранилища – 125 км<sup>2</sup>, объем водохранилища – 4 км<sup>3</sup>; объем притока воды – 2.85 км<sup>3</sup>/год; объем атмосферных осадков 0.044 км<sup>3</sup> – испаряемость 0.076 км<sup>3</sup> – баланс отрицательный (оценки Г. Ендонгомбо и Б. Болдбаатар, Монголия); по нашим оценкам, площадь зеркала водохранилища – 239.2 км<sup>2</sup>, а объем водохранилища – 9 км<sup>3</sup>. Рассмотрим положение водосборного бассейна р. Эгийн-гол (рис. 2).



Рис. 1. Планируемые к строительству гидроэнергетические сооружения в Монголии [3], фрагмент, заимствованный из результатов советских исследований 1976 г.



Рис. 2. Ситуационная схема природных бассейнов озер Северной Монголии, Российского Алтая и р. Эгийн-гол.

Оценка параметров водохранилища (рис. 3) выполнялась по формулам, используемым при подсчете объема слоя, заключенного между двумя изогипсами рельефа:

призмоид –  $V=((S_1+S_2)/2)\cdot h$ , где V – объем призмы,  $S_1$  и  $S_2$  – площади кровли и подошвы слоя, h – расстояние между кровлей и подошвой слоя;

усеченная пирамида –  $V=(((S_1+S_2+\sqrt{(S_1\cdot S_2)})/3)\cdot h,$ (буквенные обозначения те же самые). Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Многолетние тенденции поведения уровня природных и искусственных водоемов. Отрицательный баланс между объемом атмосферных осадков 0.044 км<sup>3</sup> и испаряемостью – 0.076 км<sup>3</sup> – на р. Эгийн-гол ведет к устойчивому снижению уровня водоема, а впоследствии и уменьшению выработки электрической энергии. С учетом того, что площадь искусственного водоема во много раз превышает площадь исходного водоема – реки, соотношение между этими параметрами существенно увеличится.

К сожалению, уровнемерные данные имеются для ограниченного числа природных водоемов, поэтому косвенной характеристикой погодноклиматических изменений во времени могут служить данные дендрохронологии. Прирост древесины зависит от степени влажности атмосферы, объема выпадающих атмосферных осадков, концентрации  $\rm CO^2$  в атмосфере и инсоляции земной поверхности, т.е. причин, определяющих высоту стояния уровней зеркала водоемов. В качестве примера приведем данные по Онежскому озеру, где параллельно проводились измерения высоты стояния уровня и количества выпадающих осадков (рис. 4).

Анализ дендрохронологических рядов, характеризующих погодно-климатические вариации и зависящие от количества выпадающих атмосферных осадков инсоляции земной поверхности и концентрации CO<sup>2</sup> в атмосфере, позволяет на полуколичественной основе оценить возможное поведение зеркала озерных водоемов по принципу «повышение– понижение» для озер северо-западной части территории Монголии. Проиллюстрируем это на примерах озер Телецкого, Увс-нуур, Хубсугул, Хяргаснуур и Сангийн Далай нуур, располагающихся в окружении водохранилища на р. Эгийн-гол (рис. 5).



Рис. 3. Водохранилище на р. Эгийн-гол – результат картографического моделирования [4].

				Таблица 1. Водохран	илище на р	. Эгийн-гол	
Уровень, м	Площадь уровня, км <sup>2</sup>	Метод оценки «призма» «конус»			067.03	DOLO	
				Толщина слоя, км	Обыем слоя,		
		Средняя плош	адь слоя, км <sup>2</sup>		«призма»	«конус»	
920	181.694	210.448	209.790128	0.01	2.10448	2.097901	
910	149.94	165.817	165.563046	0.01	1.65817	1.65563	
900	127.956	138.948	138.802845	0.01	1.38948	1.388028	
890	107.097	117.5265	117.37194	0.01	1.175265	1.173719	
880	86.3467	96.72185	96.5358266	0.01	0.967219	0.965358	
870	60.6919	73.5193	73.1434035	0.01	0.735193	0.731434	
860	39.2414	49.96665	49.5784331	0.01	0.499667	0.495784	
850	23.5761	31.40875	31.0779764	0.01	0.314088	0.31078	
840	8.3509	15.9635	15.3194841	0.01	0.159635	0.153195	
830	0	4.17545	2.78363333	0.01	0.041755	0.027836	
	Площадь Σ	904.495	899.966716	Объем Σ	9.04495	8.999667	
Водосбор оз. Хубсугул 37142.63 км <sup>2</sup>							



Рис. 4. Колебания уровня Онежского озера – L и количества атмосферных осадков – R. Видно, что вариации обеих характеристик практически синхронны.



Рис. 5. Региональный тренд погодно-климатических изменений в окружающем пространстве водохранилища на р. Эгийн-гол, Монголия. *TR*-index – индекс, характеризующий вариации радиального прироста древесины, *T*уг – годы 1690–1980 гг.

Из рис. 5 следует, что линейный тренд свидетельствует об устойчивом снижении комфортности произрастания древостоев, главным образом за счет снижения влажности и уменьшения объема атмосферных осадков и, возможно, потока солнечной радиации. Это предположение иллюстрируют данные таблицы 2.

Однако на фоне общего снижения комфортности погодно-климатических условий, ведущего к опустыниванию территорий, наблюдаются флуктуации «улучшения–ухудшения» природных условий (нелинейная функция на рис. 5). Заключение. Таким образом, в результате картографического моделирования представилась возможность приближенно воссоздать параметры проектируемого водохранилища на р. Эгийн-гол, Монголия. Но мы не можем обойти ряд настораживающих моментов природно-климатического характера. Сначала обратимся к ведущим экзогенным процессам, которые существенно осложняют общие инженерно-геологические условия (рис. 6, *a*). В данном проекте придется учитывать возможные изменения в среде в процессе эксплуатации водохранилища – при «слабом» почвенном покрове территории не исключается интенсивное заиливание водохранилища.

Таблица 2. Отношение количества осадков к величине испаряемости из [5]

Озеро	<i>R</i> , км <sup>3</sup>	<i>E</i> , км <sup>3</sup>	Ky = R/E *
Увс-Нуур	0.47	3.06	0.154
Хиргис-Нуур	0.178	1.332	0.053
Урег-нуур	0.035	0.195	0.18
Телмен-Нуур	0.036	0.156	0.231
Сангийн-Далай-Нуур	0.003	0.115	0.026

Примечание. Коэффициент увлажнения  $Ky=R/E^*$  – отношение годового количества осадков R к годовой величине испаряемости E для данного ландшафта является показателем соотношения тепла и влаги. Если: Ky>1 – увлажнение избыточное – тундра, лесотундра, тайга;  $Ky\sim1$  – увлажнение достаточное – широколиственные леса;  $Ky\leq1$  – увлажнение недостаточное: при <0.6 – лесостепь, при <0.3 – степь, при Ky>0.1 – полупустыня; при Ky<0.1 – пустыня. Радиационный индекс сухости Kc=E/R – величина, обратная Ky.



Рис. 6. *а* – ведущие экзогенные процессы и формы рельефа в бассейне р. Эгийн-гол [6]; *б* – географическое распределение осадков на территории Монголии [8]; *в* – отношение количества осадков к величине испаряемости [5].

Вторым настораживающим аспектом являются гидрометеорологические характеристики, и в первую очередь характер распределения атмосферных осадков в окрестностях водохранилища (рис. 6,  $\delta$ ) и площадного распределения коэффициента увлажнения (табл. 2 и рис. 6,  $\epsilon$ ) [7]. Именно эти условия будут определять нормальное функционирование гидроэнергетического сооружения. Вероятно, в процессе проектирования водохранилища на р. Эгийн-гол придется внимательно проработать технологии защиты прилегающих территорий от негативного техногенного воздействия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Техническое задание для региональной экологической оценки, и оценки экологического и социального воздействия для проекта "ШУРЭНСКАЯ" ГЭС. – "Mongol Management Center" LLC, Mongolia, 2015. 45 с. Электронный ресурс, 2015: код доступа [www.plotina.net].

2. Шишкин В. Проекты переброски стока северных рек в республики Средней Азии. 17 с. Электронный ресурс, 2015: код доступа [http://www.cawater-info.net/review/pdf/shishikin.pdf] и [http://www.science-techno.ru/nt/article/proekty-perebroski-stoka-severnykh-rek-v-respubliki-srednei-azii?page=show]

3. MISSION REPORT «Reactive Monitoring Mission to Mongolia Concerning the World Heritage Property of Lake Baikal (Russian Federation). Paris, 15 June 2014. 33 p. Электронный ресурс, 2014: код доступа [https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2Fwhc.unesco.org%2Fdocument%2F137186&name=137186&lang=en&c=57 92db6ff7fd]

4. Цифровой рельеф поверхности Земли – Электронный ресурс: код доступа [http://srtm.csi.cgiar.org]

5. Колпакова М.Н. Геохимия соленых озер Западной Монголии. Томск, 2014. Дисс. канд. геол.-мин. наук. 178 с.

6. Экологический атлас бассейна оз. Байкал. Электронный ресурс: код доступа [http://sites3.iwlearn3.webfactional.com/bic/ru/atlas/Atlas%20of%20the%20Baikal%20Basin%20-RUS.pdf/view].

7. Промежуточный отчет по проекту – «Прогнозная оценка долгопериодных изменений водного баланса в бассейне трансграничной реки Селенга в условиях климатических флуктуаций и изменения характеристик водопользования», реализуемого в рамках программы ПРООН-ГЭФ «Комплексное управление водными ресурсами трансграничной экосибассейна Байкала». МГУ, 2015. 78 c. Электронный 2015: стемы M.: pecype, кол доступа [http://istina.msu.ru/projects/11875284/]

8. Буджав Ж. Атмосферные осадки. Год. Карта №64 // Монгольская Народная Республика. Национальный Атлас. – Улан-Батор-Москва, 1990. – С. 56.

## CARTOGRAPHIC MODELING - RESERVOIR ON THE EG RIVER, MONGOLIA. PRELIMINARY RESULTS

#### K.G. Levi, A.I. Miroshnichenko

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The preliminary results of mapping reservoir simulation on the Eg River, Mongolia are considered. We give morphometric characteristics of the river and the future reservoir. the weather and climatic changes in the area of the lakes of Northern Mongolia and the Russian Altai are considered.

Keywords: cartographic modeling, reservoir, lake water, morphometry, weather and climate change, dendrochronology

УДК 551.481.1(285)+551.521.64

## ДИНАМИКА УРОВЕННОГО РЕЖИМА ОЗЕР

К.Г. Леви<sup>1, 2</sup>, А.И. Мирошниченко<sup>1</sup>, Е.А. Козырева<sup>1, 2</sup>, В.И. Воронин<sup>3</sup>, Ф.Л. Зуев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский научный центр СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Рассмотрены причины изменения высоты стояния уровней озер мира. К ним относятся космические и атмосферные процессы. Выполнен статистический анализ морфометрических характеристик озер, установлена периодичность колебаний уровней озер и их группируемость с помощью кластер-анализа. Составлен «Атлас больших озер мира», размещенных в порядке смены широтных климатических поясов Земли, обсуждаются основные закономерности динамики системы озер мира.

*Ключевые слова*: космические лучи, солнечная активность и ее производные, плотность облачного покрова, стерические колебания уровня Мирового океана, уровнемерные наблюдения, дендрохронология, статистические методы анализа

Озера мира в большинстве случаев являются источником водоснабжения, добычи некоторых полезных ископаемых (соли) и гидроэнергетики, поэтому необходимо знать основные закономерности их гидродинамического режима. Источником информации о динамике уровенного режима озер являются постоянные инструментальные наблюдения, но если эти данные отсутствуют, то в качестве подмены можно привлекать материалы дендроиндикации.

Предварительные пояснения – различают колебания уровня озер кратковременные, сезонные, годовые, многолетние, вековые. Наблюдаются в основном два вида колебаний уровня озер: динамические и статические (стерические):

 – динамические колебания уровней возникают под воздействием атмосферных и космических сил (ветер, давление атмосферы, притяжение Луны, Солнца и т.д.), а объем воды в водоемах не меняется.

– статические (стерические) колебания уровня озер и водохранилищ связаны с приходом и расходом воды, с изменением плотности воды с температурой и соленостью, т.е. колебания уровня сопровождаются изменением объема воды в водоемах.

Космические и атмосферные причины колебания уровня озер. Колебания уровня озер обеспечиваются в основном количеством выпадающих атмосферных осадков, которые являются результатом особенностей атмосферной циркуляции. Последняя обусловлена космическими причинами - вариациями плотности потока космических лучей, которая регулируется солнечной активностью, изменением напряженности межпланетного магнитного поля и солнечным ветром. Космические лучи, взаимодействуя с атомами атмосферных газов, приводят к их ионизации, что и способствует формированию трех облачных покровов в атмосфере Земли. Главным из них является тропосферный нижний облачный слой, располагающийся на высоте 2.5-3.0 км. Этот момент иллюстрирует рис. 1. Видно, что плотность облачного покрова и количество выпадающих осадков связаны с плотностью потока нейтронов и находится в противофазе к солнечной активности. Материалы для это раздела заимствованы из [1-3].

Следовательно, в периоды высокой солнечной активности озерные водоемы испытывают дефицит

влаги, что приводит к понижению их уровней (рис. 2). Из рис. 2 следует, что вариации солнечной активности и колебания уровня моря в целом фиксируются в противофазе.







Рис. 2. Сопоставление вариаций солнечной активности W и колебаний уровня Балтийского моря по данным Кронштадтского футштока Sealevel. Утолщенные кривые характеризуют тенденции развития процессов во времени, которые описываются полиномом третьей степени.

Таким образом, тотальное понижение влажности приводит к существенному изменению погодноклиматических условий и автоматически отражается в вариациях параметров дендроиндикации. Именно поэтому данные дендрохронологии являются косвенным показателем изменения уровенного режима озер.

«Атлас больших озер мира». Атлас был составлен для анализа поведения уровней озер во времени, в нем помещены изображения более 50 объектов, приведены основные их характеристики и кривые вариаций уровня озер по данным уровнемерных наблюдений и погодно-климатических изменений по данным дендрохронологии. Ниже мы приводим одну из страниц Атласа (рис. 3).

Статистический анализ параметров озер. При статистическом анализе параметров озерных водоемов использовались их морфометрические характеристики, временные ряды инструментальных наблюдений за их уровнями и данные дендрохронологии, характеризующие погодно-климатические изменения в районе больших озер мира.



Рис. 3. Страница из «Атласа больших озер мира».

Заключение. Галактические и солнечные космические лучи, взаимодействуя с атомами атмосферных газов, вызывают изменения циркуляции атмосферы и способствуют образованию в ней облачности и влажности. В периоды высокой солнечной активности озерные водоемы испытывают дефицит влаги в атмосфере, что сопровождается понижением их уровней. Вариации солнечной активности и колебания уровней моря и озер в целом проявляются в противофазе.

Работа выполняется в рамках Программы ИНЦ СО РАН «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей (0341-2015-0001)».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. NOAA Paleoclimatology Tree Ring Datasets. – Электронный ресурс: код доступа [https://www.ncdc.noaa.gov/cdo/f?p=517:1:1099450739288301.

2. Svensmark H., Calder N. The Chilling Stars: A New Theory of Climate Change. Denmark: Totem Books, 2007. (русская версия – Свенсмарк Х., Колдер Н. Леденящие звезды. Новая теория глобальных изменений климата. Электронный ресурс, 2007: код доступа [http://coollib.com/b/255158/read. 3. Total sunspot number – Электронный ресурс: код доступа [http://www.sidc.be/silso/datafiles], [http://meteolab.ru/projects/sun/].

## LAKE LEVEL DYNAMICS

K.G. Levi<sup>1</sup>, A.I. Miroshnichenko<sup>1</sup>, E.A. Kozyreva<sup>1</sup>, V.I. Voronin<sup>2</sup>, F.L. Zuev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia
 <sup>2</sup> Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Consideration is being given to the factors that can generate water-level fluctuations in lakes of the world. Among those are space and atmospheric processes. Statistical analysis has been made on morphometric characteristics of the lakes, periodicity in the fluctuation in the water levels of lakes and their clusterability have been identified based on cluster analysis. "Atlas of Largest Lakes in the World" has been compiled, with the lakes described according to their distribution through different latitudes; major trends considered herein are related to dynamics of the Earth's lake system.

*Keywords*: cosmic rays, solar activity and its derivatives, cloud thickness, global-mean steric sea level change, water level observations, dendrochronology, statistical analysis methods

\*\*\*

УДК 551.24+550.34

# ПРОЯВЛЕНИЕ ОДИННАДЦАТИЛЕТНЕЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ В СЕЙСМОМИГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ РИФТОВЫХ СИСТЕМ ЗЕМЛИ

Е.А. Левина, В.В. Ружич

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. С помощью разработанной геоинформационной системы (ГИС) и с использованием всемирного каталога землетрясений рассматривается явление миграции сейсмической активности в трех рифтовых системах Северного полушария – Срединно-Атлантической, Красноморской и Байкальской. Применялся метод построения пространственновременных диаграмм в сочетании с кластерным и регрессионным анализом. Установлено проявление сейсмомиграций для рассмотренных рифтовых зон. Предполагается, что такое явление может быть объяснено периодическим изменением полярного сжатия Земли в результате вариаций ее ротационного режима и гравитационным взаимодействием в Солнечной системе. Выявлена периодичность в режиме генерации энергетических кластеров миграции, которая может быть связана с влиянием на сейсмический режим 11-летнего цикла солнечной активности. Обосновывается вывод о том, что режим планетарной сейсмомиграции в рассмотренных рифтовых зонах Земли может быть следствием модуляции выделяющейся эндогенной энергии нашей планеты космогенными факторами.

Ключевые слова: сейсмомиграция, пространственно-временная диаграмма, космогенный фактор, деформационная волна, прогноз землетрясений

Вопросы о миграции землетрясений рассматривались многими специалистами в нашей стране и за рубежом [1–7 и др.]. Под миграцией сейсмической активности, или сейсмомиграцией, авторы понимают явление пространственно-временной и статистически значимой направленности в распространении сейсмических событий в межблочных средах иерархически упорядоченной литосферы Земли. Предложенный авторами метод оперирует не одиночными эпицентрами землетрясений, а суммарной выделившейся сейсмической энергией, которая подсчитывается для выбранного района с помощью пространственных и временных окон [5].

Как правило, явление сейсмомиграции характеризуется двумя главными параметрами – направлением и скоростью. В предыдущих работах [5, 7] авторами показано, что еще одним параметром является повторение кластеров миграции сейсмической активности через определенные промежутки времени («ритм миграции»). Выделено несколько таких периодов повторения, из них наиболее уверенно выделяется 11-летний период.

Периодичности в сейсмическом процессе отмечаются многими исследователями, и в числе других гармоник выделяется также 11-летний цикл, что связывается с циклом солнечной активности [8, 9 и др.]. Можно предположить, что миграция сейсмической активности вдоль активных зон и периодичность землетрясений в них – это проявление одних и тех же закономерностей. В работе [10] авторы установили, что в периоды повышения солнечной активности повышается сейсмическая активность в зонах сжатия Земли и одновременно снижается активность в зонах растяжения. Для исключения влияния этого фактора в данной работе рассматривались только зоны растяжения – три рифтовые системы Северного полушария.

Для изучения явления миграции сейсмической активности анализировался мировой каталог землетрясений [11] с  $M \ge 3.5$  с 1963 по 2015 г. Так как каталог содержит сведения о координатах эпицентра события, времени его возникновения и энергетическом уровне, фактически мы имеем дело с функцией трех переменных:  $E=f(\phi, \lambda, t)$ , где E – сейсмическая энергия,  $\phi$  – широта,  $\lambda$  – долгота, а t – время. Для упрощения вычислений был применен метод редукции размерности (рис. 1). Для этого в районе исследования была выбрана полоса, задаваемая координатами ее начальной и конечной точек и шириной. Затем эта полоса разбивалась на прямоугольные

участки со сторонами, перпендикулярными центральной линии и имеющими вдоль нее заданную протяженность – пространственные окна (рис. 1-1), в которых подсчитывалась выделившаяся суммарная сейсмическая энергия за определенные промежутки времени – временные окна. В итоге упомянутая функция преобразуется к виду: E=f(r, t), где r – расстояние от начала отсчета на центральной линии выбранной полосы (рис. 1-2). Для дальнейшего анализа строим сечение рассматриваемой поверхности плоскостью K=Ks и ее проекцию на плоскость расстояния – времени (рис. 1-3) и функция преобразуется к виду: T=f(r), где T – время, а r – расстояние от начала отсчета. Миграциям событий во времени вдоль рассматриваемой линии соответствуют на диаграмме диагонально расположенные цепочки точек [7]. Для дальнейшего исследования диаграмм использовалось сочетание кластерного [12] и регрессионного анализа. Подробно метод выделения кластеров описан в [7]. Для совокупности точек, входящих в соответствующий миграционный кластер, строится линейная регрессия, по коэффициентам которой и вычисляется скорость миграции. На рис. 2 прямоугольниками показаны три рассматриваемые рифтовые системы Северного полушария: Байкальская, Срединно-Атлантическая и Красноморская. Пространственно-временные диаграммы представлены на рис. 3. Средние параметры миграции сейсмической активности для всех рассмотренных районов приведены в таблице.



