ОТДЕЛЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПОЧВОВЕДЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ БИОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Материалы

Третьей Национальной научной конференции с международным участием

Математическое моделирование в экологии

21-25 октября 2013 г.
г. Пущино

УДК 57+51-7
ББК 28в6
М34

ISBN 978-5904385-15-6

Ответственный редактор
профессор, доктор биологических наук А.С. Комаров

Математическое моделирование в экологии / Материалы Третьей Национальной научной конференции с международным участием, 21-25 октября 2013 г. – Пущино, ИФХиБПП РАН, 2013.– 286 с.

Материалы Третьей Национальной научной конференции с международным участием «Математическое моделирование в экологии» представляют современный уровень российских научных разработок в этой области знаний, содержат широкий спектр подходов к моделированию, применяемых для решения экологических задач. В сборнике представлены материалы докладов, посвященных различным проблемам математического моделирования экологических систем на организменном, популяционном, биогеоценотическом, региональном и глобальном уровнях организации живого покрова. Приведены подробные примеры применения математических моделей в экологических исследованиях. В ряде работ описаны новые математические методы, применяемые для решения задач в экологии. Сборник предназначен для математиков, экологов, биологов различных специальностей, почвоведов, географов, занимающихся анализом и прогнозированием развития биологических систем разных уровней организации, а также для студентов, магистрантов, аспирантов и широкого круга читателей, интересующихся современным состоянием моделирования в экологии.

© ИФХиБПП РАН, 2013

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель **Комаров Александр Сергеевич**, проф., д.б.н., ИФХиБПП РАН, Пущино

Зам. председателя **Ханина Лариса Геннадиевна**, доц., к.б.н., ИМПБ РАН, Пущино

Абакумов Александр Иванович, проф., д.ф.-м.н., ИАПУ ДВО РАН, Владивосток

Вавилин Василий Александрович, д.ф.-м.н., ИВП РАН, Москва

Дегерменджи Андрей Георгиевич, академик РАН, проф., д.ф.-м.н., ИБФ СО РАН, Красноярск

Логофет Дмитрий Олегович, проф., д.ф.-м.н., ИФА РАН, Москва

Медвинский Александр Берельевич, проф., д.ф.-м.н., ИТЭБ РАН, Пущино

Пузаченко Юрий Георгиевич, проф., д.г.н. ИГ РАН, Москва

Пых Юрий Александрович, проф., д.ф.-м.н., ИНЭНКО РАН, Санкт-Петербург

Ризниченко Галина Юрьевна, проф., д.ф.-м.н., МГУ, Москва

Суховольский Владислав Григорьевич, проф., д.б.н.,ИЛ СО РАН, Красноярск

Тарко Александр Михайлович, проф., д.ф.-м.н, ВЦ РАН, Москва

Титлянова Аргента Антониновна, проф., д.б.н., ИПА СО РАН, Новосибирск

Ухманьский Януш, проф., Центр экологических исследований Польской академии наук, Варшава, Польша

Фрисман Ефим Яковлевич, чл.-корр. РАН, проф., д.б.н., ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан

Хлебопрос Рем Григорьевич, проф., д.ф.-м.н., ИБФ СО РАН, Красноярск

Якушев Виктор Петрович, академик РАСХН, проф., д.с-х.н., АФИ РАСХН, Санкт-Петербург

Дорогие коллеги!

Третья Национальная конференция с международным участием «Математическое моделирование в экологии» проводится Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук и Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом математических проблем биологии Российской академии наук 21-25 октября 2013 г. в г. Пущино Московской области на базе Пущинского научного центра РАН.

Тематика Конференции затрагивает основные вопросы междисциплинарных взаимодействий, в которых главным является количественное решение задач в области экологии и охраны окружающей среды: принятие решений и управление экосистемами, экосистемный подход к управлению природными ресурсами, устойчивое развитие, принятие решений и управление возобновляемыми природными ресурсами; моделирование циклов элементов в экосистемах, моделирование процессов роста и развития, моделирование динамики популяций и сообществ, прогноз изменения биоразнообразия; моделирование катастрофических воздействий на окружающую среду: моделирование инвазии видов и эпидемий, моделирование последствий загрязнений, лесных пожаров, вспышек численности насекомых, влияние наводнений и засух.

Оргкомитет получил более 100 материалов докладов из России, Азербайджана, Киргизии, Украины, Вьетнама, Польши, Финляндии, Канады, Японии.

Доклады на Конференции представлены по следующим секциям:

- Моделирование глобальных и региональных процессов. Моделирование сдвигов природных процессов под влиянием потепления
- Методы и подходы в моделировании в экологии
- Моделирование экологической сложности, математические аспекты
- Моделирование водных экосистем
- Моделирование циклов элементов в наземных экосистемах
- Модели популяций и сообществ
- Математические модели в ландшафтоведении и почвоведении

Окончательный состав сборника определен членами Программного комитета. По возможности устранены технические погрешности текста и цитирования литературы. Сущность научных текстов не изменена. Ответственность за научное содержание материалов несут авторы. Мы старались сохранить стиль и содержание, даже не будучи иногда согласны с ними. Зато это дает возможность более полно и всесторонне оценить современный состав и возможности нашего научного сообщества.

Оргкомитет Конференции выражает благодарность всем, откликнувшимся на инициативу по проведению Конференции. Мы считаем, что, как и ранее, результатом явилось очень хорошее представительство основных научных центров, активное участие молодежи. Материалы Конференции отражают высокий уровень этого научного направления, традиционно свойственный отечественной науке.

Председатель Организационного комитета
проф., д.б.н. А.С. Комаров

ОГЛАВЛЕНИЕ	**5**
ФИТОПЛАНКТОН В МОРЕ. МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКИ *Абакумов А.И.*	**16**
МЕТОД ЛОКАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ МОДЕЛЕЙ ПОЧВО-РАСТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ *Александров В.Г.*	**18**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЛЕСОСТЕПНЫХ ПОЧВ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ (НА ПРИМЕРЕ ВОРОНЕЖСКОЙ ОПЫТНОЙ СТАНЦИИ ВНИИ КУКУРУЗЫ) *Архангельская Т.А., Хохлова О.С., Мякшина Т.Н.*	**21**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГО-ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ *Барцев С.И.*	**24**
КОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ *Барцев С.И., Почекутов А.А.*	**26**
ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ПРОГНОЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА *Башкин В.Н.*	**28**
ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ «РЕСУРС-ПОТРЕБИТЕЛЬ» С УЧЕТОМ КОЛЛЕКТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ ОСОБЕЙ *Белотелов Н.В., Коноваленко И.А.*	**30**
СУТОЧНАЯ И СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ СВЕТОВЫХ КРИВЫХ ФОТОСИНТЕЗА У БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ *Болондинский В.К.*	**32**
О РОЛИ УЧЕТА ТОНКИХ КОРНЕЙ ДЕРЕВЬЕВ В МОДЕЛИРОВАНИИ БИОЛОГИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА И ЭЛЕМЕНТОВ ПОЧВЕННОГО ПИТАНИЯ *Бурнашева Э.Р., Быховец С.С., Комаров А.С.*	**35**
ДВУХ ИНТЕРВАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СУКЦЕССИОННОЙ ДИНАМИКИ ЧЕРНИЧНИКОВ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ *Бутусов О.Б., Редикульцева Н.И., Попов Д.В., Цыбизов Е.И.*	**37**
О ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ВЛАЖНОСТИ ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКИ В ПРОСТОЙ МОДЕЛИ ВОДНОГО РЕЖИМА ЛЕСНЫХ ПОЧВ *Быховец С.С.*	**40**

НОВЫЙ ШАГ В МОДЕЛИРОВАНИИ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ: ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ СООТНОШЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ В СУБСТРАТЕ, ПРОДУКТЕ И БИОМАССЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ ПУТЕЙ *Вавилин В.А.*	**42**
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЗАПАСОВ ВОДЫ В ПОЧВЕ ПРИ РАЗНЫХ МАСШТАБАХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОСРЕДНЕНИЯ *Варчева С.Е.*	**45**
ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ПОЧВ КУРСКОЙ ОБЛАСТИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ *Величенко М.В., Архангельская Т.А.*	**47**
ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОПУЛЯЦИИ ЖИВОТНЫХ *Виленкин Б.Я.*	**49**
СТРАТЕГИИ ВЫЖИВАНИЯ ЛЕСНОЙ КУНИЦЫ В АНТРОПОГЕННОЙ СРЕДЕ ОБИТАНИЯ *Владимирова Э.Д.*	**52**
УСТАНОВКА КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНЫМИ СТРАТЕГИЯМИ ВЫЖИВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ХИЩНЫХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ *Владимирова Э.Д.*	**54**
ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СУКЦЕССИИ ПОЧВЕНННЫХ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ *Воробьев Н.И., Семенов А.М., Бубнов И.А., Свиридова О.В.*	**56**
ПРИБЛИЖЕННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И ВЛАГИ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ С УЧЕТОМ БАЛАНСА ЭНЕРГИИ *Воротынцев А.В.*	**58**
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ ТАЕЖНОГО КЛЕЩА *Вшивкова О.А.*	**60**
АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ДИНАМИКИ ИКСОДОВОГО КЛЕЩА *Вшивкова О.А., Комаров А.С., Фролов П.В.*	**62**
МОДЕЛЬ ОПОСРЕДОВАННОГО ВЛИЯНИЯ МУРАВЬЕВ НА ДИНАМИКУ ПОПУЛЯЦИЙ ИКСОДОВОГО КЛЕЩА *Вшивкова О.А., Хлебопрос Р.Г.*	**64**

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ В МОДЕЛИРОВАНИИ РОСТА ДРЕВОСТОЕВ: ФЕНОМЕНОЛОГИЯ «УГЛЕРОДНОГО» ЛЕСА *Гавриков В.Л., Хлебопрос Р.Г.*	**66**
ОБ ЭВОЛЮЦИИ ФОРМЫ ДЕРЕВА ПО ФРАКТАЛЬНОМУ ПАРАМЕТРУ *Галицкий В.В.*	**68**
ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО СРЕДНЕГО ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА *Гасанова З.У.*	**71**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫМ ФАКТОРАМ *Глаголев В.А, Коган Р.М.*	**73**
ОЦЕНКА ПОТОКА МЕТАНА ИЗ ПОЧВ РОСИИ НА ОСНОВЕ ПРОСТЕЙШИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ *Глаголев М.В., Филиппов И.В., Клепцова И.Е., Максютов Ш.Ш.*	**75**
МОДЕЛЬ РЕГИОНАЛЬНОГО ЛЕСОУПРАВЛЕНИЯ *Гладков Е.Г., Плехов О.Г., Тетюхин С.В.*	**77**
ОЦЕНКА СКОРОСТИ ТОРФООБРАЗОВАНИЯ ОЛИГОТРОФНЫХ И ЭВТРОФНЫХ БОЛОТ ЮЖНОЙ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ *Головацкая Е.А.*	**80**
ДОПУСТИМЫЕ ПРЕДЕЛЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ НЕЧЁТКИХ МНОЖЕСТВ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ *Голубев С.Н.*	**82**
ГИПОТЕЗА О ПОЯВЛЕНИИ В СТРУКТУРЕ СИСТЕМЫ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФИБОНАЧЧИ ВСЛЕДСТВИЕ ПРОЦЕССА ЭМЕРГЕНТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ *Голубев С.Н.*	**85**
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЕДИНИЦ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА *Голубев С.Н.*	**87**
МАТЕМАТИКО-КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭКОСИСТЕМАХ *Голубева Е.И., Тульская Н.И.*	**89**
ЦИКЛ АЗОТА В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД *Голубятников Л.Л.*	**91**

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОДРОСТА ЛЕСНОГО ЦЕНОЗА *Грабарник П.Я., Алейников А.А., Ефименко А.С., Безрукова М.Г.*	**92**
МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИОННОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТРАТЕГИЙ ПОВЕДЕНИЯ В ИГРЕ «КАМЕНЬ - НОЖНИЦЫ – БУМАГА» *Грабовский В.И.*	**94**
ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ТЕРСКО-КУМСКОЙ НИЗМЕННОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЦИКЛОВ ЗАТОПЛЕНИЯ *Джалалова М.И., Осипова С.В.*	**97**
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕКСАГОНАЛЬНО-РАСТРОВЫХ ЦМР В ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ *Дмитрук Ю.М., Черлинка В.Р.*	**100**
МОДЕЛЬ ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФЛУКТУИРУЮЩИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ХИМИЧЕСКОГО И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЧНОЙ ВОДЫ *Долгоносов Б.М., Корчагин К.А.*	**102**
СУТОЧНЫЙ ХОД ПОТОКОВ CO_2 В СИСТЕМЕ ПОЧВА-РАСТИТЕЛЬНОСТЬ-АТМОСФЕРА *Дюкарев Е.А.*	**105**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ОТБОРА В ПОПУЛЯЦИИ С ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРОЙ *Жданова О.Л., Фрисман Е.Я.*	**107**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТРОФИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ СОЕДИНЕНИЯМИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ *Завалишин Н.Н., Виноградова А.А.*	**109**
КОЛЕБАНИЯ, ХАОС И СТРУКТУРЫ В МОДЕЛЯХ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ТРОФИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ТИПА «РЕСУРС-ПОТРЕБИТЕЛЬ» *Завалишин Н.Н.*	**113**
ДИНАМИКА БИОЛОГИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА В ЭКОСИСТЕМАХ КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА *Завалишин Н.Н.*	**115**
АНТРОПОГЕННАЯ И ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНЦЕПЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ: СРАВНЕНИЕ НА ОСНОВЕ ПРОСТОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ *Замолодчиков Д.Г.*	**118**