Рис. 1. Иллюстрация метода редукции размерности. I – полоса, выбранная для анализа сейсмической активности, показана черным прямоугольником. Данные о землетрясениях собираются путем разделения территории на ряды прямоугольников и подсчета выделившейся суммарной энергии землетрясений; r – расстояние от начальной точки. 2 – поверхность, представляющая выделившуюся сейсмическую энергию Е как функцию времени t и расстояния r. 3 – пространственно-временная диаграмма. Общий фон – это секущая плоскость K=Ks, темные пятна – максимумы сейсмической энергии, превышающие это значение.



Рис. 2. Районы, в пределах которых учитывалась миграция максимумов сейсмической активности (черные прямоугольники): 1 – БРЗ; 2 – Северная Атлантика; 3 – Красное море.

Район	Кол-во событий	Скорость (км/год)	Период (годы)	
БРЗ	598	97	11.33	
Северная Атлантика	1901	159	10.33	
Красное море	3760	360	9.25	
19.06 20.06 21.06 21.06 22.06 22.06 22.06 23.06 24.06 25.06 25.06 25.06 25.06 25.06 25.06 27.06 28.06 29.06 29.06 29.06 29.06 29.06 29.06 20.06	2013 2011 2009 2007 2005 2003 2001 1999 1997 1995 1993 1991 1995 1987 1985 1987 1977 1975 1973 1977 1975 1973 1971 1975 1973 1971 1969 1967 1965 1963 Расстояние	19.06.2014 20.06.2005 21.06.2005 22.06.2002 23.06.1999 23.06.1999 26.06.1987 26.06.1984 27.06.1981 29.06.1972 30.06.1969 01.07.1966 02.07.1963	19.06.2015 19.06.2013 20.06.2011 20.06.2009 21.06.2007 21.06.2005 22.06.2003 22.06.2001 23.06.1997 24.06.1995 24.06.1995 24.06.1993 25.06.1989 26.06.1987 26.06.1987 26.06.1987 28.06.1977 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 29.06.1975 20.06.1969 01.07.1965 02.07.1963	
Расстояние			8 ¥	

Рис. 3. Пространственно-временные диаграммы для рассмотренных районов: *1* – БРЗ, *2* – Северная Атлантика, *3* – Красное море. Черными линиями показаны предполагаемые линии миграции сейсмической активности.

Из рис. З и таблицы видно, что повторение кластеров миграции сейсмической активности происходит со средним периодом 10.3±0.7 лет во всех трех рифтовых системах. Ранее подобный ритм сейсмомиграций выделялся также в зонах коллизии и субдукции [13].

Согласно более ранним результатам исследований, эффект миграции сейсмической активности в настоящее время предположительно связывается с периодическим распространением деформационных волн от различных энергетических источников, инициирующих сейсмическую активизацию в литосфере [5, 7]. Наличие 11-летнего цикла в сейсмическом режиме областей сейсмической диссипации, а также в режиме сейсмомиграционных процессов можно считать уже надежно установленным. Но остается открытым вопрос о происхождении таких колебаний. Самым распространенным объяснением является связь этого периода с 11-летним циклом солнечной активности, что, в свою очередь, вызывает вопрос о природе такой связи. В работах [14, 15] показано, что изменения полной приливной силы, действующей на Солнце (в системе Солнце-Юпитер-Сатурн), соответствуют изменению солнечной активности, рассмотренной в период с 1800 по 1980 г.

Под полной приливной силой здесь понимается учет возмущения в движении Солнца, вызванного его вращением вокруг барицентра солнечной системы. Указанные причины способны инициировать сходные по длительности короткопериодные вариации сейсмического и сейсмомиграционного режимов в различных регионах Земли. Дополнительным подтверждением такой точки зрения может служить сделанное А.М. Агеевым [16] сравнение рядов отклонения центра Солнца от барицентра Солнечной системы и количества землетрясений в штатах Калифорния и Невада (рис. 4).

Параметры миграции сейсмической активности



Рис. 4. График годового количества землетрясений за период с 1932 по 2002 г. (пунктирная линия); график движения центра Солнца относительно барицентра Солнечной системы (сплошная линия); прогноз сейсмичности (составлен А.М. Агеевым, жирная черная линия); *R* – расстояние от барицентра.

Максимумы на графике соответствуют удалению центра Солнца от барицентра Солнечной системы, а минимумы – приближению. Видно, что годы с большим количеством землетрясений в этом регионе графически находятся в непосредственной близости к годам максимального удаления центра Солнца от барицентра. А.М. Агеев пришел к выводу, что существует эффект резонанса литосферы Земли при удалении центра Солнца от барицентра с определенным запаздыванием.

Таким образом, опираясь на полученные результаты изучения сейсмомиграций в трех рассмотренных рифтовых зонах, а также на сведения, представленные в работах [10, 15, 16], можно сделать следующий вывод. Несмотря на то, что сейсмотектонические явления в твердой литосферной оболочке Земли вызываются внутренними тепловыми процессами в недрах Земли, постоянно действующие вышеупомянутые космические факторы способны модулировать процессы диссипации сейсмической энергии. На практике детальное изучение проявлений подобной модуляции может использоваться в среднесрочном прогнозе землетрясений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mogi K. Migration of seismic activity // Bull. of Earthquake Research Institute. 1968. V. 46. P. 53-74.

2. Ружич В.В., Хромовских В.С., Перязев В.А. Анализ глобальной пространственно-временной миграции очагов сильных землетрясений с геотектонических позиций // Инженерная геодинамика и геологическая среда. Новосибирск: Наука, 1989. С. 72–80.

3. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, КГПУ, 2003. 152 с.

4. Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 11. С. 1176–1190.

5. Левина Е.А., Ружич В.В. Разномасштабная миграция землетрясений как проявление инициированного энергопотока при волновых деформациях литосферы Земли // Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Всероссийского семинара-совещания. М.: ГЕОС, 2010. С. 71–78.

6. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: «Гео», 2014. 353 с.

7. Levina E.A., Ruzhich V.V. The seismicity migration study based on space-time diagrams // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6(2). P. 225–240.

8. Леви К.Г. Периодичность природных явлений в Прибайкалье и сейсмичность // Современная геодинамика и сейсмичность Байкальского рифта. Иркутск, 1997. С. 171–188.

9. Любушин А.А., Писаренко В.Ф., Ружич В.В., Буддо В.Ю. Выделение периодичностей в сейсмическом режиме // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 62–76.

10. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. О возможном влиянии солнечной активности на сейсмическую и вулканическую активность: долгосрочный прогноз // Science without borders. Transactions of the International Academy of Science H&E. V.3. 2007/2008, SWB, Innsbruck, 2008.

11. Northern California Earthquake Data Center. – www.ncedc.org.

12. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: Институт математики СО РАН, 1999. 270 с.

13. Левина Е.А., Ружич В.В. Сейсмогеодинамическое взаимодействие Байкальского рифта с зонами коллизии и субдукции // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всероссийская научная конференция с международным участием, Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г.: сборник материалов. В 2-х томах. Владивосток: Дальнаука, 2015. Т. 2. С. 93–97.

14. Прокудина В.С. Изучение возможной взаимосвязи 22-летнего и 80-летнего циклов солнечной активности и движения барицентра Солнечной системы // Тр. ГАИШ. 1995. Т. LXIV, ч. 1. С. 145–157.

15. Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.

16. Агеев А.М. О влиянии космических факторов на геодинамику литосферы (на примере Калифорнии и Невады) // Поволжский экологический журнал. 2003. № 2. С. 178–183.

#### AN 11-YEAR PERIODICITY IN THE OCCURRENCE OF SEISMIC MIGRATION PROCESSES IN THE RIFT SYSTEMS ON EARTH

## E.A. Levina, V.V. Ruzhich

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Based on a well-designed geoscience information system (GIS) and a worldwide earthquake catalogue, consideration is being given to a phenomenon of seismic activity migration in three rift systems of the Northern Hemisphere (Mid-Atlantic, Red Sea and Baikal). A method for constructing space-time diagrams has been used in combination with cluster and regression analyses. Occurrence of seismic migrations has been identified for the considered rift zones. It is assumed that this phenomenon is produced by periodic changes in the polar compression of the Earth due to its rotation variations and gravitational interaction in the solar system. A periodicity found in generation of migration energy clusters may have arisen due to the influence of an 11-year cycle of solar activity on seismic regime. Evidence has been provided showing that the planetary seismic migration regime in the examined rift zones of the Earth may be the result of modulation of the release of endogenous energy of our planet by cosmogeneous factors.

Keywords: seismic migration, space-time diagram, cosmogeneous factor, deformation wave, earthquake prediction

\*\*\*

УДК 550.837

## АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕКОВОГО ХОДА ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ИХ ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ С ГЕОДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

 $HO.\Phi.$  Mopos<sup>1</sup>, C.Э. Смирнов<sup>2</sup>, З.А. Назарова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>2</sup> Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, п. Паратунка, Россия

<sup>3</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация. Рассмотрены вековые вариации вертикального геомагнитного поля в обсерваториях Паратунка (Петропавловск-Камчатский), Какиока (о. Хонсю), Мамамбецу (о. Хоккайдо) и Патроны (Иркутск) с 1968 по 2014 г. Сравнительный анализ вековых ходов показал, что с 1968 по 2001 г. во всех четырех обсерваториях выражены подобные вариации напряженностью в первые сотни нТл. В последующее время, с 2001 по 2014 г., ситуация изменилась. В обсерватории Паратунка вековой ход отличается от других обсерваторий. В ней не проявилась вариация, подобная вариациям в трех других обсерваториях. Это отклонение векового геомагнитного хода в обсерватории Паратунка во времени приурочено к усилению сейсмичности на глубинах 400-700 км в районе Южной Камчатки. Здесь произошло сильнейшее Охотоморское землетрясение с M<sub>W</sub>=8.3. Предполагается, что в связи с усилением сейсмичности в области перехода от верхней к нижней мантии активизировались физико-химические процессы, которые привели к возникновению крупной геоэлектрической неоднородности, оказавшей влияние на поведение вертикальной составляющей геомагнитного поля.

Ключевые слова: геомагнитное поле, вековые вариации, геоэлектрическая неоднородность, сейсмичность, землетрясение

Вековые вариации характеризуют изменения средних годовых значений составляющих геомагнитного поля во времени. Вековой ход геомагнитного поля определяют по данным геомагнитных обсерваторий, осуществляющих мониторинг геомагнитного поля в течение очень длительного времени. Результаты показывают, что вековой ход не остается постоянной величиной, а меняется во времени. Так как измерения в обсерваториях производятся на протяжении 100-150 лет, во временном ходе могут быть выделены вариации с периодом несколько десятков лет. Важным вопросом геофизики является изучение вариаций векового хода и их возможной связи с глубинными геодинамическими процессами.

Большой научный интерес представляет поведение векового хода геомагнитного поля в обсерваториях, расположенных на материке (Иркутск), на островах Хонсю (Какиока), Хоккайдо (Мамамбецу) и п-ове Камчатка (Паратунка). В этих обсерваториях ведутся непрерывные наблюдения геомагнитного поля на протяжении многих лет. По временным рядам выделены синхронные интервалы наблюдений с 1968 по 2014 г. Анализ выполнен по трем составляющим геомагнитного поля – H, D, Z. При этом основное внимание уделено компоненте Z, которая более чувствительна к геоэлектрическим неоднородностям среды. Сравнительный анализ вековых ходов вертикальной составляющей в обс. Паратунка, Какиока, Мамамбецу и Иркутск свидетельствует о следующем. В поведении вековых ходов в период с 1968 до 2001 г. во всех четырех обсерваториях выражены подобные вариации (рис. 1). Интенсивность вариаций составляет первые сотни нТл. Важно отметить, что с 2001 по 2014 г. в поведении годовых ходов только в обс. Иркутск, Какиока и Мамамбецу проявилась вариация с интенсивностью около 100 нТл. Однако в обс. Паратунка данная вариация практически не выражена. Возникает вопрос, почему вековой ход в обс. Паратунка отличается за последние 14 лет от вековых ходов в обс. Патроны, Какиока и Мамамбецу.



Рис. 1. Вековой ход напряженности вертикальной составляющей геомагнитного поля в обсерваториях Паратунка (1), Мамамбецу (2), Какиока (3), Патроны (4). 5 – отсутствие значений напряженности поля в обсерватории Мамамбецу.

Обратимся к возможной природе вариаций векового хода. В поведении магнитного поля проявляются вековые вариации, связанные с изменением внешних ионосферных, магнитосферных, коровых и магнитогидродинамических источников, расположенных в жидкой части ядра [1, 2]. Изменения поля коровых источников невелики и составляют первые нТл. Они наблюдаются в основном в сейсмоактивных регионах. Вековые вариации внешних источников по амплитуде оцениваются в первые десятки нТл. Они по интенсивности существенно меньше вариаций магнитогидродинамических источников. Ранее предполагалось, что вариации с периодами 11 лет и менее могут существовать у глубинных источников, но из-за экранирующего влияния верхней хорошо проводящей мантии не проникают к поверхности Земли. Вариации с такими периодами связаны только с внешними источниками. Также механизмы магнитогидродинамической генерации поля не допускали возникновение вариаций с периодами менее 10000-100000 лет. Однако С.И. Брагинский [3] на основе работ Р. Карри [4] доказывает, что вариации с периодами от 4 до 33 лет могут быть связаны с турбулентными пульсациями в жидкой части ядра. Согласно [4], такие вариации недипольного поля могут иметь региональный характер и проявляться не обязательно на всей поверхности Земли.



Рис. 2. Схема расположения эпицентров глубоких землетрясений (400–700 км) в районе Южной Камчатки за период с 1968 по 2015 г. Треугольником на схеме Камчатки обозначено местоположение геомагнитной обсерватории Паратунка.

Исходя из этого, можно полагать, что вариации интенсивностью в первые сотни нТл в вековых ходах в обсерваториях Паратунка, Патроны, Какиока и Мамамбецу являются региональными. Вариации, как было отмечено раньше, подобны в период с 1968 по 2001 г., а в последующий период вариация в обс. Паратунка практически не проявилась.

Предполагается, что выявленные особенности могут быть обусловлены изменением физического состояния мантии. Информацию о динамике физических свойств пород на больших глубинах (400-700 км) представляют данные многолетнего сейсмического мониторинга по мировой и региональным сетям сейсмологических станций. Сейсмичность рассмотрена на расстояниях от обсерваторий, соизмеримых с расстояниями до гипоцентров сильных глубоких землетрясений, которые могли оказать существенное влияние на физическое состояние верхней мантии. Анализ показал, что в районах Японии и Байкальского рифта сильных землетрясений (*M*≥6) на указанных глубинах за последние 35 лет не было. Сильные глубокие землетрясения (Н≥600 км) в рассматриваемый период произошли только в районе Южной Камчатки. Они сопровождались многочисленными афтершоками на глубинах 400-700 км (рис. 2).

Сильнейшим из них является Охотоморское землетрясение на глубине около 630 км с магнитудой Mw=8.3 (Global GMT). По данным регионального каталога Камчатского филиала Геофизической службы РАН его энергетический класс  $K_{\rm S=7}$  (http://data.emsd.iks.ru/). Эпицентр его располагался на расстоянии примерно 100 км к западу от побережья Южной Камчатки. Землетрясение ощущалось на расстояниях до 9500 км [5].



Рис. 3. Гистограмма глубоких (400–700 км) землетрясений энергетического класса *К*=9–17 в районе Южной Камчат-ки (см. рис. 2).

Представление о динамике сейсмичности на глубинах 400-700 км дает гистограмма землетрясений с К>9, на которой видно, что усиление сейсмичности начинается примерно с 2001 г. (рис. 3). С этого же времени отмечается расхождение вековых ходов вертикального геомагнитного поля в обсерваториях Паратунка, Патроны, Какиока, Мамамбецу. Как мы уже отмечали, данное расхождение обусловлено тем, что в обс. Паратунка вариация в 2001-2014 гг. практически не проявилась в вековом ходе. О возможной природе аномального поведения векового хода в обс. Паратунка судить крайне трудно, так как крайне мало сведений о точном механизме проводимости в мантии. По данным сейсмической томографии, зона перехода от верхней к нижней мантии в районе Южной Камчатки отличается пониженной скоростью сейсмических волн по сравнению с Японскими островами [6, 7]. Можно предположить следующее. В результате землетрясений на глубинах 400-700 км выделилась энергия, изменились температура и давление. Это привело к усилению физико-химических процессов пород в зоне перехода от верхней к нижней мантии. Последние исследования в области физики минералов указывают на возможность глубинной дегидратации слэба в переходной зоне мантии и выделения водосодержащего флюида [8].

Согласно [9, 10], удельное электрическое сопротивление пород на глубинах 400–700 км составляет 100–5 Ом·м, соответственно. Предполагается, что жидкая фаза имеет электрическое сопротивление сотые – тысячные доли Ом·м [11]. Появление жидкой фазы в гальванически связанном состоянии даже в объеме сотых долей процента приведет к сильному увеличению электропроводности пород [12, 13]. Интегральная проводимость толщи пород на глубинах 400–700 км возрастет на несколько порядков. Появление такой проводящей глубинной неоднородности в районе Южной Камчатки, повидимому, оказало сильное влияние на поведение вековой вариации геомагнитного поля. Можно полагать, что вековые вариации геомагнитного поля содержат информацию о динамике электропроводности мантии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986. 528 с.

2. Янковский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 591 с.

3. Брагинский С.И. О спектре колебаний гидромагнитного динамо Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1970. Т. 10, № 2. С. 221–233.

4. Currie R.G. Geomagnetic spectrum of internal origin and lower mantle // Journal of Geophysical Research. 1968. V. 73, № 8. P. 2779–2786.

5. Чеброва А.Ю., Чебров В.Н., Гусев А.А., Ландер А. В., Гусева Е. М., Митюшкина С. В., Раевская А.А. Воздействие Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г. (М=8.3) // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 3–22.

6. Жао Д., Пирайно Ф., Лиу Л. Структура и динамика мантии под Восточной Россией и прилегающими регионами // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 9. С. 1188–1203.

7. Huang J., Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions // J. Phys. Planet. Inter. 2006. V. 155. P. 1–15.

8. Отани Э., Чжао Д. Роль воды в глубинных процессах в верхней мантии и переходном слое: дегидратация стагнирующих субдукционных плит и ее значение для «большого мантийного клина» // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 12. С. 1385–1392.

9. Ротанова Н.М., Пушков А.Н. Глубинная электропроводность Земли. М.: Наука, 1982. 148 с.

10. Семенов В.Ю. Оценка электропроводности мантии под континентами северного полушария // Изв.АН СССР. Физика Земли. 1989. № 3. С. 60–67.

11. Гордиенко В.В., Логинов И.М. О глобальной астеносфере // Физика Земли. 2011. № 2. С. 35-42.

12. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 219 с.

13. Shankland T.I., Waff H.S. Conductivity in fluid-bearing rocks // Journal of Geophysical Research. 1977. V. 82. P. 5409–5417.

#### ANOMALOUS SECULAR VARIATIONS OF GEOMAGNETIC FIELD AND THEIR POSSIBLE RELATION TO GEODYNAMIC PROCESSES

## Yu.F. Moroz<sup>1</sup>, S.E. Smirnov<sup>2</sup>, Z.A. Nazarova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Volcanology and Seismology, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

<sup>2</sup> Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Russia

<sup>3</sup> Kamchatka Branch of the Geophysical Service, the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

*Abstract.* The paper considers secular changes in vertical geomagnetic field recorded through the period 1968-2014 at the observatories of Paratunka (Kamchatka), Kakioka (Honshu Island), Mamambetsu (Hokkaido Island), and Patrony (Irkutsk). The comparative analysis of secular variations has shown their similarity within the first hundreds nT recorded at all four observatories for the period from 1968 to 2001. Then there occurred differences in the period 2001-2014. The records obtained at Paratunka do not exhibit the variation recorded at three other observatories. This deviation from secular changes in the geomagnetic field accompanied the seismicity intensification at depths of 400–700 km in the South Kamchatka that experienced the Mw=8.3 Okhotomorsk earthquake. It is supposed that an increase in seismicity in the upper and lower mantle transition region intensified the physicochemical processes that gave rise to the formation of a large-scale geoelectrical inhomogeneity, which affected the behavior of the vertical component of geomagnetic field.

Keywords: geomagnetic field, secular change, geoelectrical homogeneity, seismicity, earthquake

\*\*\*

УДК 550.38

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

Ю.Ф. Мороз<sup>1, 2</sup>, П.А. Предеин<sup>1</sup>, Ц.А. Тубанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

<sup>2</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация. Приводятся результаты анализа вариаций геоэлектромагнитного поля в центральной части Байкальской рифтовой зоны. По данным магнитотеллурического зондирования электропроводность литосферы в северо-западном направлении намного превышает электропроводность в юго-восточном направлении. Выявленная геоэлектрическая неоднородность электромагнитного поля на низких частотах может быть связана с разломом, проникающим в литосферу на большие глубины.

Ключевые слова: геоэлектромагнитное поле, магнитотеллурическое зондирование, рифтовая зона, электропроводность

Вариации электромагнитного поля Земли связаны с внешними ионосферными, магнитосферными и внутриземными источниками и содержат информацию о геодинамических процессах, протекающих в земной коре и верхней мантии. Большой интерес представляют данные мониторинга вариаций геоэлектромагнитного поля Земли в Байкальской рифтовой зоне, которая характеризуется высокой сейсмической активностью. Ежегодно здесь регистрируется более 5000 землетрясений в год [1], приуроченных в основном к акватории озера Байкал.

Для изучения геодинамических процессов, протекающих на данной территории, выполнен анализ вариаций геомагнитного поля и изучен магнитный типпер в широком частотном спектре за многолетний период [2]. В настоящей работе продолжены исследования с использованием той же методики и привлечением данных магнитотеллурического зондирования, позволяющего получить представление о геоэлектрических свойствах среды в пунктах мониторинга геомагнитного поля.

Инструментальные наблюдения вариаций геомагнитного поля выполняются Геологическим институтом СО РАН с 2000 г. в пунктах Хурамша, Надеино, Степной Дворец, Сухой Ручей (рисунок). Для мониторинга используются магнитовариационные станции MB-01 и MB-02, регистрация осуществляется с минутной дискретностью, точность наблюдений составляет 0.1 нТл. В пункте Надеино регистрируются компоненты (H, D, Z) и полный вектор геомагнитного поля (F), в остальных – только полный вектор. Также в обработке использовались данные обсерватории Патроны (Институт солнечноземной физики СО РАН) за 2000-2015 гг. с дискретностью 1 минута в формате IAGA2002, доступные в [3]. Дополнительно в пунктах Горячинск, Сухой ручей, Хурамша и Надеино в 2012-2015 гг. были установлены станции глубинного магнитотеллурического зондирования TierraTechnica U-43.



Схема расположения пунктов наблюдения и векторов вещественного типпера *ReW*. 1 – пункты наблюдений; 2 – вещественный типпер *ReW*.

Первичная обработка данных полного вектора геомагнитного поля (F) сводилась к удалению помех и выбросов, нормированию значений и последующему осреднению временных рядов. Для анализа вариаций геомагнитного поля в различных частотных диапазонах исходные временные ряды пересчитывались в среднечасовые, среднесуточные и среднегодовые значения. По анализу среднегодовых значений напряженности геомагнитного поля в пунктах наблюдений можно сделать следующие выводы. Во-первых, убывание среднегодовых значений, наблюдавшееся до 2008 г. включительно, сменилось увеличением, что соответствует графику вековых вариаций. Так, для станции Надеино уменьшение среднегодовых значений с 2001 по 2008 г. на 28 нТл, сменилось увеличением на 44 нТл за последующие семь лет - 2008-2015 гг. За те же периоды наблюдений уменьшение и увеличение значений напряженности геомагнитного поля для обсерватории Патроны составили, соответственно 15 и 54 нТл.

По разностям среднегодовых значений напряженности магнитного поля между пунктами наблюдения и обсерваторией Патроны за 2001–2008 гг. были получены следующие значения: для пункта Сухой Ручей разность составляет порядка 4 нТл, для п. Хурамша – 8 нТл и для п. Надеино – 13 нТл. По значениям, полученным для последующего периода (2008–2015 гг.) можно говорить об уменьшении абсолютной величины разности. Так, максимальное значение за соответствующий период получено для пункта Надеино, оно составило 10 нТл. Уменьшение величины разности связано с приближением к очередному максимуму 11-летней вековой вариации, в то время как возрастание величин напряженности геомагнитного поля вкрест простирания Байкальского рифта, в направлении от пункта Патроны к Надеино, говорит о региональном характере этого явления.

В пункте Надеино по данным наблюдений магнитотеллурического поля с помощью программы [4] получена кривая магнитотеллурического зондирования в диапазоне периодов от 5 до 10000 с, характеризующая электропроводность литосферы до глубины примерно 150 км. Полярные диаграммы импеданса свидетельствуют о сильной геоэлектрической неоднородности среды. Электропроводность литосферы в северо-западном направлении почти на три порядка превышает электропроводность в юговосточном направлении. Выявленная геоэлектрическая неоднородность электромагнитного поля на низких частотах может быть связана с разломом, проникающим в литосферу на большие глубины. Верхний относительно проводящий слой имеет интегральную проводимость 10-15 См. Мощность слоя, по-видимому, составляет от 0.8 до 1.0 км. По предварительным данным литосфера региона содержит проводящий слой на глубинах 100-150 км. Вариации геомагнитного поля на периодах 100 и 1000 с приурочены к максимуму кривой МТЗ, характеризующей высокоомный слой литосферы.

# ЛИТЕРАТУРА

1. Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. Обнинск: ФГБУН ГС РАН, 2015. 394 с.

2. Мороз Ю.Ф., Татьков Г.И., Мороз Т.А., Тубанов Ц.А., Предеин П.А. Изменения геомагнитного поля и магнитного типпера в Байкальской рифтовой зоне // Геофизические исследования. 2013. Т. 14, № 3. С. 10–23.

3. International Real-time Magnetic Observatory Network [Электронный ресурс] // INTERMAGNET Data Download. URL: http://intermagnet.org/data-donnee/download-eng.php (дата обращения 28.04.2016).

4. Larsen I.C., Mackie R.L., Manzella A., Fiodelisi A., Rieven S. Robust smooth magnetotelluric transfer functions // Geophys. J. Inter. 1996. V. 124. P. 801–819.

#### RESULTS OF THE GEOELECTROMAGNETIC FIELD RESEARCH IN THE CENTRAL PART OF THE BAIKAL RIFT ZONE

Yu.F. Moroz<sup>1, 2</sup>, P.A. Predein<sup>1</sup>, T.A. Tubanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geological Institute, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia <sup>2</sup> Institute of Volcanology and Seismology, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

*Abstract.* The results of analysis of variance geoelectromagnetic field in the central part of the Baikal Rift Zone are given. According to the magnetotelluric sounding, the electroconductivity of the lithosphere in the north-west direction is much higher than in the south-easterly direction. This geoelectric heterogeneity of the electromagnetic field at low frequencies may be associated with faults in the lithosphere penetrating to greater depths.

Keywords: geoelectromagnetic field, magnetotelluric sounding, rift zone, electroconductivity

\*\*\*

УДК 556.3+711.4

# ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ НА НЕУДОБНЫХ СЕЛИТЕБНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

О.И. Саландаева, Л.П. Бержинская

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Приведены особенности рельефа и обводненности, формирующие инженерно-геологическую обстановку на территории микрорайона «Топкинский» в г. Иркутске. Рассмотрены критерии оптимальной модели жилой застройки на неудобных селитебных территориях в условиях сейсмического риска.

Ключевые слова: неудобная селитебная территория, сложный рельеф, сейсмическая уязвимость застройки, градостроительный принцип застройки

С расширением городов все чаще возникает проблема ограниченности резервов территориального развития и упорядочения планировочной структуры городской застройки. Это приводит к освоению участков, ранее рассматриваемых как неудобные или ограниченно пригодные селитебные территории для возведения новых жилых районов. Целесообразность исследования таких площадок и разработка мероприятий по их использованию под строительство связаны с возможным экономическим эффектом. Вместе с тем освоение участков со сложным планировочным рельефом связано с усложнением и удорожанием строительства. Сложный рельеф местности оказывает непосредственное воздействие на такие аспекты градостроительства, как размещение жилых зданий и соцкультбыта на склонах, восприятие архитектурно-художественного облика части городской застройки, условия инженерных работ по прокладке систем коммуникаций на пересеченной местности, что с неизбежностью отражается на технико-экономических показателях проектных решений. Тем не менее изменения, внесенные в рельеф при освоении подобных территорий, не должны способствовать активизации нежелательных геологических и гидрогеологических процессов, и в первую очередь возникновению оползней не только на спланированных, но и на смежных территориях. Следовательно, необходим комплексный подход к решению планировочных задач и разработке мероприятий по инженерной подготовке территорий.

В одном из таких районов со сложным рельефом, расположенном вблизи центра города, ведется строительство новых жилых многоэтажных комплексов.

Природные и инженерно-геологические условия микрорайона. Микрорайон «Топкинский» расположен в пределах Ангаро-Топкинского междуречья – правобережного склона реки Ангары и левобережного склона пади Малая Топка. Рельеф территории жилого массива, находящегоя на вершине возвышенности и застроенного панельными 5- и 9этажными жилыми домами, относительно спокойный. Перепады абсолютных отметок высот находятся в пределах 0.7 м. В верхней части плато окаймляется пологими (до 10°) склонами, но с понижением уровня крутизна склонов увеличивается до 20°. Кроме того, в последние десятилетия произошли техногенные преобразования рельефа склонов в виде уступов и подрезок, связанные с карьерными разработками строительных материалов.

В геологическом строении территории микрорайона «Топкинский» до глубины 18 м, описанном в работе О.В. Павлова и др. [1], принимают участие породы юрского возраста, перекрытые слоем элювиальных суглинков и насыпными грунтами. Верхний слой элювия представлен аргиллитами и алевролитами, которые разрушены до состояния глин и суглинков. Ниже расположены песчаники средней и малой прочности, иногда подстилающиеся прочным аргиллитом, иногда разделяющиеся прослоями глин или суглинков. Сильно набухающие глины третьего слоя, подстилаемые прослоями угля или сажистого суглинка, часто обводнены. Нижний, четвертый, слой состоит из песчаников малой и средней прочности с редкими прослоями угля. Общей особенностью вскрытых пород, важной в инженерногеологическом отношении, является их ритмичное неоднократное чередование в разрезе склона и близкий литологический состав. В целом юрские отложения характеризуются наклонным залеганием пород под углом 2-4° в юго-восточном направлении, однако иногда условия их залегания изменены оползневыми процессами в прошлом. Такое неоднократное переслаивание водопроницаемых и водоупорных пород, казалось бы, исключает возможность образования значимых водоносных горизонтов, а инфильтрация атмосферных осадков должна ограничиваться толщей пород, залегающей на верхнем водоупоре. Но при бурении скважин было обнаружено скопление воды почти на каждом водоупоре на разных глубинах скважины. Это свидетельствует о сложной системе перетекания грунтовых вод с одного горизонта на другой. Скорость взаимодействия «вода-порода» зависит от скорости фильтрации, которая определяется степенью трещиноватости породы. Авторы [1] отмечают, что юрские глины и суглинки при замачивании в значительной мере склонны к набуханию.

Исследованиями особенностей инженерногеологических условий занимались О.В. Павлов, Н.И. Демьянович, В.А. Павленов, А.М. Титов. Результаты исследований позволили выявить закономерности развития оползневых процессов в микрорайоне «Топкинский» – ритмичное чередование на склоне нескольких слоев пород с жесткими связями и подстилающих их ослабленных при увлажнении глинистых горизонтов, предопределяющих развитие многоярусных оползней. Такая ситуация говорит о вероятности замачивания практически всех слоев грунта геологического разреза, а предполагаемая застройка более пологих склонов создает дополнительную техногенную нагрузку (от веса зданий и возможных утечек из водонесущих инженерных систем) на грунтовое основание с возможностью образования оползней на склонах микрорайона.

Оценка сейсмической опасности территории микрорайона «Топкинский». Байкальская рифтовая зона характеризуется высокой сейсмичностью. Сейсмостанции Иркутской области фиксируют тысячи сейсмических толчков в год – от слабых (фоновых) до относительно сильных землетрясений. Появление большинства сейсмических толчков обусловлено геолого-структурным развитием крупных и средних тектонических разломов. Фоновая сейсмическая опасность территории г. Иркутска по картам ОСР-97 А для грунтов II категории составляет 8 баллов. Территория микрорайона «Топкинский» по картам сейсмического микрорайонирования также относится к 8-балльной сейсмической зоне. Описанная выше раздробленность горных пород с жесткими структурными связями, а также предрасположенность глинистых слоев к снижению прочности при замачивании способны дополнительно усиливать сейсмический эффект, поэтому неоднородность по несущей способности и мощности разных слоев грунта может привести к деформациям зданий при неравномерном уплотнении основания. Это было подтверждено изысканиями ВСТИСИЗа на площадке 9-этажных жилых домов серии 135с, свайные основания которых пришлось дополнительно усилять. С учетом высокой сейсмической опасности микрорайона и сложных инженерно-геологических условий технологией строительства должны предусматриваться не только краткие сроки проведения работ нулевого цикла, предотвращающие замачивание котлована и обеспечивающие защиту грунтовых пород от притока талых и дождевых вод, но и противооползневые мероприятия, ведущие к удорожанию строительства. Таким образом, необходимо комплексное решение вертикальной планировки совместно с другими мероприятиями по инженерной подготовке городских территорий.

Градостроительные принципы развития неудобных селитебных территорий с высокой сейсмичностью. Многие страны мира имеют рельеф, представляющий сложности для планировки и застройки городов. К странам со сложным рельефом относятся Чехословакия, Швейцария, Италия, Австрия, Норвегия, Испания и другие. К сожалению, основными факторами, влияющими на структурообразующую составляющую организации застройки, являются социально-экономическое состояние города, возможности строительного комплекса и заинтересованность инвесторов, а только затем градостроительные принципы развития и реальное состояние ландшафта, включая инженерно-геологические и гидрогеологические условия территорий.

Одним из важнейших принципов приспособления рельефа для целей застройки является максимальное сохранение существующего рельефа, почвенного покрова, растительности, естественных форм поверхности, играющих значительную роль в формировании урбанизированного ландшафта. Изменения, внесенные в рельеф, не должны способствовать активизации нежелательных процессов не только на спланированной, но и на смежных с ней территориях. Для достижения единства природного рельефа и застройки требуется оценка степени соответствия особенностей рельефа типу застройки, характеризующаяся двумя основными закономерностями:

 застройка обогащает ландшафт, подчеркивая основные его формы пропорциями сооружений, ритмом их постановки и многоплановостью;

 застройка занимает подчиненное положение по отношению к рельефу, вписывается в ландшафт, не нарушая целостности его восприятия.

На неудобных территориях благоприятной является квартальная низкоплотная застройка, при которой расстояния между зданиями превышают нормируемые показатели, а также расчлененная планировочная структура – высокоплотная блокированная застройка с антисейсмическими разрывами, причем рельеф предопределяет размещение застройки по склонам холма, в то время как улицы и дороги желательно прокладывать в понижениях. При периметральном расположении зданий следует избегать плотно застроенных контуров; ковровая и периметральная структуры не рекомендуются на территориях с крутыми уклонами. Если склоны представляют собой ряд ярусов, наиболее желательна рядовая застройка в пределах плоских участков [2]. Застройка уступов возможна как зданиями террасного типа, так и постройками равной высоты или с постепенным повышением этажности, однако верхние здания не должны выделяться в силуэте. Застройка верха склона предполагается зданиями, отстоящими один от другого, для придания очертанию холма зубчатого вида. Лучшей формой застройки вершины будет размещение на ней доминантного здания повышенной этажности или сооружений с видовыми площадками. Дополнительным фактором, влияющим на сейсмическую уязвимость зданий, построенных в сложных сейсмогеологических условиях, является градостроительная ситуация - применяемая этажность, плотность застройки, влияющая на планировочную уязвимость, так как повышается риск получения повреждений, и уязвимость населения во время сейсмического события от соседних поврежденных зданий. Критерии оптимальной модели морфотипа жилой застройки на неудобных селитебных территориях в условиях сейсмического риска формируются рядом конструктивных, планировочных и градостроительных аспектов, основанных на достоверных исследованиях геологической среды. С точки зрения градостроительства и ландшафтного дизайна, в участках на склонах можно найти особые преимущества, позволяющие за счет рельефа воплотить оригинальные градостроительные решения [2]. При этом обязательным условием является выполнение прогноза устойчивости склонов на весь срок эксплуатации сооружений, а также на период временного изменения инженерно-геологических условий, внешних воздействий и нагрузок в течение цикла строительных работ по осуществлению проекта хозяйственного освоения склона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов О.В., Писарский Б.И., Демьянович Н.И. Инженерно-геологические особенности Топкинского микрорайона г. Иркутска. Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1988. 110 с.

2. Саландаева О.И. Формирование архитектурно-конструктивных приемов жилой застройки города Иркутска в условиях высокой сейсмичности // Вестник ИрГТУ. 2015. № 2. С. 132–144.

## FEATURES OF PLANNED DEVELOPMENT IN INCONVENIENT RESIDENTIAL AREAS

#### O.I. Salandaeva, L.P. Berzhinskaya

Institute of the Earth's Crust, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* The article deals with the topographic and flooding features forming the engineering-geological conditions of Topkinsky District in Irkutsk. The criteria of optimal developmental model of inconvenient residential areas are considered in terms of seismic risk.

Keywords: inconvenient residential area, difficult topography, seismic vulnerability of buildings, principles of urban planning

\*\*\*

УДК 550.385

# О ВЛИЯНИИ ЭКСТРЕМАЛЬНО-СИЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПОГОДУ

П.А. Седых, И.Ю. Лобычева

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Известно, что существуют различные ключевые факторы изменения климата Земли, а сам земной климат является продолжением космического климата. Во время бури ионосфера подвергается достаточно значительному джоулеву нагреву, мощность высыпающихся энергичных частиц очень велика, огромная энергия увеличивает температуру ионосферы, вызывает крупномасштабные ионные дрейфы и нейтральные ветры. Для исследования возможного влияния мощных магнитосферных возмущений на характер развития метеорологических процессов в атмосфере были отобраны примечательные события, каждое из которых имело свою особенность: 1) магнитосферная буря 13–14 марта 1989 г. (относится к сильнейшей магнитосферные бури в период 28–31 октября 2003 г. Представлены результаты исследования влияния сильных магнитосферных бурь на состояние нижней атмосферы и погоду. Целью данной работы также было исследование возможного влияния магнитосферных возмущений в атмосферы и логоду. Целью данной работы также было исследование возможного влияния козмущений в атмосферых данных охватывает те регионы, где можно искать ответственные за это атмосферные явления. Тропический циклогенез является одним из самых важных в прикладном отношении и изучаемых аспектов в динамике метеорологических мезомасштабных процессов. *Ключевые слова:* магнитосферная буря, атмосфера, тропический циклогенез, погода

Для исследования влияния магнитосферных бурь и суббурь на характер развития метеорологических процессов в атмосфере были отобраны события, каждое из которых имело свою особенность. Для исследования возможного влияния магнитосферных возмущений на характер развития метеорологических процессов в атмосфере, взаимосвязи магнитосферных возмущений с изменением метеорологического фона после них в течение времени до 7 сут для магнитосферных возмущений использовались магнитограммы наземных станций, значения AE-индекса, значения Dst-индекса и рассчитывались некоторые параметры, характеризующие энергетику магнитосферных возмущений (рис. 1, 2).

Цель работы – показать или исключить возможность влияния сильных магнитосферных возмущений на метеорологические процессы в нижней атмосфере и погоду (рис. 3). Еще одна важная цель работы – исследовать в динамике структуры циклонов, периоды со специфическими особенностями, с внезапными изменениями их треков и связать их с вариациями параметров возмущенной геомагнитосферы (рис. 4, 5).



Рис. 1. Оценки мощности джоулева нагрева ионосферы (слева) и мощности высыпающихся в ионосферу энергичных частиц (справа) для бури 13 марта 1989 г.

Собранные также данные по мощным магнитосферным возмущениям и тропическим циклонам анализируются для понимания механизма воздействия геомагнитной активности на сложную нелинейную систему атмосферных процессов (рис. 3–5). Согласно выполненным расчетам и построенным графикам ионосфера подвергалась достаточно значительному джоулеву нагреву, и мощность высыпающихся энергичных частиц была тоже велика. В работе приведены результаты математического статистического анализа. Для сильных магнитных бурь некоторые результаты математического статистического анализа представлены в таблице.