РАСЧЕТ ВДЫХАЕМОЙ ФРАКЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В НИЗКОСКОРОСТНОЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ *Гильфанов А.К., Зарипов Ш.Х., Мухаметзанов И.Т.*	**120**
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СИНГУЛЯРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ *Захарова С.А., Левашова Н.Т.*	**122**
СООТНОШЕНИЯ РАСТЕНИЙ С РАЗНЫМИ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ НИШАМИ В СООБЩЕСТВАХ ПРИ ЛЕСНОЙ СУКЦЕССИИ *Зубкова Е.В.*	**124**
ЧИСТАЯ ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ: МОДЕЛИ, УЧИТЫВАЮЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОДНОГО СОСТАВА *Иванова Ю.Д., Суховольский В.Г.*	**126**
МОДЕЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЛОНИЗАЦИИ НОВЫХ МЕСТООБИТАНИЙ ОРГАНИЗМАМИ ОКЕАНИЧЕСКОГО ОБРАСТАНИЯ И РАЗВИТИЯ ИХ БИОЦЕНОЗОВ *Ильин И.Н., Петросян В.Г., Бессонов С.А.*	**128**
ОЦЕНКА БИОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ МЕТОДОМ ВЫДЕЛЕНИЯ СТРУКТУР *Инишева Л.И., Катаев С.Г., Дубровская Л.И.*	**130**
МЕТАПОПУЛЯЦИОННАЯ ДИНАМИКА С УЧЕТОМ МЕЖВИДОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ *Кириллов А.Н.*	**133**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СМЕШАННЫХ ДРЕВЕСНЫХ СООБЩЕСТВ В СЛУЧАЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ *Колобов А.Н.*	**135**
МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА В ЛЕСНЫХ ПЛАНТАЦИЯХ С ГЕННО-МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ДЕРЕВЬЯМИ ОСИНЫ *Комаров А.С., Быховец С.С., Ларионова А.А., Шанин В.Н., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А.*	**137**
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗЛИВА НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ *Костерина Е.А.*	**139**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОПУЛЯЦИЙ *Кулаков М.П.*	**141**
ЭНЕРГО-И МАССОБМЕН ТРОПИЧЕСКОГО ЛЕСА: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ *Курбатова Ю.А., Авилов В.К., Дещеревская О.А., Ольчев А.В.*	**143**
ДИНАМИКА ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ ПРИ СМЕНЕ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД *Курганова И.Н., Архангельская Т.А., Ермолаев А.М., Ларионова А.А.*	**145**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ДВУХ МИГРАЦИОННО-СВЯЗАННЫХ СООБЩЕСТВ ТИПА «РЕСУРС-ПОТРЕБИТЕЛЬ» *Курилова Е.В., Кулаков М.П.*	**147**
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ТОКСИЧНЫМ КОМПОНЕНТОМ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА – НЕСИММЕТРИЧНЫМ ДИМЕТИЛГИДРАЗИНОМ *Курочкина Г.Н.*	**149**
ДИНАМИКА АКТИВНОСТИ ПРИРОДНОГО ОЧАГА ХАНТАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ: АВТОНОМНЫЕ И/ИЛИ ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ? *Кшнясев И.А., Бернштейн А.Д.*	**152**
НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА И СВЕРХДИСПЕРСИЯ: СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШАНСОВ ИНВАЗИИ И СРЕДНЕЙ ИНВАЗИРОВАННОСТИ ХОЗЯЕВ КРОВОСОСУЩЕЙ МУХОЙ *PENICILLIDIA MONOCEROS* SPEISER, 1900 *Кшнясев И.А., Орлова М.В., Орлов О.Л.*	**145**
ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕЩЕРНЫХ ИЗОЛЯТОВ В ЗАЩИТЕ РАСТЕНИЙ В ВИДЕ СМЕШАННЫХ КУЛЬТУР *Ланкина Е.П., Хижняк С.В.*	**156**
НЕЛИНЕЙНЫЕ ТРЕНДЫ ЧИСТОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ *Ларько А.А., Шевырногов А.П., Иванова Ю.Д.*	**159**
ВЛИЯНИЕ ВЫСОТНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ НА ГОРНЫЕ ЛЕСА ЗАПАДНОГО САЯНА (MODIS) *Ларько А.А., Иванова Ю.Д., Кукоба Н.А.*	**161**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ КОНТРАСТНЫХ СТРУКТУР *Левашова Н.Т., Мухартова Ю.В., Ольчев А.В.*	**163**
ПОЛИВАРИАНТНЫЙ ОНТОГЕНЕЗ: ПОПУЛЯЦИОННАЯ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ *Логофет Д.О., Уланова Н.Г.*	**166**
ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ *Минкина Т.М., Бакоев С.Ю.*	**169**
БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ДРЕВОСТОЕВ В КОНТЕКСТЕ СУКЦЕССИИ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ЛИТЕРАТУРНЫМ ДАННЫМ *Мироненко Л.М.*	**171**
ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД НА ГАЗООБМЕН СФАГНУМА *Молчанов А.Г., Татаринов Ф.А.*	**174**
ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА В ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОМ РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ *Мухартова Ю.В., Ольчев А.В., Рыжова М.С.*	**177**
ОБРАБОТКА ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ ROMUL *Надпорожская М.А.*	**180**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОМЫСЛОВОГО ИЗЪЯТИЯ НА ДИНАМИКУ ЧИСЛЕННОСТИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОПУЛЯЦИЙ *Неверова Г.П.*	**182**
АЛГОРИТМИРОВАНИЕ ЭТАПОВ АВТОГЕННОЙ СУКЦЕССИИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ *Немчинова А.В.*	**184**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОТНО-ПОЯСНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ *Овчинникова Т.М., Суховольский В.Г.*	**187**

НЕТТО CO_2-ОБМЕН И ИСПАРЕНИЕ СФАГНОВОГО БОЛОТА: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И РАСЧЕТОВ С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ *Ольчев А.В., Волкова Е.М., Каратаева Т.А., Новенко Е.Ю.*	**189**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГЕНОФОНДОВ ПОПУЛЯЦИЙ КАВКАЗСКИХ СКАЛЬНЫХ ЯЩЕРИЦ РОДА DAREVSKIA НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ МОЛЕКУЛЯРНОГО МАРКИРОВАНИЯ ГЕНОМОВ *Омельченко А.В., Вергун А.А., Петросян В.Г., Рысков А.П.*	**191**
АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ И ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИИ В XX - XXI-ОМ СТОЛЕТИЯХ *Павлова В.Н.*	**194**
МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОПУЛЯЦИЮ ФИТОГЕЛЬМИНТОВ В АГРОБИОЦЕНОЗЕ *Перевертин К.А.*	**196**
ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНО-ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫБОРА РАЗЛИЧНЫХ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОПУЛЯЦИЯМИ ВАЖНЕЙШИХ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ ПАРНОКОПЫТНЫХ РОССИИ *Петросян В.Г., Дергунова Н.Н., Бессонов С.А., Омельченко А.В.*	**199**
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ В ПИТАНИИ ЗООПЛАНКТОНА НА ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТОНОЙ (N–P–Z–D) ПЛАНКТОННОЙ ПИЩЕВОЙ ЦЕПИ *Подгорный К.А.*	**202**
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ВИСЛИНСКОГО ЗАЛИВА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ *Подгорный К.А., Дмитриева О.А.*	**205**
ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА СИНЭРГЕТИКИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ *Пузаченко Ю.Г.*	**208**
О ТЕОРИИ СИСТЕМ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ПАРНЫМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ *Пых Ю.А.*	**213**
МОДЕЛИ КЛАССИФИКАЦИЙ ПОЧВ *Рожков В.А.*	**215**

ПОПУЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЕЛОПЛЕЧЕГО ОРЛАНА НА САХАЛИНЕ И НИЖНЕМ АМУРЕ *Романов М.С., Мастеров В.Б.*	**218**
ПРОБЛЕМЫ ОПИСАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ В МОДЕЛЯХ КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА *Рыжова И.М.*	**220**
МОДЕЛЬ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР С УЧЕТОМ ИХ ЧЕРЕДОВАНИЯ В РАМКАХ ФЕРМЕРСКОГО ХОЗЯЙСТВА *Пашаев А.Б., Сабзиев Э.Н., Эюбова С.М.*	**222**
ОПИСАНИЕ ЗАМКНУТЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РАМКАХ ПОДХОДА ГИБКОГО МЕТАБОЛИЗМА *Салтыков М.Ю., Барцев С.И.*	**224**
ГИС ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗА РАСТИТЕЛЬНЫМ ПОКРОВОМ В ЗОНЕ САЯНО-ШУШЕНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА *Самбуу А.Д., Аюнова О.Д.*	**226**
ОСНОВНЫЕ СТРАТЕГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ БИОГЕОЦЕНОЗАМИ ЮЖНОЙ ТАЙГИ *Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г.*	**229**
СТРАТЕГИЯ ОСВОЕНИЯ НАСЕКОМЫМИ КОРМОВЫХ ОБЪЕКТОВ В ОЧАГЕ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ: АНАЛИЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТОЧЕНЫХ ПРОЦЕССОВ *Секретенко О.П., Ковалев А.В., Суховольский В.Г.*	**231**
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ (НП) С ПОЧВОЙ *Семенова Н.Н., Орлова Н.Е., Орлова Е.Е., Бакина Л.Г.*	**234**
СБАЛАНСИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПЕСТИЦИДОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ *Семенова Н.Н., Сухорученко Г.И., Долженко О.В., Зациорский А.С.*	**237**
ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИЛУЧШИХ СРЕДОВЫХ ВЛИЯНИЙ В ЭКОСИСТЕМЕ «МОЛОЧНОЕ СТАДО» *Сидорова В.Ю., Попов Н.А.*	**240**

ИЗМЕРЕНИЕ И ОЦЕНИВАНИЕ ВИДОВОГО РАЗНООБРАЗИЯ: ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОДХОД *Смирнов В.Э.*	**243**
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НИТРИФИКАЦИИ И ОКИСЛЕНИЯ ОГАНИЧЕСКОГО СУБСТРАТА В СИСТЕМЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ *Смирнов Н.В.*	**245**
E2E-МОДЕЛИ: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ НАУКИ В ЗАДАЧАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ *Суховольский В.Г.*	**247**
ПЕРМАНЕНТНЫЕ ВСПЫШКИ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ: АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ДИНАМИКИ *Суховольский В.Г., Тарасова О.В., Красноперова П.А.*	**249**
«МИНИМАЛИСТИЧНАЯ» МОДЕЛЬ ВОДНОГО РЕЖИМА РАСТЕНИЯ Топаж А.Г., Гурин П.Д.	**251**
СПОСОБЫ ОБОСНОВАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ПОПУЛЯЦИИ ЛЕММИНГОВ *Тращеев Р.В., Саранча Д.А.*	**254**
ПРИНЦИПЫ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НАЗЕМНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ ВИДОВОГО БОГАТСТВА РАСТЕНИЙ ДЕЛЬТЫ АМУ-ДАРЬИ) *Трофимова Г.Ю.*	**256**
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ БИОСФЕРЫ НА АНТРОПОГЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛОБАЛЬНОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА *Тарко А.М., Усатюк В.В.*	**258**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОШИБОК СРЕДНИХ МНОГОЛЕТНИХ И СРАВНЕНИЕ МНОГОЛЕТНИХ ДИНАМИК ПОКАЗАТЕЛЕЙ В ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ОПЫТАХ *Фрид А.С.*	**261**
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ И РЕШЕНИИ НЕКОТОРЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ОБЩЕЙ БИОЛОГИИ *Фрисман Е.Я.*	**264**

КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ СООБЩЕСТВА ДВУХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ РАЗНЫХ ЖИЗНЕННЫХ ФОРМ *Фролов П.В., Зубкова Е.В., Комаров А.С.*	**266**
БИОКЛИМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШЮТТЕ ОБЫКНОВЕННОГО (*LOPHODERMIUM PINASTRI* (SCHARD.) CHEV.*)* В СОСНОВЫХ ЛЕСАХ СРЕДНЕЙ СИБИРИ *Чебакова Н.М., Кузьмина Н.А., Парфенова Е.И., Сенашова В.А., Кузьмин С.Р.*	**269**
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНКУРЕНЦИИ В СМЕШАННЫХ ЛЕСАХ: СТРУКТУРА МОДЕЛИ И ЕЕ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ *Шанин В.Н., Шашков М.П., Иванова Н.В., Рочева Л.К., Москаленко С.В., Безрукова М.Г., Mäkipää R., Бобкова К.С., Манов А.В., Комаров А.С.*	**271**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИИ С НЕПЕРЕКРЫВАЮЩИМИСЯ ПОКОЛЕНИЯМИ В ПЕРИДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СРЕДЕ ОБИТАНИЯ *Шлюфман К.В.*	**273**
АНАЛИТИКО-ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ СЕВЕРНОГО ОЛЕНЯ *Юрезанская Ю.С.*	**275**
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ САЙГАКОВ *Юрезанская Ю.С.*	**277**
ТИПЫ СУКЦЕССИИ *Титлянова А.А., Самбуу А.Д.*	**279**
КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ *Шибарева С.В.*	**282**
АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ	**285**

ФИТОПЛАНКТОН В МОРЕ. МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКИ

Абакумов А.И. [1,2]

[1]*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия*
[2]*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*
abakumov@iacp.dvo.ru

Аннотация: Представлены модели, описывающие динамику видовой структуры и пространственного распределения фитопланктона под влиянием условий среды. Проводится модельный анализ видовой структуры фитопланктонного сообщества. В распределенной модели исследуется годовая динамика биомассы фитопланктона с описанием его распределения по глубине и учетом сезонных факторов среды. Для Японского моря получены оценки содержания хлорофилла по спутниковой информации о поверхностном слое. Сделаны оценки первичной продуктивности районов моря.

Фитопланктон является основой жизни в водной среде. Его изучение имеет фундаментальное значение для исследования водных экосистем (Моисеев, 1989; Jorgensen et al., 2005). Водные экосистемы влияют на глобальные характеристики биосферы Земли, в нынешний период климатических изменений понимание функционирования водных экосистем имеет глобальное значение с точки зрения выживания человечества. Значительное количество методов и приборов для исследования фитопланктона не снимает проблемы слабой изученности жизнедеятельности фитопланктона. В этих условиях средства математико-модельной имитации фитопланктона играют позитивную роль в его изучении (Murray, 2002). Математические модели позволяют имитировать различные ситуации развития событий, делать прогнозные расчеты ряда важных показателей рассматриваемых объектов.

В докладе представлены модели, описывающие динамику состояния фитопланктона как с точки зрения его видового состава, так и с точки зрения особенностей пространственного распределения под влиянием условий среды.

Модель динамики видового состава описывает фитопланктон в период летней активности в верхнем перемешанном слое моря. Модель построена по аналогии с моделями для непрерывных культур и использует концепцию «клеточной квоты» (Droop, 1974; Силкин, Хайлов, 1988). Виды конкурируют за различные питательные вещества, и достаточно быстро (за десятки суток) выявляются доминирующие виды (Силкин, Абакумов, Паутова, 2010). Различные начальные состояния приводят к, вообще говоря, различным равновесным асимптотически устойчивым решениям (Абакумов, 2010). Наборы доминирующих видов в этих равновесиях также различаются. Таким образом, устойчивое равновесное состояние зависит не только от условий среды (структуры минерального питания), но и от начального состояния растительного сообщества (Абакумов, Пак, 2012).

Динамика пространственного распределения фитопланктона исследуется моделью, построенной на основе уравнения «реакция-диффузия» (Cantrell, Cosner, 2003). Моделируется плотность биомассы фитопланктона в вертикальном столбе воды. Учитываются основные влияющие факторы: минеральное питание, освещенность и температуру воды. Фитопланктон и минеральные вещества перемещаются под воздействием микротурбулентной диффузии (Chorin, 2007). Чтобы сосредоточиться на описании процессов жизнедеятельности фитопланктона, не рассматриваются направленный перенос вод и другие гидрофизические эффекты.

Минеральное питание и освещенность оказывают противоречивое влияние на пространственное распределение фитопланктона: минеральное питание поступает в столбе воды снизу, а наибольшая освещенность присуща поверхностному слою. Это «заставляет» фитопланктон искать компромиссные приемлемые варианты существования. Например,

летом большая часть фитопланктона из-за дефицита питания может находиться на сравнительно большой глубине, а не у поверхности.

Рассматривается годовой цикл изменений условий среды и динамика фитопланктона по сезонам в течение года (Абакумов, Израильский, 2012). Исследована зависимость результатов моделирования от неточно определяемых параметров: коэффициента микротурбулентной диффузии, коэффициента затухания света в воде и концентрации минеральных питательных веществ на нижней границе фотического слоя. Приведены результаты численных экспериментов об изменении условий обитания в связи с изменениями климата.

Модель пространственного распределения фитопланктона применяется к анализу спутниковой информации о Японском море для оценки количества хлорофилла в толще воды. Спутниковая информация содержит данные о концентрации хлорофилла в поверхностном слое воды, о температуре и освещенности на поверхности и ряд других характеристик поверхностного слоя. Так как носителем хлорофилла является фитопланктон, то наша модель может быть применена к восстановлению концентрации хлорофилла по всей глубине фотического слоя. Дополнительные расчеты позволяют сделать модельные оценки скорости первичного продуцирования для районов моря (Williams, 2007).

Таким образом, представленные математические модели для фитопланктона позволяют выявить возможные доминирующие виды и исследовать функционирование сообщества с учетом особенностей пространственного распределения по глубине. В качестве основных влияющих факторов внешней среды рассматриваются минеральное питание (его химический состав), освещенность и температура воды. Необходимость более подробного описания процессов жизнедеятельности растительных микроорганизмов ведет к привлечению характеристик фотосинтеза, дыхания особей, содержания кислорода в воде и иных данных, которые можно получить из экспериментальной информации.

Работа поддержана грантом РФФИ, проект № 11-01-98517-р_восток_а, и грантом ДВО РАН № 12-I-П15-02 по программе «Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы» фундаментальных исследований Президиума РАН.

Литература

Абакумов А.И. Признаки стабильности водных экосистем в математических моделях // Труды Института системного анализа РАН. Системный анализ проблемы устойчивого развития. - М.: ИСА РАН, 2010. - Т.54. - С. 49 – 60.

Абакумов А.И., Израильский Ю.Г. Влияние условий среды на распределение фитопланктона в водоеме // Математическая биология и биоинформатика. – 2012. - Т. 7. - № 1. - С.274-283.

Абакумов А.И., Пак С.Я. Сосуществование видов в микробном сообществе. Модельное исследование // Информатика и системы управления. – 2012. - №3. - С.15-24.

Моисеев П.А. Биологические ресурсы Мирового океана. - М.: Агропромиздат, 1989. - 368 с.

Силкин В.А., Абакумов А.И., Паутова Л.А. Математическая модель структуры фитопланктонного сообщества северо-восточной части Черного моря // Наука Кубани. – 2010. - № 4. - С.35-39.

Силкин В.А., Хайлов К.М. Биоэкологические механизмы управления в аквакультуре. - Л.: Наука, 1988. - 230 с.

Cantrell R.S., Cosner C. Spatial Ecology via Reaction-Diffusion Equations. J. Wiley and Sons Ltd, 2003. - 411 p.

Chorin A.J., Marsden J.E. A mathematical introduction to fluid mechanics. Third edition. Springer, 1992, - 182 p.

Droop M.R. The nutrient status of algal cells in continuous culture // J. Mar. Biol. Assoc. U. K. - 1974. - V.54. - P. 825-855.

Jorgensen, S.E., Loffler, H., Rast, W. and Straskraba, M. (Eds). Lake and Reservoir Management. Elsevier, 2005. – 512 p.

Murray J.D. Mathematical Biology. An Introduction. Third Edition. Springer, 2002, - 576 p.

Williams P.J.B. Phytoplankton productivity. J. Wiley and Sons Ltd, 2007. - 386 p.

МЕТОД ЛОКАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ МОДЕЛЕЙ ПОЧВО-РАСТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Александров В.Г.

Кыргызско-Российский Славянский Университет, Бишкек, Кыргызстан
Vigal47@rambler.ru

Аннотация: излагается метод локальной адаптации условно полных моделей почво-растительных систем с рассредоточенными параметрами к конкретным агроэкологическим условиям с помощью операторных дополнений к их ОДУ-аналогам, компенсирующих невязку расчётных и экспериментальных значений на расширении области изменения параметров внешней среды исходной модели.

Введение

Известно, что использование условно полных моделей почво-растительных систем для решения задачи оптимального управления посевами в производственных условиях, с учётом изменения почвенно-климатических и агроэкологических условий их произрастания, весьма затруднительно. В настоящей работе предлагается ОДУ-аналог, имитирующий модель AGROTOOL (Полуэктов, 2006), и излагается метод его локальной адаптации к конкретным почвенно-экологическим условиям с помощью операторных дополнений, компенсирующих невязку расчётных и экспериментальных значений фазовых переменных на расширении области изменения параметров внешней среды.

Объекты и методы

Объекты:

Расчётные данные лаборатории моделирования агроэкосистем АФИ: фазовые переменные: $y(t)$ - биомасса посевов, $W(t)$ - влагозапас; параметры среды: сумма активных температур - $T(t)$, осадки - $P(t)$, суммарная радиация - $S_r(t)$; расчётные значения параметров: испарение с поверхности почвы - $E_s(t)$, транспирация - $E_p(t)$.

Модель изменения почвенной влаги и биомассы посева:

$$\begin{cases} \dot{y} = (\bar{\alpha}, \bar{x})(K - y) \\ \dot{W} = qP - (\bar{\delta}, \bar{x}) - \dfrac{y}{(\bar{\gamma}, \bar{x})}\left[(\bar{\beta}, \bar{x})\left(1 - \dfrac{y}{K}\right) + (\bar{\alpha}, \bar{x})\right] \end{cases}, \quad (1)$$

где: $(\bar{\alpha}, \bar{x})$ - коэффициент расхода на дыхание, K - потенциальный биологический урожай (Шарифуллин Л.Р. и др., 1989), q - коэффициент эффективности осадков, $(\bar{\delta}, \bar{x})$ - испарение с поверхности почвы, $(\bar{\gamma}, \bar{x})$ - коэффициент эффективности транспирации, $(\bar{\beta}, \bar{x})$ - коэффициент роста посева, $\dfrac{y}{(\bar{\gamma}, \bar{x})}\left[(\bar{\beta}, \bar{x})\left(1 - \dfrac{y}{K}\right) + (\bar{\alpha}, \bar{x})\right]$ - транспирация. Выражения $(\bar{\alpha}, \bar{x})$, $(\bar{\delta}, \bar{x})$, $(\bar{\gamma}, \bar{x})$, $(\bar{\beta}, \bar{x})$ - это скалярные произведения векторов, которые описывают аппроксимацию соответствующих модельных коэффициентов, при этом векторы $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$, $\bar{\gamma}$, $\bar{\delta}$ - это векторы коэффициентов аппроксимации, а $\bar{x} = (y, W, T, P, S_r)$.

Методы:

Коэффициенты аппроксимации находятся методом наименьших квадратов по исходным данным, полученным из расчётов по модели AGROTOOL.

Адаптация ОДУ-аналога, уравнение (1), для агроэкологических зон, в которых модель AGROTOOL не даёт удовлетворительного решения (Полуэктов и др., 2000), выполняется с помощью операторных дополнений $-A_1 y, -A_2 W$, компенсирующих невязку расчётных и экспериментальных значений. Операторные дополнения учитывают влияние не явных системных параметров, проявление которых становится значимым на расширении области изменения параметров внешней среды. Операторы A_1 и A_2 представим в виде:

$$\begin{cases} A_1 = a_{11}\dfrac{d}{dt} + a_{12}\dfrac{d^2}{dt^2} \\ A_2 = a_{21}\dfrac{d}{dt} + a_{22}\dfrac{d^2}{dt^2} \end{cases}. \qquad (2)$$

3. Результаты

Установлено, что из условий (3)

$$A_1\tilde{y} = 0,\ A_2\tilde{W} = 0,\ \dot{\hat{y}} + A_1\hat{y} = \varphi_1\left(t, \hat{y}, \hat{W}\right),\ \dot{\hat{W}} + A_2\hat{W} = \varphi_2\left(t, \hat{y}, \hat{W}\right), \qquad (3)$$

Для системы уравнений (2) справедливы следующие равенства:

$$a_{12} = -\left(\dot{\tilde{y}}/\ddot{\tilde{y}}\right)a_{11},\ a_{22} = -\left(\dot{\tilde{W}}/\ddot{\tilde{W}}\right)a_{21}, \qquad (4)$$

где переменные $\tilde{y}$, $\tilde{W}$ соответствуют зонам удовлетворительной адаптации, а $\hat{y}$, $\hat{W}$ - не удовлетворительной адаптации модели AGROTOOL. Обозначим $k_1 = \left(\dot{\tilde{y}}/\ddot{\tilde{y}}\right)$ и $k_2 = \left(\dot{\tilde{W}}/\ddot{\tilde{W}}\right)$.

Учитывая соотношения (4), уравнения (2) и (1), получили ОДУ-аналог модели AGROTOOL, который адаптирован к локальным агроэкологическим условиям:

$$\begin{cases} \dot{y} = \left(\overline{\alpha}, \overline{x}\right)\left(K - y\right) - a_1\left(\dfrac{dy}{dt} - k_1\dfrac{d^2y}{dt^2}\right) \\ \dot{W} = qP - \left(\overline{\delta}, \overline{x}\right) + \dfrac{y}{\left(\overline{\gamma}, \overline{x}\right)}\left[\left(\overline{\beta}, \overline{x}\right)\left(1 - \dfrac{y}{K}\right) + \left(\overline{\alpha}, \overline{x}\right)\right] - a_2\left(\dfrac{dW}{dt} - k_2\dfrac{d^2W}{dt^2}\right) \end{cases}. \qquad (5)$$

Коэффициенты a_1, a_2, k_1 и k_2 вычисляются методом наименьших квадратов по многовариантным расчётным данным компьютерных экспериментов на модели AGROTOOL.

Обсуждение результатов

Уравнение (5) является первым приближением модели AGROTOOL для некоторой зоны неудовлетворительной адаптации, однако в процессе её эксплуатации в этой зоне может возникнуть ситуация повторной адаптации, при этом операторы A_1 и A_2 будут уже дифференциальными операторами третьего порядка.

Необходимо заметить, что уравнение (5) может быть использовано для решения задачи оптимального управления посевом, при этом учёт конечной, хозяйственно-значимой биомассы может производиться на основании понятия «показатель благоприятности», который является интегральной характеристикой урожая (Полуэктов, Топаж, 2005).

Выводы

Предложенный подход учитывает особенности условно точной модели ПР-системы, позволяет производить её локальную адаптацию, которая может использоваться при решении задачи оптимального управления посевами в производственных условиях.