			_
Параметры	R <sub>G</sub>	R	
1. Среднее значение температуры на уровне 400 ГПа за 10 лет (1978–1988) в течение марта.			
2. Среднее значение температуры на уровне 400 ГПа – март 1989 г.	0.98	0.78	
1. Среднее значение температуры на уровне 400 ГПа за 10 лет (1992–2002) в течение октября.			
2. Среднее значение температуры на уровне 400 ГПа – октябрь 2003 г.	0.98	0.8	
1. Среднее значение температуры на уровне 400 ГПа за 10 лет (1992–2002) в течение ноября.			
2. Среднее значение температуры на уровне 400 ГПа – ноябрь 2003 г.	0.99	0.87	

*R*<sub>G</sub> – коэффициент корреляции (для всего набора данных), *R* – коэффициент корреляции (для данных области полярной шапки)



Рис. 2. Оценки мощности джоулева нагрева ионосферы и мощности высыпающихся в ионосферу энергичных частиц (Вт): *a* – 29 октября 2003 г.; *b* – 30 октября 2003 г.; *b* – 31 октября 2003 г.



Рис. 3. Пример сравнения осредненных за 10 лет геопотенциальных высот (*a*) и температуры (°C) на поверхности 400 ГПа ( $\delta$ ) и тех же параметров в год наблюдавшегося возмущения.



Рис. 4. Пример информации о тропических циклонах, март 1989 г.



Рис. 5. Изменение скорости ветра в циклоне (31 октября – 1 ноября 2003 г. в Северной Атлантике).

Исследования необходимы для того, чтобы проверить, могут ли магнитные бури влиять на стимулирование тропического циклона или же наличие магнитосферных возмущений препятствует возникновению тропического циклона, способствует его завершению (подавляет ураган) [1–4]. Обсуждаются экспериментальные данные и результаты теоретических расчетов, численных оценок. Результаты настоящего исследования будут необходимы для разработки механизмов влияния солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду и тем самым позволят определить подходы к решению проблемы солнечно-земных связей.

Авторы благодарны создателям и разработчикам следующих сайтов за предоставленные данные по магнитосферным возмущениям, данные метеорологических процессов в атмосфере и тропических циклонов:

http://www.nhc.noaa.gov;

http://www.csc.noaa.gov;

http://www.aoml.noaa.gov;

http://russian.wunderground.com.

# ЛИТЕРАТУРА

1. Sedykh P.A., Lobycheva I. Yu. Effects of magnetosphere-ionosphere disturbances on the lower atmosphere // Abstract book of International Conference on Substorms, ICS-11, Luneburg, Germany, 2012.

2. Sedykh P.A., Lobycheva I. Yu. Concerning the lower atmosphere responses to magnetospheric storms and substorms // International Journal of Atmospheric Sciences, Hindawi Publ. Corp. 2013. V. 2013, ID130786. P. 1–9.

3. Troshichev O.A., Janzhura A. Temperature alterations Antarctic ice sheet initiated by the disturbed solar wind // Jour-

nal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2004. V. 66. P. 1159–1172.

4. Rycroft M.J. Electrical processes coupling the atmosphere and ionosphere: an overview // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. V. 68, № 3–5. P. 445–456.

## ON THE EFFECT OF EXTREMELY STRONG GEOMAGNETOSPHERIC DISTURBANCES ON THE WEATHER

#### P.A. Sedykh, I.Yu. Lobycheva

Institute of Solar-Terrestrial Physics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* It is known that there are various key factors of the Earth's climate change and there is a linkage between space and terrestrial weather. During storms, the ionosphere undergoes rather significant Joule heating with a great power of precipitating energetic particles, the power of particle precipitations is very great, huge energy increases the ionosphere temperature and causes large-scale ion drifts and neutral winds. The study of the probable effect of strong magnetospheric disturbances on meteorological processes in the atmosphere has involved the selection of significant events, each of which has its own specific features: 1) magnetospheric storm of March 13–14, 1989 that refers to one of the strongest magnetospheric storms observed since the space era onset and occurred during solar Cycle-22; 2) strong magnetospheric storms of October 28–31, 2003. The data presented here are the results of the study of the effect of strong magnetospheric disturbances on tropical cyclogenesis. The studies of global distribution of the effects of geomagnetic disturbances in the atmospheric data cover the areas where the atmospheric phenomena responsible for geomagnetic storms can be found. Tropical cyclogenesis is one of the most important and studied aspects of dynamics of mesoscale meteorological processes in terms of applicability. *Keywords:* magnetospheric storms; atmosphere; tropical cyclogenesis, weather

\*\*\*

УДК 523.52-42+523.52-423

## РОЛЬ И ВКЛАД ЭНДОГЕННОЙ АКТИВНОСТИ ЗЕМЛИ В СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ

#### Г.Я. Смольков

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Координация изучения C3C по национальным и международным программам и проектам не привела к общепризнанному мнению обо всех исходных факторах, их роли и вкладе в изменения окружающей среды. Традиционно сложившиеся подходы к изучению и объяснению C3C ограничиваются поиском корреляционных связей наземных откликов лишь на CA и потоки ГКЛ при вынужденных предположениях о нелинейности C3C, обратных и взаимных их связях, использовании для изучения связей в прошлом несовершенных прокси данных, приводящих к неопределенности результатов исследований, оставляя открытыми вопросы о цикличности, синхронности, полярной асимметрии, механизмах, нестабильности суточного вращения Земли, скачкообразных и других видах проявления природных событий и процессов. Учет эндогенной активности в области планетарной геофизики не приводит к решению перечисленных вопросов. Анализ состояния изучения C3C показал, что для получения ответов на открытые до сих пор вопросы необходимо учитывать эндогенную активность Земли, обусловленную гравитационным воздействием Луны, Солнца и других планет в процессе барицентрического движения Солнечной системы, а также последствия внешнего воздействия на Солнечную систему в целом, согласно галактоцентрической парадигме в геологии и астрономии.

Ключевые слова: солнечная активность (СА), галактические космические лучи (ГКЛ), солнечно-земные связи (СЗС), эндогенная активность Земли (ЭАЗ), центр массы Земли (ЦМЗ), нестабильность суточного вращения Земли (НСВЗ), парниковый эффект (ПЭ), Межправительственная группа экспертов по проблемам изменения климата (МГЭИК), галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии (ГЦПГА)

Посвящается памяти проф. Ю.В. Баркина

Актуальность изучения солнечно-земных связей (C3C) обусловлена их влиянием на состояние и изменчивость природной среды жизни и деятельности человечества. Знания о них необходимы для эффективного использования применяемых технологий, прогноза неблагоприятных природных событий и процессов, минимизации возможного ущерба от них [1].

Традиционно сложившиеся подходы к изучению и объяснению СЗС ограничиваются поиском корреляционных связей наземных откликов лишь на СА и потоки ГКЛ, попытками их объяснения понятиями профессиональных направлений. Общепризнанного мнения обо всех исходных факторах, их роли и вкладе в изменения окружающей среды до сих пор нет, несмотря на координацию их изучения по национальным и международным программам и проектам, поэтому вынужденно допускаются предположения о нелинейности СЗС, обратных связях, использовании для изучения их в прошлом несовершенных прокси данных, приводящих к неопределенности результатов исследований. При этом остаются открытыми вопросы о цикличности, синхронности, полярной асимметрии, механизмах, нестабильности суточного вращения Земли, скачкообразных и других формах проявления событий и процессов [2].

Изучение земной сферы осталось в ведении геологии и климатологии. По подходам к ее изучению до сих пор преобладает половинчатое геоцентрическое мировоззрение Птолемея. При этом отрицается возможность явлений глобального и закономерного характера. Считается, что основные геологические, климатические, биологические и другие планетарные изменения и явления вызваны причинами, обусловленными эндогенными процессами, происходящими внутри Земли и на ее поверхности при наличии практически стабильного потока энергии от Солнца [3-5]. Ярким примером деградации и так ограниченного поля геоцентризма явилась антропоцентрическая теория техногенного потепления климата. Создаваемые в ее рамках стохастические модели предполагают линейный рост приземных температур от увеличения в атмосфере индустриальных газов [6-8]. Эндогенная активность связывается или сводится также геоцентрически к вулканическим или сейсмическим процессам, замыкается на наземные проявления, обусловленные причинами земного происхождения [4, 9, 10], поэтому попытки учета эндогенной активности в рамках планетарной геофизики не приводят к разрешению перечисленных нерешенных вопросов [4, 10, 11, 12 и др.]. Подобным образом все обозримые подходы с попытками объяснения СЗС только наземными связями также остаются на уровне толкований геоцентризма, например [5, 13]. Это подтверждает наше мнение о том, что изучение СЗС неотложно нуждается в поиске и учете всех исходных (внешних) факторов, обусловливающих изменчивость природной среды [2, 14, 15]. Климатологи ООН вынужденно признали свои прогнозы по глобальному потеплению ошибочными (http://lb.ua/news/).

Изучение эволюции СА, климата и тектонической активности Земли показало, что эти процессы изменяются синхронно так, будто ими управляют из одного центра. У исследователей возникает естественный соблазн приписать дирижерские функции собственной отрасли знаний: солнечным, атмосферным, тектоническим процессам или воздействиям электромагнитных, магнитных и гравитационных полей. Но в этом конкурсе выигрывает Солнечная система в целом, так как основные источники климатических колебаний находятся вне Земли, поэтому неправильно сначала разбираться с наземными процессами взаимодействия суши, моря и атмосферры, а уже потом оценивать влияние внешних сил.

С точки зрения прикладной геофизики, проблема источников энергии, определяющей тепловой режим и тектоническую активность, – одна из фундаментальных в планетной геофизике, и решаться она должна системно, только в теснейшей связи с современными данными о составе, строении и эволюции Земли. Основными процессами могут быть только глубинные энергетические, в наибольшей мере снижающие потенциальную (внутреннюю) энергию планеты и системы Земля–Луна за счет трансформации ее в тепло и кинетическую энергию движения земных масс. Природа эндогенной активности Земли связана не просто с гравитационной, а с гравитационно-тепловой конвекцией. В свою очередь, любые перемещения земных масс также сопровождаются диссипацией кинетической энергии и выделением тепла, способствующего частичному расплавлению вещества верхней мантии и питанию тем самым магматизма Земли. Это тепло постепенно теряется с тепловым излучением Земли через ее поверхность и рассеивается в космосе [16].

Несмотря на различие профессиональных интересов, и, соответственно, подходов, неизбежно накапливалось совместное или индивидуальное осознание ключевых процессов и факторов - противофазности или полярной асимметрии, признание основными процессами энергообеспечения глубинной геодинамики (т.е. общее понимание роли ядра, доминирующей роли смещений ядра, процессов на границе мантия-ядро), внутреннего строения, кинематики структур Земли, деформации и взаимодействия ее оболочек, взаимодействия небесных тел Солнечной системы между собой, необходимости системного изучения природы климата, влияния внешних в Солнечной системе и отдаленных космических сил. Неизбежно вынужденной оказалась ориентация на концепцию эндогенной активности Земли, исходя из положений небесной механики [2, 14, 15, 17, 18].

При рассмотрении связей НСВЗ и глобальных изменений природных процессов обнаружились противоречия, для устранения которых вынужденно обращено внимание на существование третьей причины, одновременно влияющей на процессы в земном ядре и в климатической системе. Весь комплекс возникающих при этом в земных оболочках явлений назван «обобщенным приливом» [18], поскольку помимо классических приливов, притяжение Луной, Солнцем и другими планетами несферичных, неоднородных оболочек Земли, занимающих эксцентричные положения, приводит к относительным смещениям и колебаниям их центров масс, к вынужденным перемещениям масс [17]. Многолетняя НСВЗ коррелирует с геофизическими, гидрометеорологическими, геомагнитными, биологическими и другими процессами [19, 20] потому что все они имеют одну и ту же небесно-механическую первопричину - обобщенные приливы. Многолетние колебания угловой скорости вращения Земли признаны интегральным индексом глобальных изменений [18].

Ключевым вопросом теории природных планетарных процессов на Земле (и на других небесных телах) является вопрос об источниках энергии ЭАЗ и об основном механизме энергетического циклического возбуждения небесных тел. Решение этой вековой проблемы предложено на основе механизма возбуждения оболочек небесного тела внешними небесными телами. Основное положение развиваемой геодинамической концепции состоит в том, что планеты, спутники и Солнце представляют собой системы оболочек согласно их эволюции (у Земли: ядро, мантия и др.), которые совершают друг относительно друга малые поступательно-вращательные движения и деформационные и иные изменения, обусловленные внешней гравитацией. Важнейшим результатом явилось предсказание и обоснование существования векового тренда ЦМЗ относительно мантии, получившего четкие подтверждения в данных космической геодезии, и его механическое истолкование, как следствие векового близполярного северного дрейфа ядра Земли относительно мантии (со скоростью 27.4+/-0.8 мм/год). Изменение во времени приливов в вязкоупругой мантии планеты, порождаемых гравитационными силами взаимодействия с подвижным ядром, приводит к рассеянию механической энергии в материале планеты (в мантии), которая переходит в тепло и формирует температурное поле внутри планеты. Эта и многие другие проблемы геодинамики, геофизики и других наук о Земле решаются с помощью гравитационного механизма вынужденной раскачки ядра и мантии небесного тела влиянием всех окружающих небесных тел [13]. Эта прогрессивная концепция ЭАЗ явилась своего рода промежуточной, преддверием к ГЦПГА, гравитационно-плазменной модели Вселенной [3].

Смещения ядра приводят к смещениям ЦМЗ по отношению к мантии, которые стали доступными для изучения методами космической геодезии. При этом выявлен широкий спектр колебаний ЦМЗ и обнаружен его вековой тренд в северном направлении (в район полуострова Таймыр) [17, 21]. С другой стороны, по смещениям ЦМЗ удается восстановить стиль и особенности относительных смещений ядра и мантии Земли, изучить геодинамические следствия этих смещений, таких как деформации слоев мантии, вариации ее упругой энергии, мощности диссипации и формирования теплового потока на планете, других физических полей, перераспределение флюидных масс и др.

Циклические смещения ядра, с его колоссальной избыточной массой примерно в 17 масс Луны, оказывают циклические гравитационные воздействия на все оболочки Земли, включая ее биосферу. Все живое на Земле находится под неусыпным вниманием и контролем «сердца Земли» - колеблющейся системы ядро-мантия. Все геологические, геофизические и геодинамические процессы имеют циклический характер и происходят синхронно. Современные данные космической геодезии о вариациях положения ЦМЗ и о вариациях коэффициентов второй гармоники и гармоник более высокого порядка однозначно свидетельствуют в пользу существования векового тренда и колебаний ядра Земли. Однако не было предложено никаких теоретических обоснований изучаемым геодезическим изменениям Земли [17].

Геодинамическая модель вынужденных относительных смещений ядра уже получила впечатляющие приложения при изучении и решении сложных геофизических проблем. Ряд геодинамических и геофизических явлений получили теоретическое объяснение в хорошем согласии с данными наблюдений: в геодинамике - при объяснении векового дрейфа полюса оси вращения и неприливного ускорения в осевом вращении Земли; в гравиметрии – при объяснении наблюдаемых вековых изменений силы тяжести на известных ведущих гравиметрических станциях мира; в океанологии - при объяснении векового изменения как глобального, так и средних уровней океана в Северном и Южном полушариях; в геодезии - при интерпретации наблюдаемых явлений вековых укорачиваний длин широтных кругов в Северном полушарии и их удлинений в Южном полушарии, вследствие чего Земля имеет не сферически симметричную, а «квазигрушевидную» форму; а также в решении проблем в сейсмологии и климатологии и широкого ряда других геофизических, геодинамических, геодезических явлений на Земле и других планетах и спутниках [17].

Исходя из концепции ЭАЗ, энергетический баланс Земли и мощность процессов составляют: сейсмических событий 3х10<sup>10</sup> Вт, вулканических событий 10<sup>10</sup> Вт, тепловой конвекции 10<sup>13</sup> Вт, теплового потока (4.4-4.8)·10<sup>13</sup> Вт, приливов 4·10<sup>11</sup> Вт, диссипации из-за колебаний ядра и вязкоупругих деформаций мантии 3.38.1014 Вт, полная мощность диссипации энергии в мантии Земли 10<sup>14</sup>-10<sup>15</sup> Вт. Все остальные эндогенные источники энергии либо несоизмеримо меньше перечисленных, либо полностью обратимы благодаря конвективному массообмену в мантии. Эндогенными источниками энергии возбуждается и магнитное поле Земли. Считается почти очевидным, что генерация геомагнитного поля связана с конвективными процессами, развивающимися в электропроводном веществе внешнего (жидкого) ядра Земли. Процесс гравитационной дифференциации земного вещества - мощнейший источник эндогенной энергии на Земле - одновременно также может питать собой и магнитное поле Земли [12, 17].

Таким образом, Земля находится одновременно под воздействием непрерывно изменяющихся потоков излучения Солнца, солнечного ветра, ГКЛ, а также гравитационных сил со стороны Луны, Солнца и других планет, поэтому природные процессы, происходящие в оболочках Земли, обусловливаются не только СА и ГКЛ, но и ЭАЗ. Гравитационное воздействие на Землю осуществляется как непосредственно каждым, так и корпоративно всеми телами Солнечной системы в процессе ее движения относительно барицентра в целом под влиянием Галактики. Следовательно, наряду с потоками ГКЛ имеют место еще два внешних определяющих фактора, обусловливающих две сопутствующие ветви СЗС и изменчивость среды использования многих наземных и орбитальных технологий: 1) воздействие геоэффективных потоков электромагнитного излучения Солнца, энергичных частиц и солнечного ветра на атмосферу и гидросферу, магнитосферу и ионосферу; 2) трансформация баланса энергии при смещении ЦМЗ, изменении формы планеты, НСВЗ, трансляционных смещениях и деформациях всех оболочек вследствие гравитационного воздействия Луны, Солнца и других планет, ответственных за возмущения геомагнитного и гравитационного поля Земли, преобразование части механической энергии деформаций в тепловую и т.д. [17], создание дополнительного внутреннего теплового поля Земли, изменяющегося соответственно эволюции ЭАЗ. С учетом геофизических и геодинамических последствий внешнего воздействия на Солнечную систему в целом термин «солнечно-земные связи» приобретает смысл «внешнеземных» связей.

Анализ состояния исследований природы СЗС свидетельствует о том, что солнечно-земная физика находится на поисковой стадии. Сложившиеся подходы к изучению СЗС страдают недостаточной системностью, отсутствием кооперации специалистов необходимых профилей, недостаточным учетом внешних факторов воздействия на Землю. Неудиви-

тельно, что при таком различии мнений об исходных факторах и подходах к изучению СЗС невозможно представить логически и физически обоснованной их сути, глобальной и региональной пространственно-временной картины, достоверные прогнозы их изменений [14]. В подходах, основанных на традиционно сложившемся (ограниченном) понимании факторов, все еще сохраняются открытыми прежние и возникают новые вопросы, на которые нет ответов [3]. Для их получения необходимо, наряду с СА и потоками ГКЛ, учитывать последствия гравитационного воздействия на Землю со стороны Луны, Солнца и других планет в процессе барицентрического движения Солнечной системы в гравитационном поле Галактики, а также воздействия на Солнечную систему в целом дальнего Космоса, обусловленные ими пространственно-временные свойства теплового поля Земли и других видов ее активности.

Исследование выполнено по Разделу II.16. плана НИР ФГБУН ИСЗФ СО РАН.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лаверов Н.П. Медведев А.А. Космические исследования и технологии: расширение знаний об окружающем мире. М.: Доброе слово, 2012. 180 с.

2. Сорохтин О.Г., Чилингар Дж.В., Сорохтин Н.О. Теория развития Земли: происхождение, эволюция и трагическое будущее. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. 752 с.

3. Баренбаум А.А. Галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 544 с.

4. Хаин В.Е. и др. Планета Земля от ядра до ионосферы. 2-е изд. М.: КДУ, 2008. 244 с.

5. Gobinddass M.L. et al. Systematic biases in DORIS-derived geocenter time series related to solar radiation pressure mis-modeling // Journal of Geodynamics. 2009. V. 83, № 9. P. 849–858.

6. Берри Б.Л. Закономерности распределения периодов колебаний астрономических, гелио-геофизических и других природных процессов. ADP&P, 2008. V. 6 // http://geoberry.ru/avtor.html.

7. Берри Б.Л. Управление климатом, его прошлое и будущее. Журнал «Холод'ОК!». 2008. № 1(6). С.72–78.