Литература

1. Полуэктов Р.А. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур, С-Пб., 2006. – 390 с.
2. Шарифуллин Л.Р., Кольцов А.Х., Марьин Г.С. 'Интенсивная технология возделывания озимой ржи' \\Редактор Л. М. Нефедова - Москва: Агропромиздат, 1989 - с.128
3. Полуэктов Р.А., Опарина И.В., Топаж А.Г. и др. Адаптируемость динамических моделей агроэкосистем к различным почвенно-климатическим условиям, ж. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, 2000, т.12, №11, с.3-16
4. Полуэктов Р.А., Топаж А.Г. Использование моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур при агрометеорологическом прогнозировании. В сб. «Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии» - СПб: «Наука», 2005, С. 207-217.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЛЕСОСТЕПНЫХ ПОЧВ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИИ (НА ПРИМЕРЕ ВОРОНЕЖСКОЙ ОПЫТНОЙ СТАНЦИИ ВНИИ КУКУРУЗЫ)

Архангельская Т.А.[1], Хохлова О.С. [2], Мякшина Т.Н.[2]
[1]*МГУ, Москва, Российская Федерация*
arhangelskaia@gmail.com
[2]*ИФХиБПП РАН, Пущино, Российская Федерация*
olga_004@rambler.ru

Аннотация. Моделирование с использованием пакета Hydrus-1D подтвердило, что гидрологический режим почв, находящихся под черным паром, отличается от режима почв, находящихся под посевами кукурузы. При осадках, соответствующих среднемноголетней норме и превышающих ее, в почве под паром периодически возникают восходящие потоки влаги. Под растительностью восходящие потоки влаги пренебрежимо малы.

Введение

В работах О.С. Хохловой (2008) была сформулирована гипотеза о связи наблюдаемого карбонатного состояния почв с многолетними микроклиматическими условиями их функционирования. На экспериментальных участках Воронежской опытной станции ВНИИ кукурузы уровень залегания карбонатов под многолетним черным паром существенно выше, чем под растительностью. Мы предположили, что постепенный подъем карбонатов на участке под паром связан с восходящими потоками влаги, отсутствующими под растительностью. С целью проверки правдоподобности данного предположения была проведена серия расчетных экспериментов с помощью свободно распространяемого программного продукта Hydrus-1D.

Объекты и методы

Образцы лесостепных почв были отобраны из двух разрезов, расположенных на участке под черным паром (разрез № 1) и под кукурузой (разрез № 2) на территории Воронежской опытной станции ВНИИ кукурузы.

Плотность исследованных почв менялась от 1.22 г/см^3 на глубине 5 см до 1.61 г/см^3 на глубине 100 см; содержание ила – от 21 до 28 %, физической глины – от 52 до 58 %. По данным о плотности и гранулометрическом составе были рассчитаны гидрологические параметры выделенных слоев; рассчитанный коэффициент фильтрации составил от 4–5 см/сут в глубоких слоях почвы до 47 см/сут в верхнем горизонте.

Моделирование гидрологического режима почв с апреля по сентябрь проводили для слоя мощностью 2 м. На нижней границе задавали условие свободного дренажа. При моделировании условий на верхней границе полагали, что вся месячная норма осадков выпадает в течение двух суток в начале месяца, а затем наступает длительный период постепенного иссушения почвенного профиля за счет испарения и (в случае наличия растительности) транспирации. Испаряемость оценивали по формуле Иванова (1948); потенциальную транспирацию полагали равной четырехкратной испаряемости (Novak, 2011). Использовали климатические данные по ст. Воронеж. Расчеты проводили для трех вариантов: (а) осадки соответствуют многолетней норме; (б) выпадает двойная норма осадков; (в) выпадает половина многолетней нормы осадков.

Результаты и обсуждение

Расчеты показали, что влажность почв под паром в целом была выше, чем под растительностью, во всех трех вариантах расчетов (рисунок 1). При увеличении количества выпадающих осадков расхождения во влажности почв увеличивались.

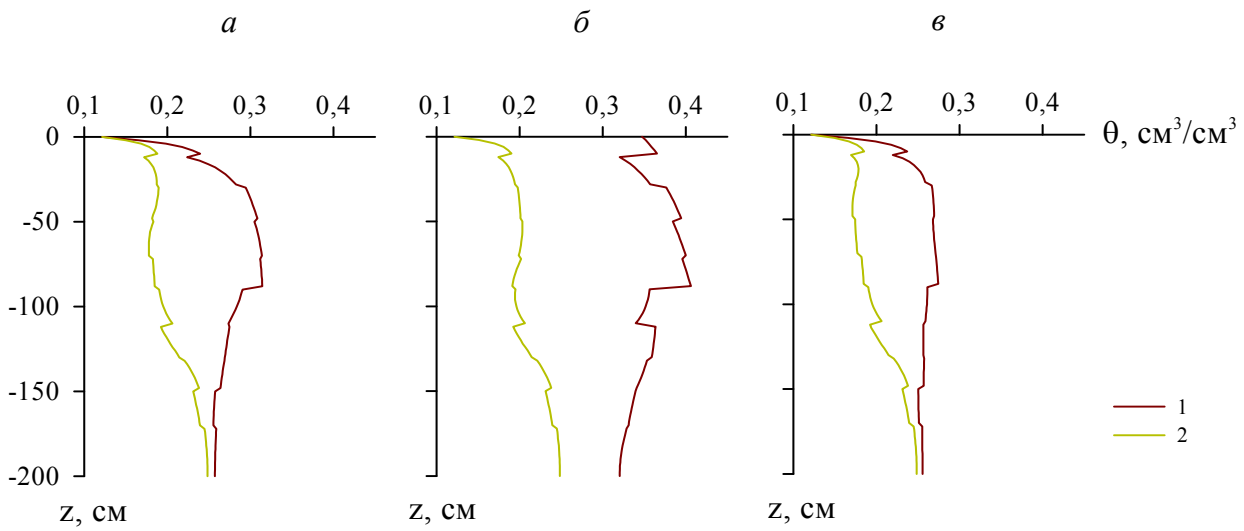


Рисунок 1 - Профильное распределение влажности □, см3/см3, для 20.07 под паром (1) и под растительностью (2) при выпадении нормы осадков (а), двух норм (б), половины нормы (в).

Под растительностью вертикальные потоки влаги практически отсутствовали (рисунок 2); по-видимому, это связано с тем, что поступающая с осадками влага перехватывалась корнями и двигалась к поверхности почвы по корневой системе, а не по почвенным порам. Под паром наблюдались внутрипочвенные потоки влаги, как положительные (восходящие), так и отрицательные (нисходящие). Мощность слоя, в котором при моделировании наблюдались восходящие потоки влаги, увеличивалась с увеличением количества поступающих осадков. Это позволяет предположить, что в процессе постепенного подъема почвенных карбонатов особую, ключевую роль играют годы с аномально высокой влагообеспеченностью.

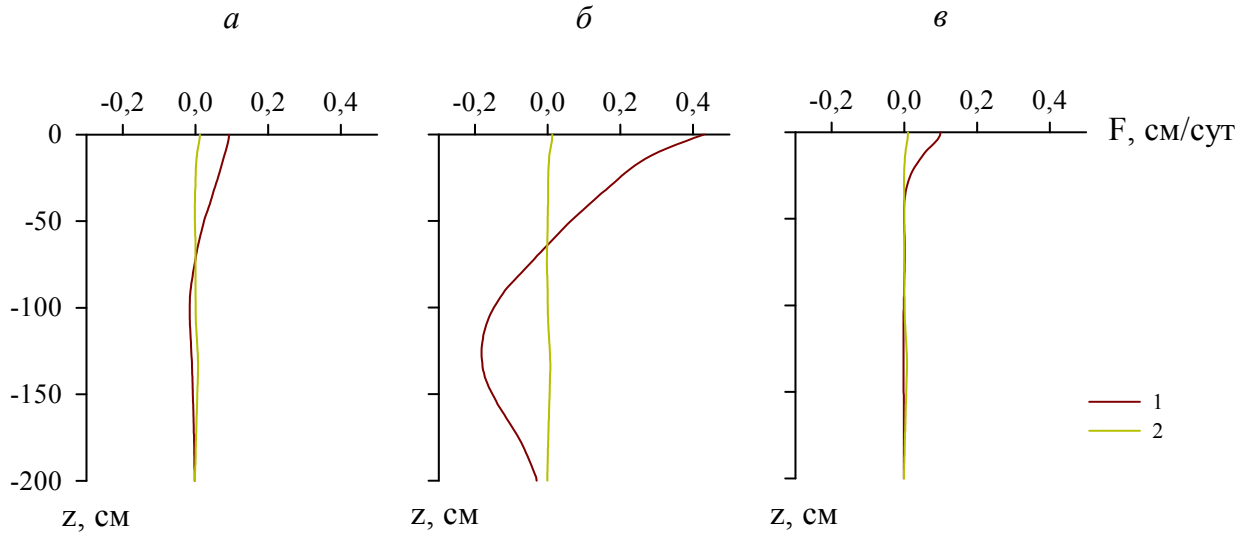


Рисунок 2 - Профильное распределение потоков влаги F, см/сут, для 20.07 под паром (1) и под растительностью (2) при выпадении нормы осадков (а), двух норм (б), половины нормы (в).

Литература

Хохлова О.С. Карбонатное состояние степных почв как индикатор и память их пространственно-временной изменчивости. Дис. ... докт. геогр. наук. - М., 2008. - 241 с.

Иванов Н.Н. Ландшафтно-климатические зоны Земного шара. М.: Л., 1948. С. –117 (Записки Геогр. о-ва, Новая серия; Т.1.).

Novak V. Evapotranspiration // Encyclopedia of agrophysics. Springer, 2011. P. 280-283.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГО-ЭВОЛЮЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Барцев С.И.

Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
bartsev@yandex.ru

Аннотация: рассмотрены варианты модификации модели вольтерровского типа, позволяющие устранить известные противоречия между закономерностями, демонстрируемыми этими моделями и закономерностями, характерными для реальных экосистем. Проведена оценка применимости некоторых известных показателей состояния экосистемы в качестве экстремальных критериев ее развития.

Исследование тенденций развития биологических сообществ и понимание закономерностей этого развития не представляется возможным без построения адекватных моделей экосистем. При этом от математических моделей не требуется точное описание конкретных природных экосистем – достаточно соответствия общих закономерностей динамики. Наиболее широко, для описания экосистем используются модели вольтерровского типа. В то же время наблюдаются известные противоречия между закономерностями, демонстрируемыми этими моделями и закономерностями, характерными для реальных экосистем. Так, согласно принципу Гаузе в традиционных моделях экосистем число стационарно сосуществующих на одном трофическом уровне видов ограничено числом доступных плотностнозависимых контролирующих рост факторов (ПКРФ). С другой стороны во многих природных экосистемах количество сосуществующих видов многократно превышает число наблюдаемых ПКРФ (парадокс Хатчитсона). Помимо этого для вольтеровских моделей была показана отрицательная корреляция устойчивости и биоразнообразия (May, 1971), которая противоречит типичной для природных экосистем положительной корреляции эти показателей (Ives, Carpenter 2007).

Адекватность математических моделей экосистем может и должна оцениваться еще с одной точки зрения – насколько тренды параметров модели, в случае запуска мутационного процесса, соответствуют данным о сукцессионных и эволюционных трендах реальных экосистем. В ходе этих исследований можно оценить известные показатели и индексы, характеризующие экосистему, с точки зрения их экстремальных свойств.

Структура модели, подвергнутой модификации, приведена на Рис.1. Трофические функции и функции отмирания указаны в общем виде, поскольку определение конкретного вида этих функций является задачей первого этапа исследования.

Показано, что использование совмещенной формулы Моно, учет влияния голода на скорость отмирания, и использование формул гибкого метаболизма (Pelletier, 2000; Saltykov, Bartsev, Lankin, 2012) существенно повышают вероятность сосуществования многих видов на данном трофическом уровне.

Для моделирования эволюционного процесса была разработана программа (в среде Scilab 5) позволяющая интегрировать постоянно меняющееся количество дифференциальных уравнений, описывающих динамику мутантов. При этом все множество мутантов взаимодействует в рамках схемы Рис.1 превращая трофическую цепь в трофическую сеть, где каждый мутант исходного продуцента взаимодействует с каждым мутантом исходного консумента.

Вычислительные эксперименты подтвердили правильность общих соображений, что эволюция параметров системы без ограничений ведет к разрушению экосистемы. Разрушение может происходить двумя способами – либо вследствие вымирания жертвы на ниспадающей волне колебаний, возникающих в ходе роста удельной скорости роста и уменьшения константы Моно, либо вследствие "выедания" хищником всех имеющихся жертв, в результате неограниченного возрастания его удельной скорости роста. Для

устранения такой неадекватности были введены ограничения на изменения параметров, как на уровне материала (Чернавская, Чернавский, 1999), так и на уровне межпопуляционных взаимодействий (Jones, Ellner, 2007).

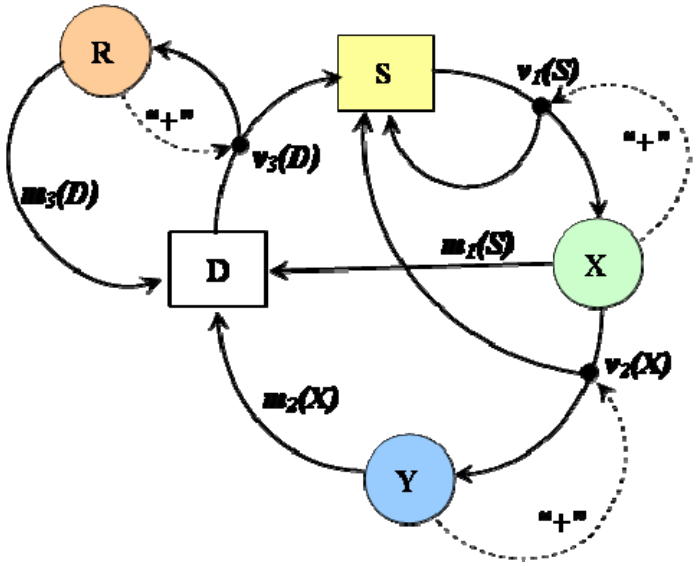


Рисунок 1 - Кинетическая схема модели, использованная в работе. На рисунке: S-минеральный субстрат: X – популяция продуцентов, "жертв"; Y – популяция консументов, "хищников"; D – пул мертвой органики, детрит; R – популяция редуцентов. Сплошные стрелки указывают потоки вещества, а пунктирные – автокаталитические стадии. v-функции описывают поглощение питательных веществ и прирост биомассы, m-функции описывают отмирание организмов.

В ходе вычислительных экспериментов показано, что интенсивность круговорота в экосистеме и структурные показатели, отображающие видовое разнообразие экосистемы (Левич, 1978; Свирежев, Логофет, 1978), не могут выступать в качестве экстремального показателя, что нельзя сказать о показателе Маргалефа – P/M, демонстрирующем относительную монотонность в ходе эволюционного процесса. Здесь M – удельная суммарная биомасса всех видов в сообществе на единицу площади, а P – удельная продукция сообщества т.е. скорость образования новой биомассы этих видов, выраженная в тех же единицах на единицу площади в единицу времени.

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН №21

Литература

Левич А.П. Экстремальный принцип в теории систем и видовая структура сообществ. В кн. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Ленинград: Гидрометеоиздат, Т.1. 1978, с.164-183.

Свирежев Ю.М., Логофет Д.О., Устойчивость биологических сообществ. - М.: Наука, 1978. – 352 с.

Чернавская Н. М., Чернавский Д. С. Белок-машина. Макромолекулярные биологические конструкции. – М.:Янус-К, 1999.

Ives A.R., Carpenter S.R. Stability and Diversity of Ecosystems // Science. – 2007. – 317. – P. 58–62.

Jones L.E., Ellner S.P. Effect of rapid prey evolution on predator-pray cycles // J.Math. Biol. – 2007. – 55. – P.541-573.

May, R. M. Stability in multi-species communitymodels // Math. Biosci. – 1971. – 12. – P.59-79.

Pelletier J.D. Are large complex ecosystems more unstable? A theoretical reassessment with predator switching // Mathematical Biosciences. – 2000. – 163. – P. 91-96.

Saltykov M.Yu., Bartsev S.I., Lankin Yu.P., Stability of Closed Ecology Life Support Systems (CELSS) models as dependent upon the properties of methabolism of the described species // Adv. Space Res. – 2012. – 49:2. – P. 223-229.

КОНТИНУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ

Барцев С.И.[1], Почекутов А.А.[2]

[1,2]*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*
[1]bartsev@yandex.ru
[2]a-a-po@mail.ru

Аннотация: предложена континуальная модель трансформации и накопления органического вещества в почве. Проведена верификация модели посредством сравнения модельных расчётов с реально наблюдаемыми запасами гумуса в почвах различных типов экосистем. Показана связь параметров модели с параметрами климата, соответствующего рассмотренным типам экосистем.

Для описания процессов трансформации органического вещества почвы (ОВП) широко применяются математические модели, основанные на уравнениях кинетики трансформации ОВП (Смагин, Садовникова и др., 2001; Чертов, Комаров, Надпорожская, 2007). При этом принципиальной трудностью является огромное разнообразие органических веществ в почве и различие скоростей их трансформации в диапазоне, составляющем несколько порядков. Возможный путь преодоления этой трудности – континуальный подход, когда процесс трансформации ОВП описывается как перемещение вещества по шкале устойчивости его к дальнейшей трансформации (Ågren, Bosatta, 1998).

В настоящей работе предложена континуальная модель трансформации ОВП, основанная на минимальном количестве допущений. Многоступенчатый процесс гумификации и минерализации ОВП представлен в форме непрерывного замедляющегося продвижения вещества по континуальной шкале его гумифицированности, происходящего одновременно с разложением части вещества. На каждом шаге преобразований часть вещества разлагается до неорганических веществ, часть преобразуется в вещество, которому присущи меньшие скорости реакций как разложения, так и дальнейшей трансформации. Поскольку таких шагов очень много, прохождение веществом этих стадий выражено в модели как непрерывное движение. Оно описывается уравнением:

$$\frac{\partial C(k,t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial k}\left(v(k)\cdot C(k,t)\right) = -a(k)\cdot C(k,t) + D(k,t) \qquad (1)$$

где t — время, k — коэффициент скорости реакции гумификации, $C(t,k)$ — количество ОВП, характеризуемого данным значением k в момент времени t, $D(t,k)$ — количество опада, характеризуемого начальной скоростью трансформации равной k, поступающее в почву в единицу времени.

Шкалу гумифицированности в данной модели образует непосредственно k. Величина k является одновременно и шкалой гумификации (т.е. мерой трансформированности органического вещества в почве), и коэффициентом скорости реакции, результат которой — дальнейшее продвижение вещества по этой шкале. Таким образом k одновременно является и изменяющейся величиной, и коэффициентом скорости изменения этой же величины. Поэтому скорость перемещения вещества по шкале связана с положением его на шкале, как:

$$v(k) \equiv \frac{dk}{dt} = -k\cdot k = -k^2 \qquad (2)$$

где знак минус показывает, что реакция гумификации ведет к перемещению вещества в сторону меньших значений по шкале k.

Для определения функции $a(k)$ было рассмотрено уравнение (1) в стационарном случае. Для приблизительного описания распределения опада в стационарном уравнении использовалась функция $D(k)=D_0\delta(k-k_0)$, где $\delta(k-k_0)$ — дельта-функция Дирака, k_0 — определённые из литературных данных оценки начальных скоростей трансформации опада в различных типах экосистем, D_0 — имеющиеся в литературе оценки количеств опада в них.

Подбирая эмпирически функцию $a(k)$ и решая с ней уравнение (1) в стационарном

случае, можно получить графики стационарного распределения ОПВ по k и оценки запасов органического вещества в почве. Хорошее совпадение расчётов запасов ОВП с натурными данными получено при $a(k)=bk^p$, где b и p — эмпирические константы, разные для разных климатических условий. Решение стационарного уравнения тогда имеет вид:

$$C(k)=\begin{cases}\dfrac{D_0}{k^2}\exp\left(\dfrac{-bk_0^{p-1}}{p-1}\right)\exp\left(\dfrac{bk^{p-1}}{p-1}\right) & \text{если } k<k_0\\ 0 \text{ если } k\ge k_0\end{cases} \qquad (3)$$

Расчёты распределений и сравнение оценок запасов ОВП с натурными данными сделаны для четырёх типов экосистем: тайги, степи, влажного тропического леса и африканской саванны (Рисунок 1).

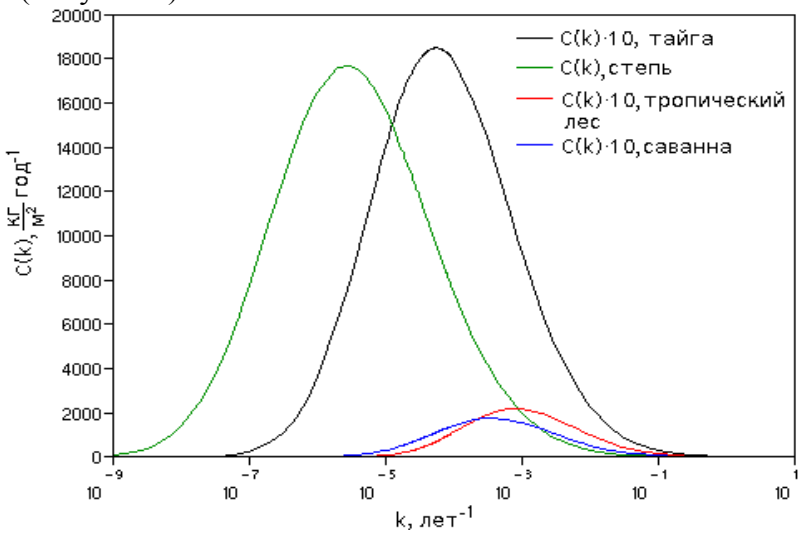


Рисунок 1 – Стационарные распределения ОВП в различных типах экосистем

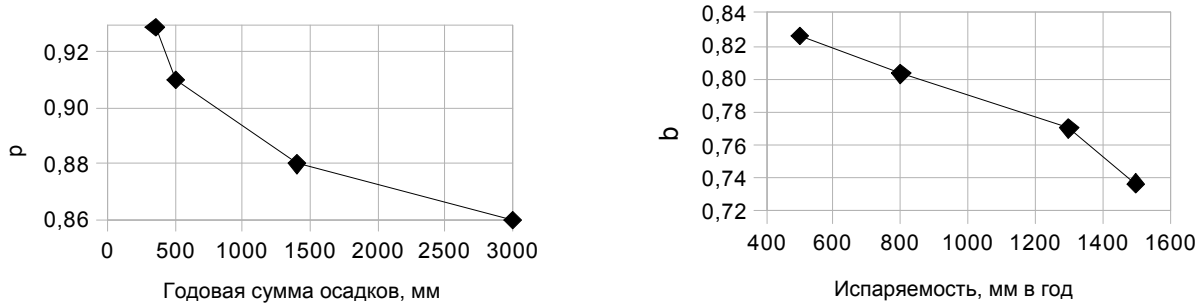


Рисунок 2 – Связь параметров b и p с климатическими параметрами

Показана связь параметров b и p с характеристиками климата, соответствующими поступлению влаги и солнечной энергии, соответствующего рассмотренным типам экосистем. (Рисунок 2). Продемонстрирована возможность применения минимальной континуальной модели для расчёта запасов ОВП в различных климатических условиях.

Литература

Смагин А.В., Садовникова Н.Б. и др. Моделирование динамики органического вещества почв. М.: Изд-во МГУ, 2001. - 120 с.

Чертов О.Г., Комаров А.С., Надпорожская М.А. Модели динамики органического вещества почв. В: *Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах*. Под ред. Кудеярова В.Н. М.: Наука, 2007. С. 19–33 .

Ågren G.I, Bosatta E. Theoretical Ecosystem Ecology. - New York: Cambridge University Press, 1998. PP.19-78.

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ПРОГНОЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Башкин В.Н.

ООО «Газпром ВНИИГАЗ/Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук
V_Bashkin@vniigaz.gazprom.ru

Аннотация: Проведен анализ модельной информация с целью установления связи между изменением климата и прогнозом потребления природного газа. Основой постановки и решения этой проблемы послужило наступление периода нового похолодания в контексте изменения климата как циклического природного процесса, что может сказаться на увеличении потребления традиционных видов топлива - нефти, угля и особенно природного газа.

Изменение климата представляет собой колебания климата Земли в целом или ее отдельных регионов, которые выражаются в статистически достоверных отклонениях параметров погоды от их многолетних значений за период от десятилетий до миллионов лет. Считается, что этот природный феномен является результатом воздействия факторов, имеющих место в Мировом океане, таких как Южной (Эль-Ниньо), Североатлантической и Арктической осцилляций, то есть колебаний температуры поверхностного слоя воды, а также реакцией на воздействие других факторов в виде изменения солнечной постоянной и орбиты Земли, парникового эффекта, тектонического движения литосферных плит и др. Так, в масштабе десятилетий изменение климата, благодаря Южной осцилляции в экваториальной части Тихого океана, а также Североатлантической и Арктической осцилляций, происходит отчасти из-за возможности Мирового океана аккумулировать тепловую энергию и перемещать ее в различные части акватории. В более длительном масштабе в океане происходит термохалинная циркуляция, то есть циркуляция, создаваемая за счет перепада плотности, образовавшейся вследствие неоднородности температуры и солености в воде, которая играет ключевую роль в перераспределении тепла.

Кроме того палеоклиматические исследования, связанные с изучением климата прошлых геологических эпох, позволяют усомниться в обоснованности требований известного Киотского протокола (от 1997 г.), ограничивающего выбросы парниковых газов, особенно углекислого газа за счет антропогенной деятельности, и допускающего торговлю квотами на их выбросы. Дело в том, что повышение уровня углекислого газа в атмосфере зачастую не предшествовало, а следовало за потеплением, так как при повышении температуры в атмосферу выходит углекислый газ, растворенный в Мировом океане (где его в 60 раз больше, чем в воздухе), а также находящийся в твердых породах.

Таким образом, даже для периода голоцена со всей очевидностью прослеживается многовековая изменчивость климата как ритмического процесса, продолжающегося в настоящее время. Отмечаемое ныне потепление климата - это очередной природный процесс, а парниковый эффект не является основной причиной этого феномена. Влияние парниковых газов сильно завышено, так как при массе атмосферы Земли в 18375000 млрд. т, и выбросах порядка 9 млрд. т концентрация парниковых газов составляет всего 0,00005%. При таких концентрациях вряд ли возможны какие-либо глобальные изменения, в том числе и потепление климата.

Между тем прогнозируется, что зарождается процесс глобального похолодания, что косвенно подтверждается по характеру кривой температурной аномалии, выходящей на «плато» после 2000 г. Иллюстрацией приближения периода похолодания служат данные, где в рассматриваемом интервале времени продолжительностью в 137 лет, характеризующемся цикличностью теплых и холодных периодов, с начала 2000-х годов уже происходит падение температуры, как предвестник очередного «малого ледникового периода». Согласно (Archibal, 2007; Абдусаматов, 2011), Земля оказалась на пороге повторения «малого

ледникового периода», который охватил северное полушарие в XVII-XVIII веках. Похолодание наступает из-за резкого снижения мощности излучения Солнца, как единственного источника энергии для Земли, а, следовательно, основного фактора изменения его климата. Это связано с тем, что в течение 200-летнего цикла солнечная постоянная, изменяется примерно на 0,2±0,05%, что заметно отражается в Мировом океане, и соответственно влияет на климат. Доказана взаимосвязь циклов солнечной активности с масштабными изменениями климата на планете и установлены факты, что, когда наблюдается глубокий минимум солнечной активности, происходит похолодание. Ныне Земля вступает в «малый ледниковый период», который достигнет своего пика минимальных температур к середине века. При этом первоначально понижение температуры будет очень медленным, а спустя десятилетия - более активным. Ожидается, что температура Мирового океана понизится на один градус, чего вполне достаточно, чтобы в Гренландии выросли новые ледники. Меньше всего глобальное похолодание скажется на жителях экватора и юга.