 Берри Б.Л. Пространственно-временные закономерности природных колебаний и их физические основы. 2011;
 Гармонические модели движения солнечной системы и гелио-геофизических процессов, реконструкция и прогнозы.2011// http://geoberry.ru/

9. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А. Влияние солнечной активности на погодно-климатические характеристики тропосферы // Солнечно-земная физика. 2012. Т. 21. С. 98.

10. Смольков Г.Я., Баркин Ю.В. Солнечно-земные связи: новое в изучении и объяснении // Земля и Вселенная. 2016. № 3.

11. Авсюк С.В. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 188 с.

12. Современные глобальные изменения природной среды: в 4 т. / Отв. ред. Н.С. Касимов, Р.К. Клиге. М.: Научный мир, 2006. Т. 1. 696 с., Т. 2. 775 с.

13. Горькавый Н.Н., Трапезников Ю.А., Фридман А.М.. О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли // Доклады РАН. 1994. Т. 338, № 4. С. 525.

14. Sidorenkov N.S. The interaction between earth's rotation and geophysical processes // WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009. 317 p.

15. Smolkov G.Ya., Barkin Yu.V. Toward systematic and interdisciplinary study of solar-terrestrial relations // Astronomicheskii Tsirkulyar. 2014. V. 1619. P. 1–11.

16. Gray L.J. et al. Solar influences on climate // Rev. Geophys. 2010. V. 48, RG4001.

17. Баркин Ю.В. Все сноски на его публикации см. на<MSU Istina/Barkin>

18. McComas D.J. et al. The heliotail revealed by the interstellar boundary explorer (IBEX) // The Astrophysical Journal. 2013. V. 771, № 2. P. 77. doi:10.1088/0004-637X/771/2/77.

19. Второй доклад МГЭИК об оценках изменения климата // ipcc.ch>pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd...2nd...

20. Великанов А.Е. О природе магнитного поля Земли и передвижении магнитных и географических полюсов // Геофизика XXI столетия: 2005 год. Сб. трудов VII геофизических чтений (3-5.03.2005 г., Москва). М.: Научный мир, 2006. 496 с.

21. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. М.: Научный мир, 2009. 520 с.

### A ROLE OF ENDOGENOUS ACTIVITY OF THE EARTH AND ITS CONTRIBUTION INTO THE SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS

#### G.Ya. Smolkov

Institute of Solar-Terrestrial Physics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

*Abstract.* Coordinated studies of solar-terrestrial relations (STRs) within national and international programs and projects have so far provided no consensus on the factors that cause environmental changes. Traditional approaches to study and explanation of STRs are limited to search for correlated terrestrial responses, occurring only to solar activity (SA) and the flows of galactic cosmic rays (GCRs), involving involuntary assumptions about STRs nonlinearity, their inversion and mutuality, and the use of unreliable proxy data in the previous study of relations, which causes uncertainty in research findings and provides no understanding of cyclicity, synchronicity, polar asymmetry, mechanisms and instability of the Earth's daily rotation, and intermittent and other occurrences of natural events and processes. Endogenous activity considered within the field of planetary geophysics does not contribute to their understanding either. Analysis of the STRs study has shown that these current problems can be solved taking into account endogenous activity the Earth, caused by the gravitational influence of the Moon, Sun and other planets in the barycentric motion of the solar system, as well as external factors exerting their influence on the solar system as a whole according to galactocentric paradigm in geology and astronomy.

*Keywords:* solar activity (SA), galactic cosmic rays (GCRs), solar-terrestrial relations (STRs), endogenous activity of the Earth (EEA), center of mass of the Earth (EMC), Earth's daily rotation instability (EDRI), greenhouse effect (GHE), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), galactocentric paradigm in geology and astronomy (GCPGA)

\*\*\*

УДК 523.52-42+523.52-423

## СВИДЕТЕЛЬСТВА ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗЕМЛЮ И СОЛНЕЧНУЮ СИСТЕМУ В ЦЕЛОМ

## Г.Я. Смольков

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. Невозможность объяснения природы солнечно-земных связей исходя из корреляционных связей наземных откликов лишь на солнечную активность и потоки ГКЛ неизбежно привела к необходимости учета еще эндогенной активности Земли, обусловливаемой гравитационным воздействием Луны, Солнца и других планет в процессе барицентрического движения Солнечной системы, а также последствия внешнего воздействия на Солнечную систему в целом. Приведены свидетельства таких воздействий и их наземных последствий, синхронно зарегистрированных в 1997–1998 гг.

Ключевые слова: солнечная активность (СА), солнечно-земные связи (СЗС), Международный комитет по проблемам глобальных изменений геологической среды (GEOCHANGE), центр массы Земли (ЦМЗ), межзвездная среда (МЗС), галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии (ГЦПГА), галактические космические лучи (ГКЛ)

# Посвящается памяти проф. Ю.В. Баркина

Невозможность объяснения природы СЗС исходя из корреляционных связей наземных событий и процессов неизбежно привела к ориентации на концепцию эндогенной активности Земли, обусловленной гравитационным воздействием Луны, Солнца и других планет в процессе барицентрического движения Солнечной системы в M3C Галактики, и даже на последствия внешнего воздействия на Солнечную систему в целом [1-5]. Это означает неизбежный переход от геоцентрических воззрений на изменчивость окружающей природной среды к истолкованию ее в рамках галактоцентрической парадигмы в геологии и астрономии [6-8]. Создание галактической парадигмы открыло новый этап в развитии естественных наук, при котором астрономия и геология уже не могут рассматриваться как независимые друг от друга области научного знания [6].

По нескольким вариациям глобальных усредненных поверхностных температур, инструментально зарегистрированных с 1850 г., проверено: не имеют ли десятилетние и мультидекадные колебания климата астрономическую природу. Регистрограммы, выведенные по орбитам планет, представляют очень похожие спектры мощности. На двух регистрограммах тесно корреспондируют одиннадцать частот с периодом 5-100 лет. Среди них большие климатические колебания типа «пик-впадина» с амплитудой около 0.1 и 0.25 °C и периодами около 20 и 60 лет, соответственно, синхронизированы с орбитальными периодами Юпитера и Сатурна. В температурных регистрограммах также видны 11- и 22летние солнечные циклы. 9.1-летний цикл синхронизируется с орбитальными циклами Луны. Феноменологическая модель, основанная на этих астрономических циклах, может быть использована для реконструкции (восстановления характера) колебаний температуры с 1850 г. Установлено, что, по крайней мере 60 % глобального потепления, наблю-
денного с 1970 г., были вызваны совместным действием вышеуказанных естественных климатических колебаний. Частичный прогноз показывает, что климат может быть стабилизированным или прохладным до 2030–2040 г. Качественно обсуждены возможные физические механизмы с акцентом на явление коллективной синхронизации связанных осцилляторов [20]. Обнаружена синхронизация проявлений СЗС и в галактических масштабах времени [6, 7].

Весьма интересным представляется обнаружение корреляции текущего потепления земной поверхности с эволюцией солнечного динамо в 1610-1970 гг. (эпоху голоцена). Солнечные данные были сглажены в целях устранения их вариаций с 11летним периодом. В то время как полный (общий) градиент температуры в течение периода исследования равен 0.087 °С/век, градиент 0.077 °С/век коррелирует с экваториальной (тороидальный) компонентой магнитного поля Солнца. Половина из него объясняется увеличением общей солнечной иррадиации (TSI) в течение сроков исследования, в то время как другая половина оказалась обусловленной обратной связью благодаря испарению водяного пара. Необъяснимый градиент 0.040 °С/век коррелирует с полярным (полоидальным) магнитным полем Солнца. Остаточное повышение температуры в течение этого периода не коррелирует с солнечной изменчивостью (SV) и составляет 0.051 °С/век. Последнее приписывается климатологическому воздействию и внутренним модам вариаций. Путем вычитания вышеупомянутых компонент из наблюдаемых температур обнаружен остаточный избыток 0.31° в 1999 г. как триангулярно взвешенный остаток за период 1990-2008 гг. Показано, что солнечное воздействие на наземную температуру, ассоциированное со значительной обратной связью, является особенностью, объясняющей некоторые хорошо наблюдаемые события [9].

При анализе астрофизических воздействий на климат отмечены следующие трудности, с которыми сталкиваются исследователи, когда пытаются приписать тренды климата воздействию СА: солнечное воздействие имеет значительные неопределенности, отклики климатической системы в целом и продолжительности ледниковья, в частности, являются нелинейными, датировки продолжительности флуктуаций и СА имеют неопределенности, а также вклады вулканического и других воздействий; сложные модели глобальной циркуляции нуждаются в учете всех нелинейных взаимодействий и механизмов обратной связи в рамках климатической системы [9].

GEOCHANGE (научные организации и ученые более чем из тридцати стран) и Глобальная Система Обнаружения Наводнений (Global Flood Detection System, Experimental system aiming at providing alerts for flood disasters) в 2010 г. сообщили о скачкообразных изменениях ряда природных процессов, синхронно произошедших в 1997–1998 гг.: 1) увеличение скорости дрейфа северного магнитно-

го полюса более чем на 500 % с 1980 по 2010 г., отражающее начало повышения геодинамической активности Земли; 2) начало аномальных изменений некоторых геофизических параметров Земли, зарегистрированных с помощью спутниковой системы лазерной дальнометрии (ЛДС) США, в т.ч. скачок 1998 г. в значениях коэффициента J2, отражающего соотношение экваториального и полярного радиусов Земли. Специалисты НАСА оказались в замешательстве, сообщив, что если до 1998 г. спутники регистрировали неуклонное уменьшение радиуса Земли в экваторе и его увеличение в полюсах, то с 1998 г. эта тенденция резко изменилась на противоположную – Земля стала расширяться в области экватора и сжиматься в областях полюсов. Это был совершенно необычный скачок в изменении формы Земли, и однозначного убедительного ответа на вопрос о причинах этого явления в НАСА не было найдено); 3) возрастание сейсмической и вулканической активности: резкое возрастание числа сильных землетрясений и количества погибших при сильных землетрясениях по экспоненциальному закону, в 1997-1998 гг. зарегистрирован глубокий минимум вулканической активности и последующее резкое ее повышение; 4) скачкообразное изменение солнечной радиации в 1998 г. и влияние СА на глобальные изменения климата; 5) изменение уровня Мирового океана, совпавшее по времени с аномалией коэффициента J2, фактически в три раза превосходящей влияние перераспределений масс воды в Мировом океане; 6) глобальные изменения температуры тропосферы: скачкообразное аномальное повышение глобальной температуры тропосферы в 1998 г.; 7) цунами: резкое изменение тенденции ежегодных чисел как для катастрофических цунами, так и для средних и слабых, «скачок» ежегодных чисел цунами с 1998 г. описывается экспоненциальными трендами; 8) резкое повышение числа торнадо, северо-атлантических тропических штормов, общего числа ураганов в Атлантическом бассейне, стабильное увеличение числа наводнений; значительные и необычные события с декабря 1997 г. по февраль 1998 г.; 9) «скачок» в увеличении числа лесных пожаров в 1998 г. [10].

По совокупности эти спорадические изменения природных условий авторами сообщений были названы глобальным «энергетическим скачком» процессов во всех слоях Земли – литосфере, гидросфере, атмосфере и магнитосфере. Начало глобального «энергетического скачка» авторы соотносят с 1998 г. Скачок ЦМЗ примерно на 20 мм вдоль полярной оси, резкий изгиб на 90° траектории эпицентра центра масс на поверхности Земли, судорожное увеличение скорости движения северного геомагнитного полюса в 1998 г.; скачок в значении коэффициента второй зональной гармоники  $J_2$  (на 2.5  $\cdot 10^{-10}$ ), скачок в значении силы тяжести на гравиметрической станции в Медичине (на 5.5 микрогалл), скачкообразное повышение среднего глобального уровня океана на 7.2 мм, скачки средних уровней океана в Северном и Южном полушариях (15 мм, 0 мм), снижение периода свободной нутации Земли и скачки других природных процессов произошли в 1997– 1998 гг. синхронно.

Скачкообразные изменения активности различных геофизических и геодинамических явлений исследованы с позиций геомодели вынужденных колебаний ядра и деформации мантии Земли, с точки зрения рассматрения их как следствия фундаментального явления – скачка центра масс ядра относительно центра масс мантии [1]. Указанное явление названо «галопированием ядра» [1]. Сам факт подобного поведения ядра был выявлен по однонаправленному скачку ЦМЗ, предсказанному и обнаруженному на основе данных спутниковых наблюдений системы DORIS [11] (рис. 1).

Перечень гелиогеофизических событий скачкообразного характера, произошедших в 1997–1998 гг., возможно дополнить из других источников, зарегистрированных на Земле и на Солнце, например: изменение среднего радиуса Солнца и амплитуды солнечного излучения (рис. 2, 3), скорости распространения корональных выбросов массы (СМЕ, рис. 4); долготное распределение всех эруптивных протуберанцев в микроволновом излучении; усиление рентгеновского и радиоизлучения Солнца во время соединений, а также активизация возникновения солнечных пятен (SSN, рис. 5).

Вышеприведенные события, синхронно зарегистрированные на Земле и на Солнце, явно свидетельствуют о внешнем воздействии на Солнечную систему в целом. В этой связи упоминается взрыв сверхновой звезды SN1987A 23.02.1987 г. в Большом Магеллановом Облаке (спутнике нашей Галактики) [12]. При благоприятных обстоятельствах (относительная близость к Галактике, направленности выброса значительной массы и волнового излучения на Солнечную систему и т.д.) не исключено внешнее воздействие. Несколькими лабораториями были зарегистрированы вспышки нейтринного излучения. Но за несколько секунд до регистрации первых импульсов нейтрино сработала гравитационная волновая антенна в Италии. Зафиксированный поток энергии был необычайно высок. Если носителем потока энергии, зафиксированного гравитационным детектором, кроме гравитационной волны была и скалярная волна, то поток вполне мог соответствовать вспышке сверхновой [12]. Это соответствует открытию астрофизического явления струйного истечения газопылевого вещества из центра спиральных галактик (сильно влияющего на процессы в Солнечной системе и на ее планетах) и разработанной основе новой галактоцентрической гравитационно-плазменной модели Вселенной [6].

Механизм вынужденных колебаний и смещений оболочек Солнца, планет и спутников под гравитационным воздействием всех тел Солнечной системы [1] позволяет дать подобное объяснение и, в частности, интерпретировать явление синхронности скачков на различных телах Солнечной системы [1]. Вследствие небесно-механического взаимодействия тел Солнечной системы, оболочек Солнца, планет и спутников они возбуждаются синхронно, что находит отражение в синхронных вариациях их природных процессов. В результате синхронные скачкообразные события 1997–1998 гг. получают определенную интерпретацию.

Относительные задержки вследствие инерционности откликов позволяют отнести к приведенному перечню скачкообразных синхронных событий дополнительно:

остаточный избыток усредненной температуры Земли ~0.31° в 1999 г., триангулярно взвешенным остатком за период 1990–2008 гг., обнаруженный при рассмотрении связи вариаций усредненной температуры поверхности Земли с солнечным динамо [9];

скачкообразное повышение температуры в 1998 г. и сохранение повышенного ее уровня в течение 16 лет [15];

рекордно экстремальные и необычные события Эль-Ниньо 1997–1998 гг. в некоторых регионах США по данным КА TOPEX/Poseidon (предшественника КА Jason-2).



Рис. 1. Внутреннее строение Земли, направление векового дрейфа ЦМЗ. Трендовые составляющие координат центра масс Земли в период 1993–2007 гг. и скачки в значениях его декартовых гринвичских координат в период 1997–1998 гг. [11] (слева), крутое изменение траектории полюса смещения ЦМЗ с поворотом почти на 90° в 1997–1998 гг. в район п/о Таймыр [1] (справа).



Рис. 2. Линейные тренды радиуса Солнца до и после скачкообразного изменения радиуса в 1997–1998 гг. на+0"187. Оценки линейных трендов составляют – 0.0083 "/год (до скачка) и – 0.0124 "/год (после скачка) [13].



Рис. 3. Скачкообразное изменение среднегодовых уровней солнечной радиации в 1998 г. Инцидент солнечного излучения в Монтеррее, МХ с июля 1983 по декабрь 2005 г. (1 ед.=1000 ккал/м<sup>2</sup>, ломаной кривой показано среднегодовое солнечное излучение, гладкой кривой ее кубическая аппроксимация в ккал/м<sup>2</sup>) [1].



Рис. 4. Скачкообразное увеличение скорости распространения СМЕѕ в 1998 г., усредненной за кэррингтоновские периоды по данным LASCO (жирная линия с темными кружками) по сравнению с ежедневными значениями чисел солнечных пятен SSNs. Погрешности за каждый оборот оценены по данным SOHO. LL и HL – поведение скоростей низко- и высокоширотных CMEs, соответственно [14].

В целом, зима (декабрь 1997 г. – февраль 1998 г.) была второй самой теплой и седьмой влажной с 1895 г. Тяжелые погодные условия проявились в виде наводнения на юго-востоке, ледяного шторма на северо-востоке, наводнения в Калифорнии и тор-

надо во Флориде. В последнее время, по данным КА Jason-2, картина высот и температур поверхности моря напоминала динамику в Тихом океане весной 1997 г. Это могло быть предвестником большого Эль-Ниньо, поэтому 8 мая Национальным центром США по прогнозированию окружающей среды был объявлен Алерт «Внимание, Эль-Ниньо!», с вероятностью 65%-ного развития значительного Эль-Ниньо в течение лета 2014 г. 4.12.2014 г. Центр прогнозирования сообщил, что «существует шанс примерно 65%-ного, что условия Эль-Ниньо будут присутствовать в Северном полушарии в течение зимы и продолжатся до весны 2015 г.». Модели аномалий ветра и осадков, как правило, четко не указывают на взаимодействия атмосферы с океаном. Таким образом, повышенная активность в океане сохраняется в 2014 г. сходной с таковою в 1997-1998 гг. (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/).



Рис. 5. Стимулирование зарождения активных областей (слева) и интенсивности развития 23-го цикла СА (справа) возможной внешней причиной [12]. 23-й цикл СА оказался неординарным – с низкой амплитудой и увеличенной длительностью, что по результатам исследований аритмии СА свидетельствует о сбое ее 11-летней цикличности [16].

Во время соединения Земля-Солнце-Юпитер в 2012 г. обнаружено, что даты землетрясений лета этого года, будучи расположены по соответствующим оборотам (CR) Солнца 2123-2127, образуют четыре дискретные, изолированные друг от друга, группы с 30-дневной периодичностью землетрясений в каждой группе. На Солнце моменты землетрясений соответствуют четырем группам дискретных каррингтоновских долгот (CL) 4-секторной структуры крупномасштабного открытого магнитного поля Солнца (КОМПС). Вблизи каждого момента землетрясения обнаружены мощные корональные выбросы масс типа Halo и ParticleHalo. Неожиданным оказалось то, что моменты землетрясений и начала корональных выбросов приблизительно совпадали, то опережая, то отставая друг от друга. Это означает, что у землетрясений и корональных выбросов Солнца есть какая-то внешняя общая причина. Предположение, что это может быть влияние Юпитера, подтверждено открытием явления «затмения

Юпитера Солнцем» в мае-июне 2012 г., когда Солнце оказалось между Юпитером и Землей и фиксировалось существенное уменьшение силы землетрясений на Земле [17]. Это безусловно свидетельствует о внешнем влиянии на Землю.

Приведенный комплекс гелиогеодинамических скачкообразных событий, синхронно произошедших в 1997–1998 гг., понятен и объясним в рамках концепции эндогенной активности Земли и ее геодинамической модели [1]. Отмечен систематический характер повторных скачков ядра и природных процессов и в другие годы, в частности в 1986–1987, 2001–2002, 2010–2012 и др. Особенно важно то, что синхронные скачки природных процессов происходят не только на Земле, но и на Солнце, Луне, Марсе и других телах Солнечной системы, причем синхронно [1]. Синхронность скачков гелиогеофизических показателей явно свидетельствует о внешнем воздействии на Солнечную систему с проявлением геодинамических и геофизических откликов.

Климатологи ООН вынужденно признали свои прогнозы по глобальному потеплению ошибочными. Но, отмечая значительное повышение геодинамической активности нашей планеты с 1998 г., GEOCHANGE по-прежнему ориентируется на внешнее воздействие только солнечной активности, основываясь лишь на корреляционных связях без объяснения их физических механизмов, не придавая значения вкладу гравитационного воздействия на Землю и не учитывая роли изменений глубинной геодинамики. Ее роль была показана в работах [1], в том числе для скачкообразных изменений активности процессов (и не только в 1998 г.). Надежные наблюдательные данные свидетельствуют, что колебания основных оболочек Солнца и планет происходят синхронно и взаимосвязанно. Особо обратим внимание на свойство неинерциальности относительного движения оболочек в системе координат барицентра Солнечной системы. Движение центра масс Солнца в барицентрической системе координат коррелирует с геодинамическими и геофизическими процессами. Указанные явления и динамические факторы необходимо изучить более детально.