Без сомнения назревающее похолодание скажется на увеличении потребления энергии, как в глобальном, так и региональном масштабе.

Симптоматично, что по сценарию Международного энергетического агентства в потреблении различных видов топлива, доминирующими источниками энергии вплоть до 2035 г. остаются по-прежнему нефть, уголь и природный газ. При этом, за исключением угля, виден их продолжающийся рост в потреблении нефти и особенно природного газа. В специальном докладе агентства с названием «Мы вступаем в золотой век природного газа?» говорится о приоритете этого вида энергетического сырья (World Energy Outlook, 2011). Так, потребление природного газа в 2035 г. достигнет 5,1 трлн. куб. м., то есть на 1,8 трлн. куб. м будет больше, чем в настоящее время. Доля природного газа в 2035 г. в общем объеме глобального потребления энергии увеличится от 21 до 25% с одновременным снижением доли угля к 2030 г.

Проведенный анализ модельной информации по проблеме изменения климата и роли парниковых газов позволяет прийти к заключению о том, что изменение климата на Земле является циклическим природным феноменом в геохронологическом масштабе, проявляемым в виде чередования периодов похолодания и потепления. Симптоматично, что вступление человечества в «малый ледниковый период», обусловленный резким снижением мощности солнечного излучения, совпало с ожидаемым ростом потребления нефти, угля и природного газа, среди которых опережающими темпами будет расти спрос на природный газ, обладающий целым рядом экономических и экологических преимуществ перед нефтью и особенно углем. Это будет важным условием для комфортабельного проживания и развития человеческого общества, особенно в северном полушарии во время ожидаемого «малого ледникового периода» (Башкин, Галиулин, 2013).

Литература

Абдусаматов Х.И. Двухвековое снижение солнечной постоянной приводит к несбалансированному тепловому бюджету Земли и малому ледниковому периоду // Солнечная и солнечно-земная физика - 2011: доклады Всероссийской ежегодной конференции по физике солнца (3-7 декабря 2011 г.). Санкт-Петербург, Пулково, 2011. - С. 295-298.

Башкин В.Н., Галиулин Р.В. Изменение климата и прогноз потребления природного газа // Газовая промышленность – 2013- №1. С.58-60

Archibald D. Climate outlook to 2030 // Energy and Environment. - 2007. - V. 18. - № 5. - P. 615-619.

World Energy Outlook. Are we entering a golden age of gas? Special Report. – 2011. – 131 pp.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ «РЕСУРС-ПОТРЕБИТЕЛЬ» С УЧЕТОМ КОЛЛЕКТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ ОСОБЕЙ

Белотелов Н.В. [1], Коноваленко И.А.[2]

[1] *Учреждение российской академии наук Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН , Москва, Россия*
belotel@mail.ru
[2]*Московский физико-технический институт , Долгопрудный, Россия*
alatkon@yandex.ru

Аннотация: Предложена имитационная индивидуально ориентированная модель «ресурс-потребитель», в которой кроме «обычных» , определяющих пространственно временную динамику популяции – рождение, старение, гибель и перемещение особей, рассматриваются различные эвристические факторы, влияющие на притяжение или отталкивание между особями. Проводится анализ имитационных результатов

1. Оформление текста

Модели популяционной динамики, как правило, акцентируют внимание на трофические взаимодействия. При этом не рассматриваются другие типы взаимодействий между особями. Это различные стратегии сексуального, игрового, стадного поведения, которые сильно зависят от видово1 специфики, рассматриваемой популяции. С другой стороны трофическое взаимодействие в моделях, как правило, описывается в достаточно агрегированном виде, что не позволяет обсуждать его с точки зрения физиологичих особенносте1 состояния особей.

Рассматривается целочисленная решетка $(i = 1,...,L, j = 1,...,F)$, на который равномерно произрастает ресурс (трава). Уравнение роста ресурса имеют вид:

$m^{i,j}{}_{t+1} = m^{i,j}{}_t + K - \theta_t$, если $m^{i,j}{}_t < H$ и $m^{i,j}{}_t = H$, если $m^{i,j}{}_t \geq H$,

где $m^{i,j}{}_t$ - текущее количество ресурса в точке (i, j), K - скорость роста травы, H - максимальное возможное количество ресурса., а θ_t - доля изъятия ресурсом особью, если она есть в точке (i, j)

На этой решетке находится некоторое множество подвижных особей, которые потребляют ресурс, размножаются и могут перемещаться из узла в узел. Считается, что особь имеет возраст (τ). Гибель особи определяется условием недостатка «энергии» (ресурса) $(n_\tau \leq 0)$, который необходим для поддержания затрат на основной метаболизм. Считается, что с возрастом, потребление ресурса уменьшается. $\theta = n_\tau * C_1(1-\frac{\tau}{T})(1-\frac{n_\tau}{N})$, где C_1, T, N - некоторые постоянные. По достижении определенного размера особь случайным образом делится (процесс рождения), при этом теряется часть «энергии». Перемещение особи определяется «длиной прыжка» (S) за один временной такт и при этом теряется часть «энергии», имеющейся у особи. Особь характеризуется способностью «видеть» ресурс на расстоянии радиуса обзора (R). Направление движения особи определяется расположением ближайшего узла, в котором есть ресурс.

Уравнение баланса «энергии» особи имеет вид:

$$n_{\tau+1} = n_\tau * C_1(1-\frac{\tau}{T})(1-\frac{n_\tau}{N}) - C_2 n_\tau S - \alpha {n_\tau}^\beta - \lambda\frac{n_\tau}{2}$$

где $C_2 n_\tau S$ - затраты на перемещение; $\alpha {n_\tau}^\beta$ - основной метаболизм; $\lambda\frac{n_\tau}{2}$ - затраты на рождение ($\lambda = 1$ – происходит рождение в момент времени t, в противном случае $\lambda = 0$). В

модели считается, что рождение происходит в среднем один раз за некоторый период времени.

При описании взаимодействия между особями рассматриваются несколько стратегий поведения животных – притяжение к другим особям и отталкивание от них в зависимости: от взаимного расстояния между ними, от соотношения возрастов и масс между особями. Рассмотрены несколько алгоритмов коллективного поведения.

Получены различные динамические режимы пространственно временной динамики популяции – полное перемешивание, образование кластеров – стад, пульсирующие и волновые режимы. Проведено численное параметрическое исследование полученных режимов

Литература

Шмидт-Ниельсон К. Размеры животных: Почему они так важны?. Москва. Мир. 1987

R.Mac Nally. Modelling confinement experiments in community ecology: differential mobility among competitors. Ecological Modelling, 129, 2000, 65-85 .

A Shugart H.Y. A Theory of the Forest Dynamics. Springer, New York, 1984

.South. Ex rngitapolating from individual movement behavior to population spacing patterns in a ranging mammal. Ecological Modelling, 117, 1999, 343-360 p

СУТОЧНАЯ И СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ СВЕТОВЫХ КРИВЫХ ФОТОСИНТЕЗА У БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ

Болондинский В.К.

Институт леса КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия
bolond@krc.karelia.ru

Аннотация: При изучении CO_2-газообмена листьев березы повислой проводилось моделирование световых кривых фотосинтеза. Приведен анализ изменений параметров моделей в ходе вегетации. Наибольшие изменения претерпевали параметры, характеризующие темновое дыхание и максимальный фотосинтез. Параметр, отвечающий за критизну световой кривой, сохранял относительную стабильность и сильно зависел от реальной световой обстановки.

При изучении фотосинтеза растений параметры моделей световых кривых несут важную информацию, необходимую как при сравнении различных видов, так и для анализа поведения конкретного вида в различных климатических и эдафических условиях. Исследования CO_2-газообмена проводили вблизи г. Петрозаводска в июне-сентябре 2009-2011 г.г. с помощью газоанализатора LI 6200 (Li-Cor, USA). Для снятия световых кривых фотосинтеза ассимиляционная камера Li-Cor покрывалась тканями разной плотности. После каждого уменьшения освещенности измерялись все показатели, регистрируемые прибором - фотосинтетически активная радиация (ФАР), CO_2-газообмен (Р), концентрация CO_2 в камере, температура и влажность воздуха в камере и т.д.

Моделирование световых кривых производили методом нелинейного регрессионного анализа с помощью функции Микаэлиса-Ментен $P= a + P_{max}\ I/(I + b)$,

где I - ФАР, a - параметр, характеризующий CO_2-газообмен при I = 0, т.е. уровень дыхания; P_{max} – максимально возможный фотосинтез; b - параметр, равный величине I, при которой P = 0,5Pmax (константа насыщения). На основании параметров рассчитанного уравнения определяли световой компенсационный пункт (СКП), как значение освешенности, при которой Р равнялся нулю, $IP=0 = -a\cdot b/(a + P_{max})$.

Коэффициент детерминации (r2) составлял для большинства моделей 95-97 %. Средняя ошибка аппроксимации (А), рассчитанная по наблюдаемым и рассчитанным по модели значениям не превышала 20%.

Снятие световых кривых проводилось в основном в солнечные дни с 9 до 16 часов. Анализ суточной динамики параметра P_{max} показал, что при хорошей оводненности почвы его изменения незначительны. При измерении фотосинтеза мы ориентировали лист перпендикулярно солнечным лучам. У освещенных деревьев березы ориентация листьев более или менее диффузна, что дает возможность в разные часы дня получать наибольшее количество радиации то одним, то другим частям растения. Значительная часть листьев дерева, особенно в верхней части кроны, занимает вертикальное положение, что близко к ориентации листа в нашем эксперименте.

Параметр a, характеризующий дыхание, имел во времени параболическую зависимость, с максимумом в 15-17 часов, и было связано прежде всего с изменениями температуры воздуха. При восходе солнца параметр P_{max} имел низкие значения, но уже через 30 минут достигал 90 % от полуденного максимума и далее возрастал очень медленно. Параметр b также проявлял относительную стабильность в солнечный день. Изменчивость параметров P_{max} и b от листа к листу даже при близкой их ориентации была значительна. Наименьшая вариабельность наблюдалась у параметра a.

В пасмурные дни приуменьшении ФАР более, чем в 20 раз (до 80-100 и мкмоль $м^{-2}$ $с^{-1}$) P_{max} уменьшался в 4-5, b - в 8-10 раз. Низкие значения b (12-15 мкмоль $м^{-2}$ с-1) позволяли эффективно использовать малую освещенность и КПД фотосинтеза был очень высок. Параметр *a* также уменьшался на 50-60 %. Кратковременные прояснения неба не

приводили к сколько-нибудь значительным увеличениям P_{max} и b. В подобных световых условиях в ясную погоду находится и часть листьев внутри кроны. Однако, при вытаскивании их на свет параметры световой кривой у них оказываются близки к листьям на периферии кроны.

При недостатке влаги в почве или сильной атмосферной засухе, когда листья испытывали легкий водный стресс, в солнечные дни параметр P_{max} начинал уменьшаться уже утром, достигая минимума в послеполуденные часы, что указывало на депрессию фотосинтеза, связанную прежде всего с уменьшением устьичной проводимости. Значения параметра b хотя и были меньше, чем в отсутствии водного стресса, наоборот, имели некоторую тенденцию к увеличению, начиная с 10-11 часов. Чем сильнее был водный стресс, тем больше было уменьшался параметра b. При влажности почвы, близкой к влажности завядания, он достигал значений 50-60 мкмоль $м^{-2}$ $с^{-1}$, в то время как при хорошей оводненности был более 300 мкмоль $м^{-2}$ $с^{-1}$. Таким образом, адаптация березы к недостатку влаги выражалась в высокой скорости насыщения световой кривой. Активное поглощение углекислоты в ранние утренние часы и в пасмурную погоду, когда относительная влажность воздуха увеличивалась и устьичная проводимость возрастала, в условиях атмосферной засухи позволяла дереву поддерживать углеродный баланс на приемлемом уровне.

Величины параметров световой кривой и их суточная динамика зависят также и от плодородия почвы. При увеличение азота и других минеральных веществ в почве, благодаря более развитой корневой системе, водоснабжение деревьев при легкой засухе оставалось на приемлемом уровне и депрессия фотосинтеза была мало заметна. Параметры почти не изменялись, в то время как на рядом растущих деревьях с более худшим питанием было зафиксировано от утренних к полуденным часам достоверное уменьшение a и P_{max}. Параметр b у них был меньше, чем у удобренных деревьев, и наибольшие значения имел в утренние часы.

Сезонные изменения параметров световых кривых исследовали в двух вариантах: в отногенезе листа и на закончивших рост листьях без признаков старения. При оптимальных температурах параметр a имел максимум у молодого листа, P_{max} – у зрелого листа, и далее неуклонно снижался вплоть до конца жизненного цикла. Параметр b в основном определялся реальной световой обстановкой и мало зависел от этапа онтогенеза. Лишь на начальном этапе роста он достигал 350-400 мкмоль $м^{-2}$ $с^{-1}$, а затем вплоть до пожелтения колебался на уровне 250-300 мкмоль $м^{-2}$ $с^{-1}$. Даже у желтеющего листа во второй половине августа он имел значение 200 мкмоль $м^{-2}$ $с^{-1}$.

У зрелых листьев снижение величин всех параметров наблюдалось в сентябре и было связано со снижением температуры воздуха и почвы и уменьшением инсоляции (таблица 1). Происходила перестройка фотосинтетического аппарата листа на низкие значения ФАР, характерные для этого периода.

Таблица 1. Средние значения параметров световых кривых фотосинтеза, светового компенсационного пункта и реальных максимальных значений дыхания и фотосинтеза у зрелых листьев березы повислой в 2009 г.

месяц	a	P_{max}	b	$ФАР$	R	P	$I_{P=0}$
июнь	-2,7	13,5	340	1788,7	-3,1	9,2	83,6
июль	-2,7	17,3	299	1653,0	-3,2	12,9	55,1
август	-2,3	19,4	286	1552,5	-2,8	14,6	38,3
сентябрь	-1,0	7,8	169	1410,8	-1,2	6,4	26,3

Примечание. См. обозначения в тексте. Все величины в мкмоль $м^{-2}$ $с^{-1}$.