После скачков уровень геодинамической и геофизической активности по всем индексам сохранился повышенным. СА, гравитационное (приливное) воздействие Луны, Солнца и других планет, барицентрическое движение Солнечной системы могут обусловить лишь эволюционный характер изменений усредненных за год и более параметров природной среды. Отдельные, даже мощные солнечные события (например, СМЕ) не в состоянии обусловить скачкообразные отклонения трендов усредненных геодинамических и геофизических показателей с последующим повышением на протяжении ряда лет, поэтому они не могут быть причиной спорадических изменений характера тренда геодинамических и геофизических процессов, произошедших в 1997-1998 гг. Возможно накопление напряжений до критического уровня в процессах взаимодействия и деформации оболочек Земли (вследствие дрейфа ЦМЗ к полюсам) с последующим судорожным высвобождением энергии. Но существенное повышение уровня эволюционных трендов после скачков может происходить лишь путем добавления энергии планете или Солнечной системе в целом. Заметное воздействие на Солнечную систему, а следовательно, и на Землю, оказывают электромагнитные структуры и облака межзвездной плазмы Дальнего Космоса [12]. Не исключено добавление дополнительной массы и энергии в Солнечную систему извне, как это отмечено при изложении обстоятельств выхода МЗ Вояджер 1 из Солнечной системы в неоднородную межзвездную среду (рис. 6).

Необходимо изучение фактов воздействия непосредственно на Солнечную систему, и основания для этого имеются. Данные МЗ Вояджер 1 показали обстоятельства взаимодействия Солнечной системы с M3C [3].



Рис. 6. Среднее количество протонов с энергией 0.5 МэВ (кривая А), электронов галактических космических лучей (кривая В) и протонов с энергией 200 МэВ (кривая С) по данным КЗ Вояджер1 2012 г.

Данные МЗ Вояджер 1 свидетельствуют о взаимодействии межзвездного облака с плазмой Солнечной системы при пересечении ею неоднородности M3C. При этом установлено соединение силовых линий солнечного и межзвездного магнитных полей (т.е. отсутствие ожидаемого обращения полярности), что позволяет малоэнергичным заряженным частицам гелиосферного происхождения уходить из гелиосферы, а высокоэнергичным частицам окружающей M3C перетекать в гелиосферу, к Солнцу. Формирование переходной области «со значительными концентрациями атомов водорода и протонов плазмы» на границе гелиосферы со смежным межзвездным окружением, установленное при теоретическом моделировании явления, также свидетельствует о возможности возмущения Солнечной системы «значительной концентрацией атомов водорода и протонов плазмы» в переходной области [18]. Следовательно, в процессе выхода Вояджера 1 из гелиосферы (рис. 6) инструментально зарегистрировано ее возмущение извне. При таких обстоятельствах судорожный характер скачков геодинамических и геофизических параметров вполне мог

быть обусловленным срывом напряжений асимметричного и эксцентричного взаимодействия неоднородных оболочек Земли благодаря триггерному воздействию извне [19]. Рисунок 7 отображает пересечение КЗ Вояджером1 межзвездных «Волн цунами» в октябре-ноябре 2012 г., апреле-мае 2013 г. и феврале-ноябре 2014 г. Образная картина межзвездного открытия КЗ Вояджер 1 по воздействию на Солнечную систему межзвездной неоднородностью показана на рис. 8. На рис. 9 приведен фрагмент видеокарты кометообразного хвоста Солнечной системы, зарегистрированной NASA's Interstellar Boundary Explorer (IBEX) 10 июля 2013 г. Это второй уникальный факт потенциальной подверженности Солнечной системы (в т.ч. Земли) воздействию со стороны объектов МЗС.

«Галопирование ядра» могло быть обусловлено ударной волной или неоднородностью МЗС. Судорожное повышение температур, теплосодержания

атмосферы и других обзорно вышеперечисленных геофизических параметров могло быть откликом на прохождение через Солнечную систему ударной волны или неоднородности пронизывающего ее водородного облака, что подтверждается сообщениями NASA в 1999 г., 2009 г. и 2010 г. о нахождении Солнечной системы на пути водородного потока из Дальнего Космоса (схематично изображено на рис. 8) с выходом из него в августе 2012 г., что привело к получению ею дополнительной энергии и вещества, разогреву Солнца и планет [1]. Интерпретация [18] соответствует данным Вояджеров 1 и 2 о реальном взаимодействии гелиосферы с МЗС. Следовательно, исходные причины изменения геодинами-ческой и геофизической активности связаны не только с эволюцией Солнца, возмущением Солнечной системы в целом Галактикой, но и с субстанциями Дальнего Космоса (неодно-родной M3C).



Рис. 7. Подверженность КЗ Voyager1 возможным воздействиям межзвездных «Волн цунами» в октябре-ноябре 2012 г., апреле-мае 2013 г. и феврале-ноябре 2014 г. (<u>http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/16dec\_voyagercme/</u>).



Рис. 8. Вояджером сделано межзвездное открытие картины воздействия M3C на Солнечную систему. Художественная концепция о Локальном Межзвездном Облаке, названном «Локальным отпором» – Local Fluff." Исполнено: Линдой Хафф (американским ученым) и Присциллой Фриш (Чикагский университет) //science.nasa.gov/science-news/scienceat-nasa/2009/23dec\_voyager/.



Рис. 9. Фрагмент видеокарты хвоста Солнечной системы, впервые зарегистрированной NASA's Interstellar Boundary Explorer (IBEX) 10 июля 2013 г. Структура сечения хвоста напоминает 4-лепестковый цветок. Межзвездный ветер своим воздействием формирует хвост, отклоняя его в одну сторону. Неоднородности M3C модулируют динамику внешнего воздействия на гелиосферу (http://science.nasa.gov/science-news/science-atnasa/2013/10jul\_ibex/).

Приведенные сведения, бесспорно, свидетельствуют о подверженности Земли и всей Солнечной системы внешним воздействиям ближнего (внутри гелиосферы) и Дальнего (МЗС и Галактика) Космоса. Зарегистрированные синхронные события и процессы объяснимы в рамках концепции эндогенной активности, обусловленной обстоятельствами барицентрического движения Солнечной системы, как и научных основ новой естественнонаучной галактоцентрической концепции, призванной объединить астрономическую и геологическую области знания в рамках более общей системы взглядов. Это делает невозможным дальнейшее развитие представлений о Земле и Космосе как независимых друг от друга научных дисциплин [6]. Объяснение всех особенностей и механизмов СЗС возможно только при учете всех внешних факторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баркин Ю.В. Все сноски на его публикации см. на<MSU Istina/Barkin>.

2. Смольков Г.Я., Баркин Ю.В. Солнечно-земные связи: новое в изучении и объяснении // Земля и Вселенная. 2016. № 3.

3. Sidorenkov N.S. The interaction between Earth's rotation and geophysical processes // WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009. 317 p.

4. Smolkov G.Ya., Barkin Yu.V. Toward systematic and interdisciplinary study of solar-terrestrial relations // Astronomicheskii Tsirkulyar. 2014. V. 1619. P. 1–11.

5. Smolkov G.Ya., Barkin Yu.V. External factors of solar-terrestrial relations // Astronomical and Astrophisical Transactions. 2015.

6. Баренбаум А.А. Галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 544 с.

7. Берри Б. Управление климатом, его прошлое и будущее // Журнал «Холод'ОК». 2008. №1 (6). С. 72–78.

8. Хаин В.Е., Короновский Н.В. Планета Земля. От ядра до ионосферы. 2-е изд. М.: КДУ, 2008. 244 с.

9. De Jager C. et al. Quantifying and specifying the solar influence on terrestrial surface temperature // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2010. V. 72. P. 926–937.

10. Халилов Э.П. Доклад Международного комитета GEOCHANGE о «Глобальном энергетическом скачке на нашей планете, начиная с 1998 г.» 2010, www.climatechange2013.org.

11. Zotov L.V., Barkin Yu.V., Lubushin A.A. Geocenter motion and its geodynamical contenst. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2009. P. 98–101.

12. Брюшинкин С.М. Взрыв сверхновой потряс Солнце и Землю? 2012 г. Да! //http://my.mail.ru/community/catastrof/44A20163B09E556E.html; http://knu.znate.ru/docs/index-477390.html.

13. Chapman G.A., Dobias J.J., Walton S.R. On the variability of the apparent solar radius // The Astropysical Journal. 2008. V. 681. P. 1698–1702.

14. Gopalswamy N., Hasan S.S., Ambastha A. Heliophysical Processes. Springer-Verlag, Berlin, 2010. 282 p.

15. Essex C. et al. Taken by Storm. The Troubled Science, Policy and Politics of Global Warming. Toronto, key Porter Books, 2002. 320 p.

16. Козлов В.И., Козлов В.В. Аритмия Солнца. В космических лучах. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2014. 238 с.

17. Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф. Природа сильных землетрясений на Земле и мощных выбросов корональной массы на Солнце. Лето 2012 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 6. С. 738.

18. Проворникова Е.А. Нестационарные течения частично-ионизованной плазмы с учетом эффектов перезарядки на границе гелиосферы и в межзвездной среде: Дис. ... к.ф.-м.н. М.: ВПО МГУ, 2013. 12 с.

19. Шпитальная А.А. и др. О возможности воздействия гравитационных волн на активность Земли и Солнца // Динамика и эволюция звездных систем. М.–Л., 1975. С. 129–137.

### EVIDENCE ON EXTERNAL FACTORS INFLUENCING THE PROCESSES IN THE EARTH AND SOLAR SYSTEM AS A WHOLE

#### G.Ya. Smolkov

Institute of Solar-Terrestrial Physics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. The impossibility of attributing the nature of solar-terrestrial relations to correlated terrestrial responses, occurring only to solar activity and the flows of GCRs, has inevitably necessitated taking also into account endogenous activity of the Earth,

caused by the gravitational influence of the Moon, Sun and other planets in the barycentric motion of the solar system, as well as external factors exerting their influence on the solar system as a whole. The evidence presented here is based on such impacts and their associated effects on Earth, simultaneously recorded in 1997-1998.

*Keywords:* solar activity (SA), solar-terrestrial relations (STRs), International Committee on GEOCHANGE (Global Geological and Environmental Change), Earth mass center (EMC), interstellar medium (ISM), galactocentric paradigm in geology and astronomy (GCPGA), Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

\*\*\*

УДК 550.371.2

## ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В ЗОНАХ АКТИВНЫХ РАЗЛОМОВ ЮЖНОЙ ЯКУТИИ

*С.В. Трофименко<sup>1</sup>, Н.Н. Гриб<sup>2</sup>* 

<sup>1</sup> Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, Хабаровск, Россия

<sup>2</sup> Технический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Амосова, Нерюнгри, Россия

Аннотация. Представлены результаты геофизического мониторинга активных разломов в период сейсмической активизации Южно-Якутского кластера Олекмо-Становой зоны 1983 года. По результатам интерпретации полигонных магнитометрических наблюдений установлено соответствие периодов геофизической и сейсмической активизации. Сопоставление двух процессов позволило идентифицировать развитие аномалии в геофизических полях в меридиональном направлении со скоростью 2.5–2.9 км/сут (900–1000 км/год) как следствие эндогенных процессов в земной коре под действием волновых явлений. Проведены повторные электрометрические измерения на активном разломе в период до и после импульсных нагрузок на геологическую среду от взрывов на угольном карьере. В результате рассмотрения последовательных состояний электрического разреза установлены процессы релаксации в виде периодического изменения удельного электрического сопротивления геосреды.

Ключевые слова: активный разлом, геофизический мониторинг, магнитное поле, электрический разрез, Южная Якутия

Геофизический мониторинг геологической среды - одно из основных направлений геодинамических исследований, которое позволяет дистанционно отслеживать процессы в земной коре. Для проведения мониторинговых наблюдений в Южной Якутии были заложены постоянные пункты наблюдений вдоль трассы от п. Нагорный до п. Чульман (рис. 1), в зоне влияния Южно-Якутского надвига и различных ветвей Становой системы разломов, к западному флангу которых приурочены два сильных землетрясения Южной Якутии [1-5]. За время проведения полигонных наблюдений в 1980-1985 гг. сильных землетрясений отмечено не было. Однако в 1983 г. севернее геодинамического полигона в районе п. Хатыми проявилась область роевой сейсмичности. Аномальные изменения в магнитном поле на всех магнитометрических пунктах были сопоставлены с сейсмотектоническими процессами в земной коре. Развитие новых представлений о волновой природе сейсмичности позволило ассоциировать изменение во времени и пространстве аномалий в магнитном поле с прохождением волны деформаций. Результаты повторных электрометрических измерений на профиле, проложенном в крест Беркакитского разлома, показали, что вблизи разлома наблюдается знакопеременное изменение удельного электрического сопротивления в течение трех часов после импульсного воздействия на геологическую среду. Это соответствует процессу релаксации по экспоненциально-волновому закону.

Магнитометрические наблюдения на Южно-Якутском геодинамическом полигоне протяженностью 120 км проводились в 1980–1985 гг. на 11 пунктах (ДМП1-ДМП11). Размеры полигона выбраны таким образом, чтобы максимально охватить систему субширотных активных разломов (рис. 1).

Традиционный способ изучения тектономагнитных эффектов в натурных экспериментах основан на построении разностных схем наблюдений относительно опорного пункта, вынесенного за пределы изучаемой области. Сопоставлением выявленных аномалий магнитного поля и сейсмичности было установлено, что коэффициент связи двух процессов не превышает 0.4. Однако на графиках осредненных вариаций (рис. 2) прослеживаются некоторые закономерности. Наблюдаются квазипериодические изменения длительностью от 3 до 6 месяцев на всех ЛМП, длиннопериодные изменения от 1 до 2.5 лет на ДМП 4-5 и 9-10, линейный тренд на ДМП 11, 4. Данные изменения могут быть обусловлены деформационными процессами и связанными с ними электрокинетическими эффектами в зонах активизированных разломов.

Детальное рассмотрение временных изменений геофизических полей вследствие сейсмотектонических процессов привело к необходимости решения задачи построения модели источников геомагнитных аномалий. В этой связи в 2015 г. был проведен эксперимент по наблюдению реакции геосреды в зоне Беркакитского разлома методом повторных электрометрических измерений аппаратурой «Скала-48» до и после импульсных нагрузок от взрывов на угольном разрезе.



Рис. 1. Активные разломы и сейсмичность Южной Якутии [4]. 1, 2 – активные разломы (1 – основные, 2 – второстепенные): 1 – Кабактинский, 2 – Нижне-Нерюнгринский, 3 – Беркакитский, 4 – Суннагино-Ларбинский, 5 – Южно-Якутский, 6 – Верхне-Гонамский, 7 – Северо-Становой, 8 – Южно-Становой (северная ветвь), 9 – Южно-Становой (основная ветвь); 3 – мезозойские отложения Южно-Якутской системы впадин; 4 – места геофизических исследований активных разломов; 5 – пункты геодинамического профиля (PR3 – профиль через Беркакитский разлом).

Данный профиль выбран по нескольким причинам. Во-первых, вблизи Беркакитского разлома наблюдались периодические изменения магнитного поля (рис. 2, точка 10), во-вторых, установлено, что геофизическими методами разлом уверенно прослеживается [4] в виде зоны пониженного сопротивления и интерференции сейсмических волн, и, в-третьих, данный участок ближе всего расположен к пункту массовых взрывов (г. Нерюнгри, см. рис. 1).



Рис. 2. Вариации относительных приращений магнитного поля Южно-Якутского геодинамического полигона. Цифрами обозначены номера долговременных магнитометрических пунктов, положение которых показано на рис. 1. Горизонтальная ось – годы наблюдений.

Результаты данных измерений представлены на рис. 3.Результаты натурного эксперимента показывают, что до взрыва от пикета 40 выделяется зона пониженного удельного электрического сопротивления (УЭС) (рис. 3, 1). Непосредственно после взрыва (рис. 3, 2) зона пониженного УЭС прослеживается на более глубоких горизонтах с одновременным закрытием зоны в районе пикетов 140–160. Через час после взрыва (рис. 3, 3) зона пониженного сопротивления замещается областью повышенного УЭС (пикеты 60–100). Через два часа (рис. 3, 4) зона пониженного УЭС (пикеты 90–110) восстанавливается до уровня, наблюдаемого непосредственно после взрыва (рис. 3, 2). Через три часа геоэлектрический разрез (рис. 3, 5) практически идентичен разрезу (рис. 3, 4).



Рис. 3. Геоэлектрические разрезы через Беркакитский разлом до и после импульсных нагрузок на геосреду. Светлые области – зоны пониженного сопротивления, темные – повышенного.

Одной из возможных моделей переменного УЭС (Ом·м) отдельных областей геосреды в зоне разлома может быть эффект миграции флюида вследствие ударного воздействия сейсмических волн с последующей релаксацией геосреды в виде периодических изменений. По-видимому, подобные, но более длиннопериодные эффекты мы наблюдаем и при магнитометрических измерениях, причиной которых могут быть деформации разломных зон. Сопоставление двух процессов позволяет идентифицировать развитие аномалии в геофизических полях в 1983 г. в меридиональном направлении со скоростью 2.5–2.9 км/сут (900–1000) км/год как следствие эндогенных (электрокинетических) процессов в земной коре под действием прохождения волны деформаций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания № 5.1771.2014/К Министерства образования и науки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмогеодинамика Алдано-Станового блока // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 5–17.

2. Трофименко С.В. Тектоническая интерпретация статистической модели распределений азимутов аномалий гравимагнитных полей Алданского щита // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29, № 3. С. 64–77.

3. Ovsyuchenko A.N., Trofimenko S.V., Marakhanov A.V., Karasev P.S., Rogozhin E.A. Source zones of strong earthquakes in Southern Yakutia as inferred from paleoseismogeological data // Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2009a. V. 45, № 2. P. 101–117. doi:10.1134/S1069351309020025.

4. Ovsyuchenko A.N., Trofimenko S.V., Marakhanov A.V. et. al. Detailed geological–geophysical studies of active fault zones and the seismic hazard in the South Yakutia region // Russian Journal of Pacific Geology. 2009b. V. 3,  $\mathbb{N}$  4. P. 356–373. doi: 10.1134/S1819714009040046.

5. Ovsyuchenko A.N., Trofimenko S.V., Marakhanov A.V., Karasev P.S., Rogozhin E.A. Seismotectonics of the transitional region from the Baikal Rift Zone to orogenic rise of the Stanovoi Range // Geotectonics. 2010. V. 44, № 1. P. 25–44. doi:10.1134/S0016852110010036.

## THE DYNAMICS OF GEOPHYSICAL PARAMETERS FOR ACTIVE FAULT ZONES OF YAKUTIA

## S.V. Trofimenko<sup>1</sup>, N.N. Grib<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

<sup>2</sup> Technical Institute (affiliated branch), M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Neryungri, Russia

*Abstract.* The results presented here are based on the data of geophysical monitoring of active faults during seismic activation in the South Yakutia cluster of the Olekma-Stanovoy zone in 1983. The polygon magnetometric survey results have shown consistency between the periods of geophysical and seismological activation. A comparison of the two processes allowed the identification of the meridional propagation of geophysical field anomaly at a velocity of 2.5–2.9 km/day (900-1000 km/yr) due to endogenous processes within the crust under the influence of wave phenomena. The repeated electrometric measurements have been performed on the active fault before and after impulse loading experienced by the geological medium due to open-pit mine explosive detonation. The analysis of sequential states of the electrical section has revealed relaxation processes occurring in the form of periodic variations of resistivity of the geomedium.

Keywords: active fault, geophysical monitoring, magnetic field, electrical section, South Yakutia

\*\*\*

УДК 550.3

## ГИПОТЕЗА О ВОЗМОЖНОСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ С ОБРАЗОВАНИЕМ ПЕРОКСИДНЫХ ФОРМ SiO₂ В МАНТИИ ЗЕМЛИ И ИХ ВЛИЯНИИ НА МАНТИЙНУЮ КОНВЕКЦИЮ

Р.Г. Хлебопрос<sup>1, 2</sup>, В.Е. Захватаев<sup>3</sup>, В.П. Слепков<sup>4</sup>, М.И. Кузьмин<sup>5</sup>, С.Г. Козлова<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>4</sup> Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>5</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. В монографии С.П. Габуды и С.Г. Козловой была высказана гипотеза о существовании перехода молекулы SiO<sub>2</sub> из линейной в изомерную форму с кольцеобразной (уголковой) структурой и о возможных важных последствиях этого перехода для процессов в кристаллической мантии Земли [1]. В настоящей работе развивается идея о том, что при плавлении мантийного вещества в нижней мантии может осуществляться переход уголковой формы SiO<sub>2</sub> в линейную форму SiO<sub>2</sub> с выделением значительной энергии (~2.5 эВ). Приводятся результаты квантово-химических вычислений, продолжающих и уточняющих результаты, представленные в монографии [1]. Все расчеты проводились методом теории

функционала плотности. На основе этих результатов и некоторых достаточно простых оценок делается предположение, что при плавлении мантийного вещества этот переход мог бы осуществляться в окрестности глубин порядка 1000–1300 км или ниже и мог бы иметь существенное значение для процессов нижнемантийной конвекции, а также для подъема мантийных плюмов.

Ключевые слова: кремнезем, мантийная конвекция, мантийный плюм, фазовый переход

В настоящей работе обсуждается гипотеза о том, что при некоторых условиях может осуществляться переход молекулы SiO<sub>2</sub> из линейной в изомерную форму с кольцеобразной структурой и этот переход мог бы иметь отношение к формированию мантийной конвекции, а также к появлению мантийного магматического расплава в поднимающемся веществе мантийного плюма.

В работе приведены результаты вычислений, продолжающие и уточняющие квантово-химические результаты, представленные в [1]. Все расчеты проводились методом теории функционала плотности в программном комплексе ADF 2012 [2].

Проведенные вычисления в [1] и настоящей работе показали, что возможен переход молекулы SiO<sub>2</sub> из линейной формы в изомерную уголковую с кольцеобразной структурой и с условным зарядовым состоянием атома кремния Si(II), аналогичным известным формам Sn(II) и Pb(II). Имеет место локализация электронной пары на атоме кремния, причем группировка SiO<sub>2</sub> оказывается аналогом кольцеобразной молекулы озона, O<sub>3</sub>. В гипотетической молекуле пероксида кремния значение валентного угла  $\angle$ (O – Si – O)=56.4°, межатомное расстояние D(Si–O)=1.66 Å, а расстояние D(O–O)=1/57 Å, что близко к сумме ковалентных радиусов кислорода.

Зависимость энергии системы SiO<sub>2</sub> от величины угла  $\angle$ (O–Si–O) показывает, что энергетические барьеры препятствуют переходам метастабильного уголкового состояния молекулы SiO<sub>2</sub> к линейной форме O=Si=O с повышением степени окисления Si<sup>2+</sup>→Si<sup>4+</sup>или к диссоциации молекулы с восстановлением атома кремния Si<sup>2+</sup>→Si<sup>0</sup>. Энергия линейного состояния свободной молекулы SiO<sub>2</sub> на ~4 эВ ниже энергии диссоциированного состояния и на ~2.5 эВ ниже энергии уголковой формы. Поскольку переход из уголковой формы SiO<sub>2</sub> в линейную сопровождается высвобождением ~2.5 эВ, выделяемую энергию можно оценить как *q*~N<sub>A</sub>×2/5 эВ/моль ~240 кДж/моль ~400 кДж/кг.

Следует отметить, что аналогичные результаты были получены для перехода линейная форма  $SiS_2$  – циклическая изомерная форма  $SiS_2$  высокоточными квантово-химическими вычислениями и экспериментально в [3].

Оценим в первом приближении давление, при котором мог бы осуществляться рассматриваемый переход. Оценим объем линейной молекулы SiO<sub>2</sub> как  $36.0 \times 10^{-30}$  м<sup>3</sup>, объем уголковой формы уменьшается на ~20–25 % в соответствии с [1]. Полагая, что изменение объема молекулы при переходе составляет ~7.2×10<sup>-30</sup>–9.0×10<sup>-30</sup> м<sup>3</sup>, можно оценить давление в ~44–55 ГПа в соответствии с [1].

Рассмотрим следующие возможные следствия рассматриваемого перехода для мантийной конвекции и проблемы образования и подъема мантийных плюмов. В процессе мантийной конвекции холодное субдуцированное вещество, как показывают данные по сейсмотомографии, погружается в глубь мантии до слоя D", а горячее вещество устремляется вверх в виде мантийных плюмов [4-6]. Вследствие переноса энергии ядра, фазового перехода перовскита в постперовскит и других факторов в слое D" формируются жидкие «линзы», состоящие из частично расплавленных масс, - перегретое и менее плотное вещество, обладающее повышенной плавучестью, что вызывает конвективное течение [6]. Плюм поднимается от слоя D" в виде гриба до границы между нижней и верхней мантией и далее к поверхности Земли устремляются малые плюмы [6]. Радиус ножек плюмов оценивается как *R*~100 км [6, 7]. Мощность Р плюма по классической оценке составляет ~3.3 ТВт, а скорость v – порядка нескольких сантиметров в год [8]. Считается, что плюм способен расплавлять мантию на различных глубинах [8]. Предположим, что плюм расплавляет мантию на глубинах, соответствующих гипотетическому переходу уголковая форма SiO<sub>2</sub> – линейная форма SiO<sub>2</sub> (если плюм расплавляет мантийное вещество на большей глубине, то указанный переход в мантийном расплаве должен осуществиться на этой глубине). Можно ограничиться предположением о том, что тепловое действие плюма индуцирует лишь возникновение достаточной независимости «квазимолекул» SiO<sub>2</sub>. Оценим в первом приближении влияние гипотетического перехода уголковая форма SiO<sub>2</sub> линейная форма SiO<sub>2</sub> на мощность Р плюма. Примем, что плотность мантийного вещества р~4700 кг/м<sup>3</sup>; радиус плюма *R*~100 км; скорость плюма v~5 см/год. Пусть жидкий расплав в плюме содержит ~х % кремнезема, так что энергия, выделяемая при переходе, согласно полученной выше оценке, *q*~*x*·10<sup>-2</sup>·400=40*x* кДж на килограмм расплава мантийного вещества. Тогда *Р~рд*πvR<sup>2</sup>~10x ГВт. При *х*~10 мощность, выделяемая в плюме при прохождении им границы перехода уголковая форма SiO<sub>2</sub> линейная форма SiO<sub>2</sub>, лишь на один порядок меньше характерной мощности самого плюма (~3.3 ТВт). Таким образом, в рассматриваемом приближении переход уголковая форма SiO<sub>2</sub> – линейная форма SiO<sub>2</sub> может существенно усиливать плавучесть плюма, интенсифицировать его подъем. Эти выводы применимы для достаточно широкого диапазона процентного содержания x SiO2 в жидком расплаве в плюме.

Более того, данный переход сам по себе может служить одной из важных причин формирования плюма (величина  $q \sim 40x$  кДж/кг при  $x \sim 10$  на порядок превышает энергию, требуемую для плавления мантийного вещества).

В этом случае будут также существенно увеличиваться размеры расплавленной зоны, поэтому такие расплавленные области могут являться характерной особенностью плюмов. Проверить рассматриваемую гипотезу можно будет путем анализа соответствующих сейсмических данных в районах горячей мантии [6].

Следует подчеркнуть, что приведенные оценки даны лишь в довольно грубом приближении. Так, очевидно, в реальных условиях молекулы SiO<sub>2</sub> в мантийных расплавах будут входить в состав определенных кластеров. Однако различие в порядках соответствующих сил дает основание применить приближение относительно независимых «квазимолекул» SiO<sub>2</sub>. По самой простой оценке рассматриваемый переход для независимых «квазимолекул» SiO<sub>2</sub> мог бы осуществляться при давлениях ~ 44-55 ГПа, что соответствует глубинам порядка 1000-1300 км. Тем не менее авторы полагают, что уже на основе приведенных результатов квантово-химических расчетов перехода молекулы SiO<sub>2</sub> из линейной в изомерную форму с кольцеобразной структурой можно предположить, что в нижней мантии при плавлении мантийных минералов может осуществляться переход уголковая – линейная форма «квазимолекул» SiO<sub>2</sub>, что может иметь существенное значение для формирования особенностей мантийной конвекции и зарождения плюмов.

Результаты расчетов позволяют также высказать мысль о том, что при плавлении мантийного вещества может, на самом деле, происходить своеобразный каскад переходов: диссоциированное состояние переходит в состояние, соответствующее уголковой форме, с выделением энергии ~1.5 эВ, а уголковая форма переходит в линейную с выделением ~2.5 эВ.

Можно предположить, что рассматриваемый переход мог бы быть связан и с формированием различных стационарных, колебательных и стохастических режимов конвекции в расплавленной зоне.

Как отмечено в [1], в условиях высоких давлений переход группировки SiO<sub>2</sub> из линейной формы в уголковую мог бы повлиять на фазовую устойчивость некоторых мантийных минералов в кристаллической форме, но данный вопрос выходит за рамки настоящей работы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке комплексного проекта Р 218 Сибирского федерального университета и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-12026).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Габуда С.П., Козлова С.Г. Неподеленные электронные пары и химическая связь в молекулярных и ионных кристаллах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 164 с.

2. Te Velde G., Bickelhaupt F.M., van Gisbergen S.J.A. et al. Chemistry with ADF // J. Comput. Chem. 2001. V. 22. P. 931–967.

3. Mueck L.A., Lattanzi V., Thorwirth S. et al. Cyclic SiS2 - a new perspective on the Walsh rules // Angewandte chemie. 2012. V. 51, № 15. P. 3695-3698.

4. Добрецов Н.Л. Основы тектоники и геодинамики. Новосибирск: НГУ, 2011. 492 с.

5. Кузьмин М.И. К новой парадигме геологии // Природа. 2014. № 7. С. 49-58.

6. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // Earth-Science Reviews. 2010. V. 102, № 1-2. P. 29-59.

7. Trubitsyn V.P., Evseev A.N., Evseev M.N., Kharybin E.V. Mantle plumes in the models of quasi-turbulent thermal convection // Izvestia, Physics of the Solid Earth. 2011. V. 47, № 12. P. 1027-1033.

8. Nolet G., Karato S.-I., Montelli R. Plume fluxes from seismic tomography // Earth and Planetary Science Letters. 2006. V. 248. P. 685–699.

### A HYPOTHESIS ABOUT DEVELOPMENTAL PHASE TRANSITIONS WITH FORMATION OF SiO<sub>2</sub> PEROXIDES IN THE EARTH MANTLE AND THEIR INFLUENCE ON MANTLE CONVECTION

R.G. Khlebopros<sup>1, 2</sup>, V.E. Zakhvataev<sup>3</sup>, V.A. Slepkov<sup>4</sup>, M.I. Kuzmin<sup>5</sup>, S.G. Kozlova<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal University, Krasnovarsk, Russia

<sup>2</sup> Krasnoyarsk Research Center, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Biophysics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

<sup>4</sup> Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Novosibirsk, Russia

<sup>5</sup> A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract. In their monograph, S.P. Gabuda and S.G. Kozlova formed some hypothesis that SiO<sub>2</sub> molecule had undergone a change from linear to isomeric shape with a ring (bent) structure, and that this could have a profound influence on the processes in the Earth's crystalline mantle [1]. The present work suggests that melting of the mantle substance promotes change in  $SiO_2$ shape from bent to linear that occurs within the lower mantle, which can release a large amount of energy  $\sim 2.5$  eV. The work presents the results of quantum chemical calculations, which extend and refine those of S.P. Gabuda and S.G. Kozlova. All calculations were based on density functional theory. The obtained results and some rather simple estimates imply that melting of the mantle substance could cause the above-mentioned changes in molecular shape at depths of 1000-1300 km or greater, with a pronounced effect exerted on convection in the lower mantle and on rise of the mantle plumes. Keywords: silica, mantle convection, mantle plume, change in molecular shape

# АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абдурахманов А.И.	13
Акбашев Р.Р.	254
Акулов Н.И.	256
Антипин Е.В.	256
Аржанников С.Г.	210, 221
Аржанникова А.В.	210, 221
Атутова Ж.В.	240
Ашурков С.В.	18
Б	
Базаров А.Д.	155
Баталев В.Ю.	258
Баталева Е.А.	258
Батсайхан Т.	105
Баяраа Г. 11	
Баярсайхан Е.	28
Баярсайхан К.	223
Бержинская Л.П.	278
Бооров А.А.	46, 6/
ьорняков С.А.	70, 89, 105, 111, 130,
Грагицакад П П	102
Брыжак Е В	85 260
Бубнов А Б	254
Бурзунова Ю.П.	74
Бутанаев Ю.В.	175
Буянтуев В.А.	214
Бызов Л.М.	212
Быков В.Г.	199
-	
B	254
Василюк И.Н.	254
Волнера F Н	4, 9
Водогина Е Г	256
Воробьева С.С.	256
Воронин В.И.	214, 267
Воскресенский А.Г.	76
Γ	
Гагарский Н.А.	55
гаилаи н к	/9, 153
Гандан П.К.	105
Ганзорик Д.	105
Гандан П.К. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М Л	105 6 39 55
Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г Н	105 6 39, 55 55
Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герман В.И.	105 6 39, 55 55 136
Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герман В.И. Герус А.И.	105 6 39, 55 55 136 9
Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герман В.И. Герус А.И. Гилёва Н.А.	105 6 39, 55 55 136 9 204
Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герман В.И. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А.	105 6 39, 55 55 136 9 204 139
Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.С.	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163
Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.С. Голубев В.А.	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143
Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.С. Голубев В.А. Гонтовая Л.И.	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145
Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А.	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145
Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145 124 155
Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Голубев В.А. Голубев В.А. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П.	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145 134, 155
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Гладков А.С. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Д	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145 134, 155
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Гладков А.С. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Д Девершер Ж.	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145 134, 155 148
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.С. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Д Девершер Ж. Демонтерова Е.И.	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145 134, 155 148 210, 221
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Гладков А.С. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Девершер Ж. Демонтерова Е.И. Демьянович В.М.	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145 134, 155 148 210, 221 11
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасименко М.Д. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Гладков А.С. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Девершер Ж. Демонтерова Е.И. Дакурик В.И.	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145 134, 155 148 210, 221 11 260
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасимов Г.Н. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Девершер Ж. Демонтерова Е.И. Демьянович В.М. Джурик В.И. Дзингхуа Ван	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145 134, 155 148 210, 221 11 260 62
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасимов Г.Н. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Девершер Ж. Демонтерова Е.И. Демьянович В.М. Джурик В.И. Дзингхуа Ван Добрынина А.А.	$ \begin{array}{c} 105\\6\\39,55\\55\\136\\9\\204\\139\\163\\143\\36\\145\\134,155\\134,155\\148\\210,221\\11\\260\\62\\43,107,130,\\149\\10227\\\end{array} $
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасимов Г.Н. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Девершер Ж. Демонтерова Е.И. Демьянович В.М. Джурик В.И. Дзингхуа Ван Добрынина А.А.	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145 134, 155 148 210, 221 11 260 62 43, 107, 130, 148, 191, 235 106
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Девершер Ж. Демонтерова Е.И. Демьянович В.М. Джурик В.И. Дзингхуа Ван Добрынина А.А.	$ \begin{array}{c} 105\\6\\39,55\\55\\136\\9\\204\\139\\163\\143\\36\\145\\134,155\\134,155\\148\\210,221\\11\\260\\62\\43,107,130,148,191,235\\196\\9\end{array} $
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Девершер Ж. Демонтерова Е.И. Демьянович В.М. Дхурик В.И. Дзингхуа Ван Добрынина А.А. Долгая А.А.	$ \begin{array}{c} 105\\6\\39,55\\55\\136\\9\\204\\139\\163\\143\\36\\145\\134,155\\134,155\\148\\210,221\\11\\260\\62\\43,107,130,148,191,235\\196\\9\\9\\4\end{array} $
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасимов Г.Н. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Гладков А.С. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Девершер Ж. Демонтерова Е.И. Демьянович В.М. Дхурик В.И. Дзингхуа Ван Добрынина А.А. Доолгая А.А. Долгая А.А.	$ \begin{array}{c} 105\\6\\39,55\\55\\136\\9\\204\\139\\163\\143\\36\\145\\134,155\\134,155\\148\\210,221\\11\\260\\62\\43,107,130,148,191,235\\196\\9\\94\\196\end{array} $
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасименко М.Д. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Девершер Ж. Демонтерова Е.И. Джурик В.И. Дзингхуа Ван Добрынина А.А. Доолгая А.А. Доолгая А.А. Дэмбэрэл С.	$ \begin{array}{c} 105\\6\\39,55\\55\\136\\9\\204\\139\\163\\143\\36\\145\\134,155\\134,155\\148\\210,221\\11\\260\\62\\43,107,130,\\148,191,235\\196\\9\\94\\196\\11,28,46,105,223\\\end{array} $
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасимов Г.Н. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Девершер Ж. Демонтерова Е.И. Демьянович В.М. Дхурик В.И. Дзингхуа Ван Добрынина А.А. Доолгая А.А. Долгая А.А. Долгая А.А. Дэмбэрэл С.	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145 134, 155 148 210, 221 11 260 62 43, 107, 130, 148, 191, 235 196 9 94 196 11, 28, 46, 105, 223
Ганзорик Д. Ганзорик Д. Гатинский Ю.Г. Герасимов Г.Н. Герасимов Г.Н. Герус А.И. Гилёва Н.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Гладков А.А. Голубев В.А. Гонтовая Л.И. Горбунова Е.А. Гриб Н.Н. 294 Григорюк А.П. Девершер Ж. Демонтерова Е.И. Демьянович В.М. Джурик В.И. Дзингхуа Ван Добрынина А.А. Доолгая А.А. Доолгая А.А. Дэмбэрэл С. Е	105 6 39, 55 55 136 9 204 139 163 143 36 145 134, 155 148 210, 221 11 260 62 43, 107, 130, 148, 191, 235 196 9 94 196 11, 28, 46, 105, 223

Ермаков А.В.	13
Ермаков В.А.	13
Ескин А.Ю.	85, 260
Ефимова И.М.	218
3	22
Захаров А.И.	23
Захарова Л.Н.	23
JaxBataeB B.E.	290
ЗЛООИН Т.К. Элобино Т.М	150
Элооина Г.М.	130
зуев Ф.Л.	20, 00, 210, 207
и	
Иванов А В	210 221
Изюмов С Ф	16
Ильясова А М	86 182
Имаев В С	18, 207
Имаева Л.П.	18
11	10
Й	
Йи-минь Сунь	62
,	
К	
Калинина Л.Ю.	153
Калинников И.И.	30
Ключевский А.В.	11
Кобелев М.М.	32
Ковалевский В.В.	134, 155
Козлова С.Г.	296
Козырева Е.А.	223, 244, 267
Коломиец А.Г.	55
Кононов Е.Е.	228
Константинова 1.1.	254
Копничев Ю.Ф.	150
Короутяк А.н.	120
Kopilar C.D.	120
KUIUB A.A.	206
Кузьмин ім.н.	290
Кузьмин Ю.О.	16 21
Кузьмина Е.А	92
11,900.000	/-
Л	
Лапердин В.К.	235
Ларьков А.С.	175, 184
Лебедева Е.В.	237
Лебедева М.А.	23
Леви К.Г.	262, 267
Левина Е.А.	40, 269
Лобацкая Р.М.	94
Лобычева И.Ю.	280
Лопатин М.Н.	160
Лунина О.В.	163
Лухнев А.В.	26, 28
Лухнева О.Ф.	26
м	
	222
Maranan II P	223
Макаров П.Б.	05 163 240
Марауанов А В	105, 240
Масютина Ю А	242
Мельникова В И	18
Меркулова Т.В.	167
Мирошниченко А И	.28, 88, 105, 262, 267
Михайлова Н.Н.	249
Михеева А.В.	30
Мишакина А.А.	120
Мордвинова В.В.	32
Мороз Ю.Ф.	36, 273, 276
Мунгунсурен Д.	46
Мурашов К.Ю.	156
Мясников А.В.	196

Н Назарова З.А. Нечаев Г.В. Николаева С.Б. Никонов А.А. Никонов А.И. Новиков С.С. Новопашина А.В.	273 39, 55 170 170 99 175, 184 173
<b>О</b> Овсюченко А.Н. Орешин С.И. Осколков В.А.	175, 184 56 214
<b>П</b> Павлова Л.А. Пантелеев И.А. Парфеевец А.В. Пеллинен В.А. Писаренко В.Ф. Полец А.Ю. Предеин П.А. Прессер Ф. Прокофьев В.Ю. Прохорова Т.В.	256 70, 111 43, 76, 101 244 177 150 276 210 156 6
Р Радзиминович Я.Б. Рассказов С.В. Рогожин Е.А. Родина С.Н. Родкин М.В. Ружич В.В. Рыбченко А.А.	179 62, 89, 182 175, 184 184 170, 177, 186 40, 187, 269 223
С Савельева В.Б. Саландаева О.И. Салко Д.В. Санжиева Д.ПД. Саньков А.В. Саньков В.А. Саранина Е.В. Седых П.А. Семенов Р.М. Семинский А.К. Семинский К.Ж.	187 278 105 202 107 23, 28, 43, 76, 101, 107, 148, 235 62 280 160 109 46, 67, 105 85
Сереоренников С.п. Середкина А.И. Серов М.А. Слепков В.П. Смекалин О.П. Смирнов В.Н. Смирнов С.Э. Смольков Г.Я. Снопков С.В. Соколова И.Н. Соловьева М.А. Сорокин А.Г. Сорокин А.П. Степашко А.А. Стефанов Ю.П. Стрельченко И.П. Сысоев Д.В.	85 18 50 296 207 153 273 283, 287 182 156, 249 252 191 53 167 114, 196 94 39, 55
Т Тараканов А.И. Тарасова А.А. Татаурова А.А. Тверитинова Т.Ю. Титков Н.Н. Тогтохбаяр С.	254 70, 111 114 116 39 105

Треусов А.В. Трофименко С.В. Тубанов Ц.А.	32 199, 294 56, 155, 202, 276	Хлыстов О.М. Хритова М.А.	252 32, 204	Чувашова И.С. Чэнь Янг 62	62, 89, 182
Тугарина М.А.	46	Ц		Ш	
		Цыдыпова Л.Р.	56	Шагун А.Н.	107, 130
У				Шварев С.В.	170
Улзийбат М.	28	Ч		Шерман С.И.	53, 64
		Чебыкин Е.П.	89, 182	Шестаков Н.В.	39, 55
Φ		Черемных А.В.	125		
Фаттахов Е.А.	16	Черемных А.С.	127	Э	
Фатьянов А.Г.	155	Черкашина А.А.	165	Эрдэнзул Д.	28
Фролова Н.С.	120	Черных Е.Н.	105, 130		
1		Чечельницкий В.В.	148, 191	Я	
X		Чжэньсин Фэн	62	Янсен Д.	210
Хабуев А.В.	252	Чжэньхуа Сие	62	Ясныгина Т.А.	62
Хлебопрос Р.Г.	296	Чипизубов А.В.	58, 207		

# СОДЕРЖАНИЕ

От редакторов
РАЗДЕЛ І. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКИХ И СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ
Викулин А.В. Вращение Земли и тектоника плит 4
Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В. Высокосейсмичные внутриконтинентальные зоны азиатской части России и прилегающих стран
Долгая А.А., Герус А.И., Викулин А.В. Моделирование волнового геодинамического процесса в рамках ротационной модели блоковой геосреды
Дэмбэрэл С., Ключевский А.В., Баяраа Г., Демьянович В.М. Современная геодинамика литосферы Монголии по данным о сейсмических моментах землетрясений 11
<b>Ермаков В.А., Абдурахманов А.И., Ермаков А.В.</b> Некоторые особенности классификации извержений и вулканического районирования (при составлении карт вулканоопасности)
Изюмов С.Ф., Кузьмин Ю.О., Фаттахов Е.А. Анализ светодальномерных наблюдений в Копетдаг-
ском регионе методами тензометрии
Имаева Л.П., Имаев В.С., Мельникова В.И., Ашурков С.В., Середкина А.И. Геодинамическая активность и сейсмотектонические деформации неотектонических структур Арктико-Азиатского сейсмического пояса
Кузьмин Ю.О.         Актуальные проблемы сравнительного анализа результатов измерений по данным на-         21
<b>Лебедева М.А., Саньков В.А., Захаров А.И., Захарова Л.Н.</b> Опыт применения данных нового ра- дарного спутника Alos-2/Palsar-2 в исследовании активных деформаций Байкальской рифтовой систе- мы
Лухнева О.Ф., Лухнев А.В. Исследование косейсмических деформаций, сопровождающих известные сильные землетрясения
Мирошниченко А.И., Лухнев А.В., Зуев Ф.Л., Саньков В.А., Баярсайхан Е., Эрдэнзул Д., Дэмбэ- рэл С., Улзийбат М. Статистический анализ результатов наблюдений на постоянных GPS-пунктах (Монголия)
Михеева А.В., Калинников И.И. Глобальные структуры сейсмичности Центральной Азии
Мордвинова В.В., Треусов А.В., Кобелев М.М., Хритова М.А. Глубинная конфигурация юго- восточной окраины Сибирского кратона и ее влияние на формирование окружающих структур 32
Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. Геофизическая модель литосферы Восточной Камчатки
<b>Нечаев Г.В., Шестаков Н.В., Титков Н.Н., Сысоев Д.В., Герасименко М.Д.</b> Изменения среднегодовых скоростей смещений ГНСС-пунктов Дальнего Востока России, инициированные глубокофокусным Охотоморским землетрясением 24.05.2013 г., Мw=8.3
Ружич В.В., Левина Е.А. Современное геодинамическое воздействие зон субдукции и коллизии на Байкальскую рифтовую зону
Саньков В.А., Добрынина А.А., Парфеевец А.В. Тектонические факторы современной геодинамики Монголо-Сибирской подвижной области: пространственно-временные соотношения
Семинский К.Ж., Дэмбэрэл С., Тугарина М.А., Мунгунсурен Д., Бобров А.А. Улан-Баторский и Могодский геодинамические полигоны в Центральной Монголии: сравнительный анализ состояния и активности зонно-блоковой структуры земной коры на современном этапе тектогенеза
Серов М.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния земной коры Верхнего При- амурья
Сорокин А.П., Шерман С.И. Формирование позднекайнозойских зон деструкции, очагов землетря- сений и магматизма на восточной окраине Центрально-Азиатского подвижного пояса
Сысоев Д.В., Шестаков Н.В., Герасименко М.Д., Нечаев Г.В., Коломиец А.Г., Герасимов Г.Н.,
<b>Гагарский Н.А.</b> Современные движения земной коры юго-западной части Приморского края 55
<b>Цыдыпова Л.Р., Орешин С.И., Тубанов Ц.А.</b> Кора и верхняя мантия по данным объемных волн да- леких землетрясений под станцией Максимиха
<b>Чипизубов А.В.</b> К "закрытию" Байкальской рифтовой зоны

Чувашова И.С., Рассказов С.В., Йи-минь Сунь, Чэнь Янг, Чжэньхуа Сие, Чжэньсин Фэн, Дзингхуа Ван, Ясныгина Т.А., Саранина Е.В. Контроль вулканизма в зонах транстенсии Азии: сме-
на источников в пограничном слое литосферы-астеносферы при извержениях 1720–1721 гг. на поле Уладяньчи (Китай)
Шерман С.И. Современная геодинамическая зональность Центральной Азии как ведущий фактор ло-
кализации сильных землетрясений
РАЗДЕЛ П. ДЕСТРУКТИВНЫЕ ЗОНЫ ЛИТОСФЕРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ: РАЗЛОМНОЕ СТРОЕНИЕ, НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, УНАСЛЕДОВАННОСТЬ РАЗВИТИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ
<b>Бобров А.А., Семинский К.Ж.</b> Радоновая активность разломов и сейсмичность Прибайкалья: к про- блеме выбора пунктов эманационного мониторинга
<b>Борняков С.А., Пантелеев И.А., Тарасова А.А.</b> Динамика деформаций в сдвиговой зоне: результа- ты физического моделирования
Бурзунова Ю.П. Новый подход к парагенетическому анализу трещин: особенности практического применения 74
Воскресенский А.Г., Саньков В.А., Парфеевец А.В. Структура сейсмогенных деформаций в зонах сдвигов (Цэцэрлегский и Болнайский разломы, Северная Монголия)
Гайдай Н.К. Блоково-слоистая структура земной коры северо-восточного участка опорного геолого- геофизического профиля 3-ДВ (по данным НИГ) и отражение плотностных аномалий в частотно- энергетических характеристиках локальных волновых пакетов
Еремин М.О., Макаров П.В. Математическое моделирование эволюции напряженно-
деформированного состояния горного массива в окрестностях выработки
<b>Ескин А.Ю., Серебренников С.П., Брыжак Е.В.</b> Результаты современных геофизических измерений в зоне Моготского разлома
Зуев Ф.Л., Мирошниченко А.И. Стереометрическое изображение структурных данных с использо-
ванием методов непараметрической оценки плотности (метод ближайших соседей)
<b>Кузьмина Е.А.</b> Формирование химического состава термального источника Шиверт в Хангайском регионе (по данным физико-химического моделирования)
Лобацкая Р.М., Стрельченко И.П., Долгих Е.С. Моделирование напряжений в крыльях разломов методом конечных элементов в CAE-системе ANSYS
<b>Никонов А.И.</b> Тектонофизические аспекты делимости земной коры и их пространственная реализа- ция на основе линеаментного анализа
<b>Парфеевец А.В., Саньков В.А.</b> Активные разломы и позднекайнозойское поле напряжений земной коры в бассейнах рек Селенга, Орхон и Тола (Монголия)
Салко Д.В., Борняков С.А., Дэмбэрэл С., Семинский К.Ж., Батсайхан Т., Тогтохбаяр С., Мирошниченко А.И., Ганзорик Д. Пространственно-временные вариации деформаций в зонах разломов Южно-Байкальского и Улан-Баторского геодинамических полигонов
Саньков А.В., Добрынина А.А., Шагун А.Н., Черных Е.Н., Саньков В.А. Исследование структуры группы Тункинских впадин методом микросейсмического зондирования
Семинский А.К. Результаты статистической обработки данных мониторинга объемной активности радона в источниках подземных вод (на примере Южного Приангарья)
<b>Тарасова А.А., Пантелеев И.А., Борняков С.А.</b> Периодическая деформационная эволюция разрыв- но-блоковой структуры сдвиговой зоны на разных масштабных уровнях: результаты физического мо- делирования
<b>Татаурова А.А., Стефанов Ю.П.</b> Влияние реологических неоднородностей на напряженно- деформированное состояние модельного фрагмента земной коры
Тверитинова Т.Ю. Анализ зеркал скольжения рифейских метаморфитов центральной части Восточ-
ного Саяна
Фролова Н.С., Корбутяк А.Н., Мишакина А.А., Корпач С.В. Некоторые структурные следствия новейших сдвиговых движений по древним разломам фундамента платформ. Аналогия с результата-
ми физического моделирования

Черемных А.В. Парагенезы разрывов в зонах разломов Западного Забайкалья 125
<b>Черемных А.С.</b> Закономерности проявления структуры зоны растяжения в рельефе: результаты физического моделирования
<b>Черных Е.Н., Борняков С.А., Добрынина А.А., Шагун А.Н.</b> Образы кимберлитовых тел в волновых сейсмических полях
РАЗДЕЛ III. СОВРЕМЕННАЯ И ПАЛЕОСЕЙСМИЧНОСТЬ КАК ОТРАЖЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ
Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Ковалевский В.В. Интеллектуальный интернет-ресурс для иссле- дований волновых полей в активной сейсмологии
Герман В.И. Пространственно-временные расстояния до ближайших сильных землетрясений и их прогноз
Гладков А.А. Интерактивная база данных сейсмогенных источников юга Восточной Сибири 139
Голубев В.А. Парадокс или недоразумение в результатах изучения энергетики сильных землетрясе- ний Байкальского региона?
Горбунова Е.А. Оценка сейсмической опасности областей динамического влияния разломов Цен- тральной Азии с учетом редких сильных землетрясений
Лобрынина А.А., Саньков В.А., Чечельницкий В.В., Левершер Ж. Пространственные вариации за-
тухания сейсмических волн в литосфере Байкальской рифтовой системы и их связь с геолого- геофизическими характеристиками среды
<b>Злобин Т.К., Полец А.Ю.</b> Обзор сильнейших землетрясений Курило-Охотского и Японского регионов за 2001–2016 годы
<b>Калинина Л.Ю., Смирнов В.Н., Гайдай Н.К.</b> О пространственной связи землетрясений с элемента- ми новейшей структуры на юго-восточном фланге сейсмического пояса Черского
Ковалевский В.В., Тубанов Ц.А., Фатьянов А.Г., Брагинская Л.П., Григорюк А.П., Базаров А.Д. Вибросейсмические исследования в Южном Прибайкалье
Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения S-волн и кольцевые структуры сейсмичности в районе Байкальской рифтовой зоны: возможная подготовка сильных землетрясений 156
Котов А.А., Прокофьев В.Ю., Злобина Т.М., Мурашов К.Ю. Влияние палеосейсмогенных факторов на формирование золоторудных месторождений в зонах дислокаций
Лопатин М.Н., Семенов Р.М. Гидрогеохимические исследования в Южном Прибайкалье в связи с поисками предвестников землетрясений
<b>Лунина О.В., Гладков А.С.</b> Критерии выделения сейсмически индуцированных инъекционных даек и их палеосейсмическая значимость
Макаров С.А., Черкашина А.А. Следы катастрофического землетрясения в рыхлых отложениях Тункинской котловины
<b>Меркулова Т.В., Степашко А.А.</b> Строение и закономерности сейсмичности зоны сочленения Монголо-Охотского, Центрально-Азиатского и Тихоокеанского тектонических поясов
<b>Николаева С.Б., Никонов А.А., Шварев С.В., Родкин М.В.</b> Комплексные палеосейсмогеологиче- ские исследования на ключевом участке в центральной части Мурманской области ( в связи с оценкой сейсмического потенциала района Кольской АЭС)
Новопашина А.В. Свойства медленных миграций сейсмической активности
Овсюченко А.Н., Рогожин Е.А., Мараханов А.В., Бутанаев Ю.В., Ларьков А.С., Новиков С.С. Следы и возраст палеоземлетрясений в очаговой области Тувинских землетрясений 2011–2012 гг 175
<b>Писаренко В.Ф., Родкин М.В.</b> Исследование хвостов распределений, приложение к оценкам сейс- мической опасности
Радзиминович Я.Б. Историческое землетрясение 13 ноября 1898 года в Западном Забайкалье 179
Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Снопков С.В. Мониторинговое исследование деформационых эффектов Чалова-Чердынцева в под- земных водах Култукского полигона как откликов на сейсмические активизации коры Южного Байка-
ла. возможность прогноза сильного землетрясения
могеологических исследований в разных геодинамических обстановках Евразии
оценке сейсмической опасности

<b>Ружич В.В., Савельева В.Б.</b> Распознавание и изучение древних сейсмодислокаций в денудирован-	7
Сорокин А.Г., Добрынина А.А., Чечельницкий В.В. Анализ сейсмоакустических сигналов при им- пульсных событиях и землетрясениях	1
Стефанов Ю.П., Дучков А.А., Додонова А.О., Мясников А.В. Анализ микросейсмической эмиссии, вызванной развитием трещины гидроразрыва	6
<b>Трофименко С.В., Быков В.Г.</b> Периодические компоненты сейсмической активности на северной окраине Амурской плиты	9
Тубанов Ц.А., Санжиева Д.ПД. Особенности сейсмичности Байкала по данным локальной сети на- блюдений	2
<b>Хритова М.А., Гилёва Н.А.</b> Алгоритм кластерного анализа для исследования сейсмичности Прибай- калья	4
<b>Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Имаев В.С.</b> Первые сейсмогеологические исследования в Юго- Восточном Забайкалье (Кличкинская сейсмогенная структура)	7
РАЗДЕЛ IV. ОПАСНЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНАХ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ	
Аржанников С.Г., Аржанникова А.В., Иванов А.В., Демонтерова Е.И., Янсен Д., Прессер Ф. Че-	
хол рыхлых отложений юга Сибирской платформы как индикатор неоднократного катастрофического сброса воды из озера Байкал по долине р. Ангары	0
<b>Бызов Л.М.</b> Математическое моделирование позднекайнозойской эволюции сбросовых уступов Бай- кальской рифтовой системы	2
Воронин В.И., Буянтуев В.А., Осколков В.А. Дендроиндикация локальных термокарстовых процес- сов в Восточном Саяне	4
Ефимова И.М., Зуев Ф.Л. Особенности механизма образования байкальских террас по результатам изучения террасового комплекса Ушканьих островов	8
Иванов А.В., Демонтерова Е.И., Аржанников С.Г., Аржанникова А.В. U-Pb датирование детрито- вых цирконов из осадков озера Байкал и его окружения как инструмент поиска палеоцунами	1
Козырева Е.А., Мазаева О.А., Рыбченко А.А., Баярсайхан К., Дэмбэрэл С. Опасные экзогенные геологические процессы Монголо-Сибирского региона (факторы, оценка, контроль)	3
Кононов Е.Е. Мегацунами и манзурский аллювий или поздненеоплейстоценовая судьба р. Пра- Манзурки	8
Кузьмин С.Б. Геоэкологическое районирование Сибири по опасным геоморфологическим процессам 23	1
Лапердин В.К., Саньков В.А., Добрынина А.А. Сейсмогеодинамика как фактор формирования селей на южных склонах хребта Кодар	5
Лебедева Е.В. Напряженность геоморфологических обстановок и опасные экзогенные процессы При- тихоокеанья	7
Макаров С.А., Атутова Ж.В. Роль селевых потоков в формировании ландшафтной структуры 24	0
Масютина Ю.А. Гравитационно-склоновые процессы на территории Окинского плоскогорья	2
<b>Пеллинен В.А., Козырева Е.А.</b> Оценка экзогеодинамической опасности рекреационных территорий, остров Ольхон, Байкал	4
Соколова И.Н., Михайлова Н.Н. Сейсмическая регистрация экзогенных процессов на Северном Тянь-Шане	9
Хабуев А.В., Соловьева М.А., Хлыстов О.М. Подводные оползни и другие геоморфологические особенности дна озера Байкал по данным многолучевой эхолокации	2

## РАЗДЕЛ V. ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ КАК ОТРАЖЕНИЕ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ И ГЕОСФЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ. ПРОГНОЗ И ПРЕВЕНТИВНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО СНИЖЕНИЮ РИСКА ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

Акбашев Р.Р., Василюк И.Н., Бубнов А.Б., Константинова Т.Г., Тараканов А.И. Управление	
сейсмическим риском при застройке территорий со сложными инженерно-геологическими условиями	254
Антипин Е.В., Акулов Н.И., Вологина Е.Г., Павлова Л.А., Воробьева С.С. Микрометеориты из	
приповерхностных отложений озера Байкал в районе Бугульдейской перемычки	256
Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Вариации электромагнитных параметров как отражение лунно-	
солнечных воздействий и геодинамических процессов	258

Брыжак Е.В., Джурик В.И., Ескин А.Ю. Зависимости основных расчетных параметров при оценке	260
Леви К.Г., Мирошниченко А.И. Картографическое моделирование – водохранилище на р. Эгийн- Год. Монголия. Предварительные результаты	200
Леви К.Г., Мирошниченко А.И., Козырева Е.А., Воронин В.И., Зуев Ф.Л. Динамика уровенного режима озер.	267
Левина Е.А., Ружич В.В. Проявление одиннадцатилетней периодичности в сейсмомиграционных процессах рифтовых систем Земли	269
Мороз Ю.Ф., Смирнов С.Э., Назарова З.А. Аномальные изменения векового хода геомагнитного поля и их возможная связь с геодинамическими процессами	273
Мороз Ю.Ф., Предеин П.А., Тубанов Ц.А. Результаты исследований геоэлектромагнитоного поля в центральной части Байкальской рифтовой зоны	276
Саландаева О.И., Бержинская Л.П. Градостроительные особенности жилой застройки на неудобных селитебных территориях	278
Седых П.А., Лобычева И.Ю. О влиянии экстремально-сильных геомагнитосферных возмущений на погоду	280
Смольков Г.Я. Роль и вклад эндогенной активности Земли в солнечно-земные связи	283
Смольков Г.Я. Свидетельства внешнего воздействия на Землю и Солнечную систему в целом	287
<b>Трофименко С.В., Гриб Н.Н.</b> Динамика параметров геофизической среды в зонах активных разломов Южной Якутии.	294
<b>Хлебопрос Р.Г., Захватаев В.Е., Слепков В.П., Кузьмин М.И., Козлова С.Г.</b> Гипотеза о возможно- сти фазовых переходов с образованием пероксидных форм SiO <sub>2</sub> в мантии Земли и их влиянии на ман- тийную конвекцию	296
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	299
СОДЕРЖАНИЕ	301

Научное издание

## СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И ОПАСНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ: результаты исследований на количественной основе

Материалы III Всероссийского совещания и II Всероссийской молодежной школы по современной геодинамике (Иркутск, 19–23 сентября 2016 г.)

Литературный редактор *Н.Г. Балукова* Компьютерная верстка *А.А. Добрынина* 

Подписано к печати 05.09.2016 г. Формат 60×90 1/8. Бумага Ballet. Печать RISO. Уч.-изд. л. 41,6. Усл. печ. л. 35,3. Тираж 200 экз. Заказ № 738.

Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1