Таким образом, наряду со значительной вариабельностью параметров световых кривых, обусловленной, прежде всего экологическими факторами, наблюдаются и сезонные тренды, связанные с различными этапами развития листа.

О РОЛИ УЧЕТА ТОНКИХ КОРНЕЙ ДЕРЕВЬЕВ В МОДЕЛИРОВАНИИ БИОЛОГИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА И ЭЛЕМЕНТОВ ПОЧВЕННОГО ПИТАНИЯ

Бурнашева Э.[1], Быховец С.С.[2], Комаров А.С.[2]

[1] *Башкирский государственный университет, г. Уфа, Россия*
bilama-burnasheva@mail.ru
[2] *ИФХиБПП РАН, г. Пущино, Россия*
s_bykhovets@rambler.ru
as_komarov@rambler.ru

Аннотация: рассматривается актуальная проблема изучения и влияния тонких корней на круговорот углерода, проведен анализ существующих литературных данных по изучению тонких корней деревьев, полученные данные используются в программе EFIMOD, где тонкие корни деревьев учитываются в моделировании биологического круговорота углерода и элементов почвенного питания.

Тонкие корни растений составляют существенную часть углеродного баланса в экосистемах (Ostonen et al., 2005). Но в настоящее время у нас недостаточно сведений об обороте тонких корней в почве с течением времени. Это является основным сдерживающим фактором для количественной оценки круговорота углерода, и, соответственно, для прогноза влияния глобальных изменений окружающей среды. Тонкие корни и гифы грибов микоризообразователей получают питательные вещества и используют полученный в результате фотосинтеза углерод для роста и поддержания всех клеток организма, а также транспорта углерода и питательных веществ в лесной почве и в лесной подстилке.

Другой важной характеристикой корневой системы является ее ассоциация с эктомикоризными и везикулярно-эндомикоризными грибами. Эктотрофная микориза характерна для многих деревьев (дуб, ель, сосна, берёза, тополь). Этот симбиоз обеспечивает гриб источником углерода в течение жизни в обмен на активное участие в транспорте воды и питательных веществ для дерева. Было экспериментально показано, что корневые системы осины и некоторых других видов тополей вступают в ассоциацию с эктомикоризными грибами на 26 – 82% от общего объема, занимаемого корнями (Baum, Makeschin, 2000).

Тонкие корни разных пород деревьев живут достаточно короткий период: от 2 недель до 2 лет. Их чистая первичная продуктивность составляет важную, но до сих пор не измеренную часть в круговороте углерода лесных экосистем, поэтому их значение в круговороте азота и углерода сложно переоценить. Важно отметить, что тонкие корни вносят свой вклад в рост и формирование дерева, являются каналом, насосом для поступления воды, минеральных и органических веществ из почвы.

В результате проведенного анализа существующих в литературе данных по продукции тонких корней, срокам жизни и характеристикам круговорота, нами была показана с помощью системы моделей EFIMOD (Komarov et al., 2003) роль неопределенностей в определении продукции и текущей биомассы тонких корней.

Нами был поставлен компьютерный эксперимент. Мы рассмотрели два возможных варианта роста древостоя: вначале предположили, что в тонкие корни уходит 10% прироста, а затем провели численный эксперимент при предположении, что в тонкие корни уходит 30 % прироста. При этом во втором случае мы соответственно уменьшали приросты ствола и хвои. В нашей модели предполагается, что тонкие корни живут один год и целиком уходят в процессы минерализации и гумификации.

В результате в нашей модели происходит перераспределение углерода между древостоем и почвой. Легко увидеть, и это ожидаемо, что при увеличении стока углерода в тонкие корни и их последующую минерализацию и гумификацию, пулы органического

вещества в почве заметно увеличиваются. При этом чистая первичная продукция несколько уменьшается (рис.1), так как доля фотосинтезирующей хвои уменьшается.

В то же время в древостое происходит уменьшение накопления биомассы, что тоже объясняется относительным уменьшением прироста хвои.

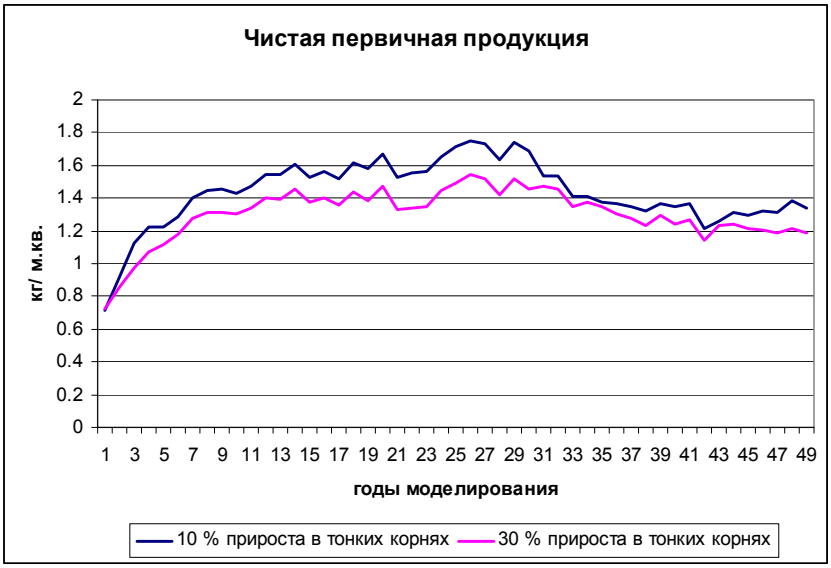


Рисунок 1 - Динамика чистой первичной продукции

Таким образом, можно сделать вывод о том, что тонкие корни являются важным элементом больших и значимых круговоротов на планете, за свою короткую «жизнь» они успевают сконцентрировать в себе и законсервировать в почве большое количество органики, способствуют активному росту и фотосинтезу всего дерева. Результаты проведенного компьютерного эксперимента демонстрируют необходимость как можно более точного учета возможной продукции и стока ассимилятов в тонкие корни, так как результат оказывается сильно зависимым от начальных предположений.

Литература

Baum C., Makeschin F. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on mycorrhizal formation of two poplar clones (populus trichocarpa and P. tremula x tremuloides) // J. of Plant Nutrition and Soil Science, 2000. 163(5):491–497.

Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zubkova E. EFIMOD 2 – A model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecological Modelling, 2003. 170(2–3):373–392.

Ostonen I., Lõhmus K., Pajuste K. Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: Comparison of soil core and ingrowth core methods // Forest Ecology and Management, 2005. 212(1–3):264–277.

ДВУХ ИНТЕРВАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СУКЦЕССИОННОЙ ДИНАМИКИ ЧЕРНИЧНИКОВ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Бутусов О.Б., Редикульцева Н.И. , Попов Д.В., Цыбизов Е.И.

Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), Москва, Россия
butusov-1@mail.ru

Аннотация: разработана двух интервальная модель сукцессии, в которой суммарный интервал сукцессионной динамики разделяется на два подинтервала: на первом подинтервале моделируется трехкомпонентная сукцессия переходов выделов с преобладанием лиственных пород в хвойные выделы (с преобладанием сосны и ели), а на втором подинтервале после исчезновения выделов с преобладанием лиственных пород моделируются переходы между хвойными выделами с преобладанием сосны и ели.

Моделирование сукцессионной динамики имеет важное практическое значение для долгосрочного прогнозирования породно-возрастной структуры лесов и планирования лесохозяйственных мероприятий (Исаев, Коровин, 2005). Основное допущение модели базируется на предположении, что древостои всех производных пород переходят в древостои коренных пород (однонаправленная сукцессия), а смена коренных пород производными возможна только в процессе естественной регенерации древостоев на пустующих лесных землях. Элементом моделирования является таксационный выдел. Временной шаг моделирования – ступень возраста (10 лет).

Модель описывает сукцессионную динамику таксационных выделов. Тип выделов определяется по преобладающим породам. Выделы с преобладанием лиственных пород считаются лиственными, выделы с преобладанием сосны считаются сосновыми и т.д. Для идентификации модели использованы данные лесоустройства Вологодской области.

Цель моделирования – расчет матриц сукцессии, величина которых зависит от времени и которые описывают переходы между соседними ступенями возраста. Матрица сукцессии представляет собой таблицу, строки которой описывают исходные породы, а столбцы конечный результат сукцессии.

Модель описывает сукцессионную динамику на двух интервалах. На первом интервале моделируются переходы между выделами трех типов: с преобладанием лиственных пород, с преобладанием сосны и с преобладанием ели. На втором интервале после исчезновения выделов с преобладанием лиственных пород моделируются переходы между хвойными выделами с преобладанием сосны и ели.

На первом интервале сукцессионные переходы описываются с помощью следующей матрицы сукцессии

$$P = \begin{array}{c} \\ S \\ E \\ L \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} S & E & L \end{array} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \end{array} \qquad (1)$$

где S – доля площади сосновых выделов, E – доля площади еловых выделов, L – доля площади лиственных выделов, b_{31} – скорость сукцессии $L \rightarrow S$, b_{32} – скорость сукцессии $L \rightarrow E$, $b_{33} = 1 - b_{31} - b_{32}$.

Уравнения, описывающие сукцессионные переходы между соседними ступенями возраста получаются с помощью формулы (1) из следующего матричного уравнения

$$\begin{pmatrix} S_{n+1} \\ E_{n+1} \\ L_{n+1} \end{pmatrix} = P^T \begin{pmatrix} S_n \\ E_n \\ L_n \end{pmatrix} \qquad (2)$$

где T – символ транспонирования, n – номер ступени возраста.

Элементы матрицы сукцессии вычисляются из уравнения (2) с помощью метода наименьших квадратов (МНК). При этом минимизируется сумма квадратов разностей таксационных и расчетных данных.

Аналогичные вычисления выполняются для второго интервала. Результаты моделирования представлены на рисунке 1. Матрица сукцессии для обеих интервалов представлены в таблице 1.

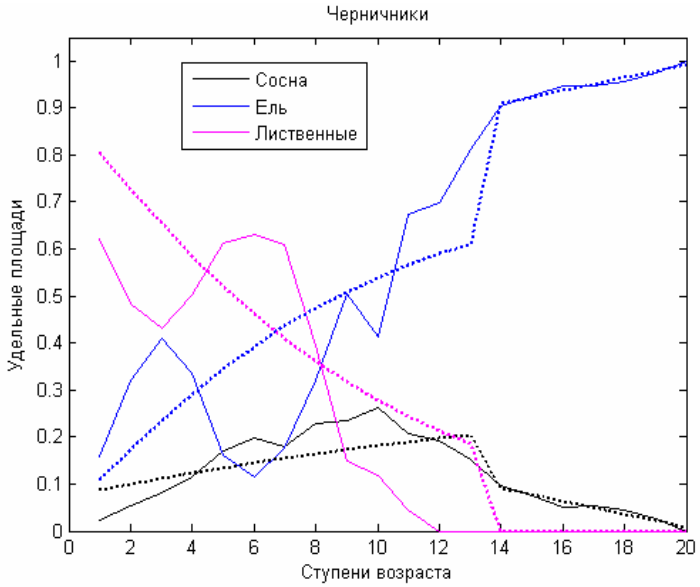


Рисунок 1 - Сукцессионная динамика черничников Вологодской области: сплошные линии данные лесоустройства, точки – результаты моделирования

Таблица 1. Матрицы скоростей скуцессии на первом и втором интервале

Первый интервал				Второй интервал		
	Сосна	Ель	Лиственные		Сосна	Ель
Сосна	1	0	0	Сосна	0.9843	0.0157
Ель	0	1	0	Ель	0	1
Лиственные	0.0196	0.0882	0.8923			

Для наглядности скорости сукцессии лиственных пород на первом интервале представлены на рисунке 2 в виде столбиковой диаграммы.

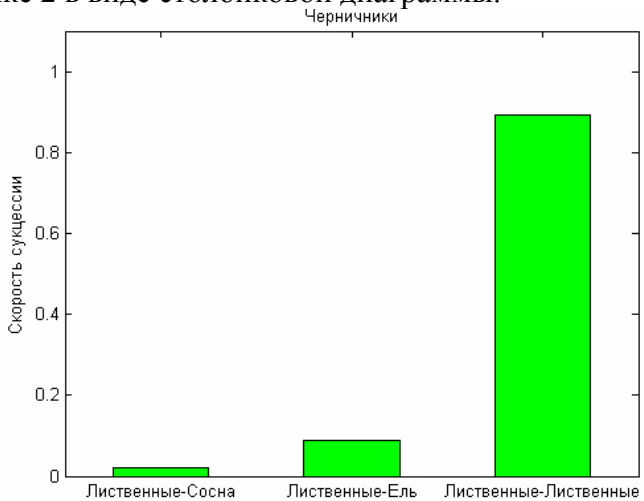


Рисунок 2 - Диаграмма сукцессии лиственных пород на первом интервале

Полученные результаты использованы в работе (Коровин и др., 2011) для моделирования динамики лесного фонда.

Литература

Исаев А.С., Коровин Г.Н. Динамика лесных ресурсов и прогнозирование изменений лесного фонда.// Фундаментальные основы управления биологическими ресурсами. Сборник научных статей. Москва: Товарищество научных изданий КМК 2005. с. 47 – 60.

Коровин Г.Н., Корзухин М.Д., Бутусов О.Б., Голованов А.С. Долгосрочное прогнозирование динамики породно-возрастной структуры // Лесоведение – 2011. - №6. – С.94-110.

О ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ВЛАЖНОСТИ ЛЕСНОЙ ПОДСТИЛКИ В ПРОСТОЙ МОДЕЛИ ВОДНОГО РЕЖИМА ЛЕСНЫХ ПОЧВ

Быховец С.С.[1]

[1] *ИФХиБПП РАН, Пущино, Россия*
s_bykhovets@rambler.ru

Аннотация: Рассматриваются возможности уточнения связи влажности лесной подстилки с влажностью нижележащей минеральной почвы с целью ее использования в упрощенных моделях водного режима лесных почв. Предложена также параметризация водно-физических свойств подстилки в зависимости от ее плотности.

При моделировании почвенно-биогеохимических процессов мы сталкиваемся с необходимостью учета влияния влажности почвы на скорости этих процессов. Причем, в случае лесных экосистем необходимо учитывать влажность как минеральных горизонтов почвы, так и органического горизонта – лесной подстилки. Но, в отличие от влажности минеральных горизонтов, экспериментальные данные по влажности подстилки весьма немногочисленны, за исключением исследований на стационарах Института биологии Коми НЦ РАН (Верхоланцева, 1970, 1972, 1977 и др.) и в Центрально-Лесном заповеднике (Васильев, 1950; Абражко, 1996). В большинстве же случаев почвоведы и гидрологи при экспериментальном исследовании водного режима лесных почв влажностью подстилки, к сожалению, пренебрегают.

В разработанной и используемой нами подмодели водного режима почвы (Быховец, Комаров, 2002; Моделирование…, 2007) влажность почвы моделируется на основе простого балансового подхода с месячным шагом. В этом случае непосредственный расчет влажности подстилки затруднен, и ее приходится оценивать на основе упрощенной параметризации, основанной на статистических связях с влажностью нижележащих горизонтов почвы. До настоящего времени для такой оценки использовалось отношение объемных влажностей подстилки и минеральной почвы, оцененное на ограниченном объеме литературных данных. Указанное отношение принималось равным 0.5 для средних условий увлажнения, и могло изменяться от 0.3 на сухих песчаных почвах до 0.9-1.0 в переувлажненных местообитаниях.

В дальнейшем, по мере расширения объема используемых экспериментальных данных, в особенности – при анализе четырехлетних (но весьма детализированных во времени) наблюдений И.С. Васильева (1950) и многолетних исследований В.И. Абражко (1996), стало очевидным, что данная параметризация требует уточнения. Оказалось, что при изменении указанных значений влажности в достаточно широком диапазоне зависимость между ними существенно нелинейна. Принятое же нами ранее предположение об относительном постоянстве средних значений отношения этих влажностей для отдельных местообитаний могло выполняться лишь в частных случаях, пока мы располагали ограниченными материалами 1–3-летних наблюдений, на протяжении которых весь возможный в данном местообитании диапазон значений влажности, как правило, не успевал реализоваться.

В действительности отношение влажности подстилки к влажности нижележащих минеральных горизонтов возрастает не только от более сухих местообитаний к более влажным, но и по мере повышения влажности в конкретном местообитании. Взаимосвязь между соответствующими значениями влажности подстилки и минеральных горизонтов для отдельных местообитаний удовлетворительно описывается, в частности, степенной зависимостью. Однако ее параметры для различных местообитаний существенно различаются. Картина несколько улучшается, если вместо «абсолютных» значений объемной влажности W использовать нормированные величины вида W/W_{Sat} или $(W-W_{WP})/(W_{Sat}-W_{WP})$, где W_{Sat} – полная влагоемкость, W_{WP} – влажность устойчивого

завядания. Однако, для дальнейшего уточнения и использования в модели указанных зависимостей, по-видимому, потребуется их обобщение на основе той или иной типизации местообитаний.

Другая задача, требовавшая решения – параметризация водно-физических свойств (влажности устойчивого завядания W_{WP}, наименьшей полевой влагоемкости W_{FC} и полной влагоемкости W_{Sat}) лесной подстилки. Соответствующие экспериментальные данные доступны для несколько большего числа местообитаний. Тем не менее при моделировании часто возникает необходимость их косвенной оценки при недостатке фактических данных. Поэтому требовалось получить зависимости указанных величин от одной или нескольких сравнительно широко распространенных и легко измеряемых физических характеристик. В качестве такой характеристики была использована плотность подстилки (D_{FF}, г/см^3), которая легко может быть оценена по ее запасу и толщине. Полученные зависимости:

$$W_{WP} = 51.5 \cdot D_{FF} \qquad (R^2 = 0.72)$$

$$W_{FC} = 78.5 \cdot \sqrt{D_{FF}} \qquad (R^2 = 0.21)$$

$$W_{Sat} = 100.0 - 55.2 \cdot D_{FF} \qquad (R^2 = 0.79).$$

позволяют удовлетворительно оценивать влажность завядания и полную влагоемкость подстилки. В случае наименьшей полевой влагоемкости – такая оценка может использоваться лишь в качестве первого приближения. Очевидно, одной только плотности в этом случае не вполне достаточно и для более точной оценки следует искать другие предикторы.

Изложенные результаты позволяют усовершенствовать оценку влажности лесной подстилки при использовании упрощенных моделей водного режима, однако требуется дальнейшее уточнение зависимости отдельных параметров от условий местообитания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 12-04-01269).

Литература

Абражко В.И. Водный режим сообществ еловых лесов (синэкологические исследования). Дисс. … докт. биол. наук. СПб., 1998.- 620 с.

Быховец С.С., Комаров А.С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение. 2002. № 4.- С. 443–452.

Васильев И.С. Водный режим подзолистых почв // Материалы по изучению водного режима почв / Труды Почвенного ин-та имени В.В. Докучаева. Т. XXXII. М., 1950.- С. 74–296.

Верхоланцева Л.А. Почвы Усть-Куломского топоэкологического профиля // Вопросы экологии леса (средняя тайга Коми АССР) / Труды Коми филиала АН СССР, № 19. Сыктывкар: Коми кн. изд-во, 1970.- С. 95–106.

Верхоланцева Л.А. Водно-физические свойства почв сосняков-зеленомошников // Вопросы экологии сосняков Севера / Труды Коми филиала АН СССР, № 24. Сыктывкар: Коми кн. изд-во, 1972.- С. 42–51.

Верхоланцева Л.А. Торфянисто-подзолистые почвы различных типов леса среднетаежной подзоны Коми АССР // Материалы по почвам Коми АССР. Сыктывкар, 1972.- С. 28–37.

Верхоланцева Л.А. Почвы северотаежных ельников // Экология ельников Севера / Труды Коми филиала АН СССР, №. 32. Сыктывкар: Коми кн. изд-во, 1977.- С. 52–84.

Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Отв. ред. В.Н. Кудеяров. М.: Наука, 2007. - 380 с.

НОВЫЙ ШАГ В МОДЕЛИРОВАНИИ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ: ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ СООТНОШЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ В СУБСТРАТЕ, ПРОДУКТЕ И БИОМАССЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ ПУТЕЙ

Вавилин В.А.

Институт водных проблем РАН, Москва, Российская Федерация
vavilin@aqua.laser.ru

Аннотация: Превращение субстрата, осуществляемое сообществом микроорганизмов, может идти различными метаболическими путями в зависимости от параметров окружающей среды (температура, pH и пр.), концентраций субстрата и соответствующих микроорганизмов. Включение содержания тяжелого изотопа в субстрате, продукте и биомассе в традиционную динамическую модель сообщества микроорганизмов позволяет судить о метаболическом пути превращения субстрата в продукт.

Основное уравнение

Вводя фракцию тяжелого изотопа в продукте реакции как $f={}^{h}P/P$, нами применялось следующее уравнение, описывающее перераспределение тяжелого изотопа (Vavilin, 2012 a-b; Vavilin, 2013):

$$\frac{df_P^h}{dt}=\frac{1}{P}\frac{d^hP}{dt}-\frac{{}^hP}{P^2}\frac{dP}{dt}=\frac{dP/dt}{P}\left\{\frac{d^hP/dt}{dP/dt}-f_P^h\right\}\approx\frac{dP/dt}{P}\left(\frac{1}{\alpha_C}f_S^h-f_P^h\right)$$

где $f_S^h={}^hS/S$ - фракция тяжелого изотопа в субстрате; dP/dt - скорость образования P; $\alpha\geq 1$ - коэффициент фракционирования тяжелого и легкого субстратов. Идет предпочтительное образование продукта с легким изотопом. Для описания обогащения субстрата тяжелым изотопом рассматривался баланс этого изотопа в субстрате, продукте и биомассе.

Результаты

Динамика анаэробного окисления метана нитритом: $3CH_4 + 8NO_2^- + 8H^+ = 3CO_2 + 4N_2 + 10\ H_2O$, осуществляемая чистой культурой *Methylomirabilis oxyfera* (данные: Rasigraf et al., 2012). Модель, использующая функцию Моно для скорости процесса, зависящую от концентрации двух лимитирующих субстратов (метан и нитрит), позволила описать нелинейную динамику фракционирования изотопов углерода и водорода при 2-х начальных концентрациях (Рис. 1).

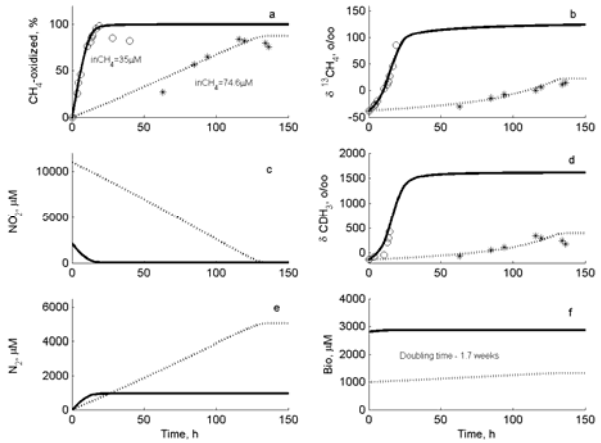


Рисунок 1

Численно показано, что традиционное уравнение Релея, выводимое из кинетики 1-го порядка по субстрату, является лишь грубой аппроксимацией нелинейной модели.

Роль неацетокластического метаногенеза увеличивается с повышением начальной концентрации аммония (данные: Grossin-Debattista, 2011). Вклад ацетокластического и неацетокластического метаногенеза зависит от соотношения начальных концентраций *Methanosarcinaceae*, *Methanosaetaceae* и ацетат-окисляющих бактерий (Рисунок 2).

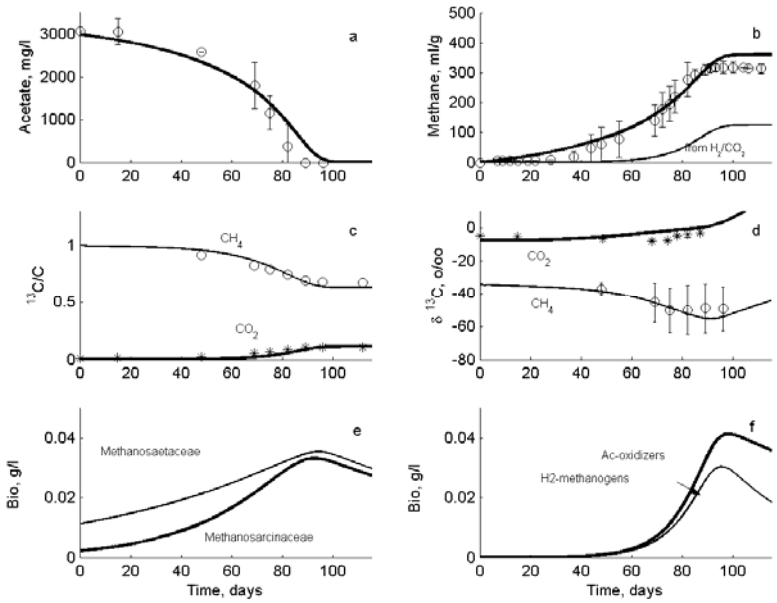


Рисунок 2

Неканонический путь метанизации торфа идет в верховых болотах, когда доминирует водородотрофный метаногенез (данные: Galand et al., 2010).

При анаэробном окислении метана сульфатом небольшое количество продуцируемого метана существенно изменяет перераспределение изотопов углерода и водорода (данные: Holler et al., 2009 и Seifert et al., 2006).

Доминирование ацетокластического и водородотрофного метаногенеза изменяется в процессе метанизации целлюлозы (данные: Qu et al., 2009).

Скорость денитрификации в почве зависит от концентрации легко усваиваемого органического вещества, при недостатке которого динамика процесса формально может описываться кинетикой 1-го порядка по концентрации нитрата и уравнением Релея, вытекающим из кинетики 1-го порядка. Численно показано, что модель 1-го порядка является лишь грубой аппроксимацией нелинейной модели денитрификации (данные: Mariotti et al., 1981; Menyailo, Hungate, 2006).

Литература

Vavilin V.A. Estimating evolution of $\delta^{13}CH_4$ during methanization of cellulosic waste based on stoichiometric chemical reactions, microbial dynamics and stable carbon isotope fractionation. // Biores. Technol. 2012a. V. 110. C. 706-710.

Vavilin V.A. Estimating evolution of $\delta^{13}CH_4$ during methanization of the boreal peatland ecosystems based on stoichiometric chemical reactions, microbial dynamics and stable carbon isotope fractionation. // Ecol. Modelling. 2012b. V. 240. C. 84-92.

Vavilin V.A. Estimating changes of isotopic fractionation based on chemical reactions and microbial dynamics during anaerobic methane oxidation: apparent zero- and first-order kinetics at high and low initial methane concentrations. // Ant. Leeuwenhoek. 2013. V. 103. P. 375-383.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЗАПАСОВ ВОДЫ В ПОЧВЕ ПРИ РАЗНЫХ МАСШТАБАХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОСРЕДНЕНИЯ

Варчева С.Е.

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии», Обнинск, Россия
s.varcheva@mail.ru

Аннотация: Представлены две математические модели для расчета динамики почвенной влаги: одна – для нерегулярной сети гидрометеорологических станций с декадным шагом по времени, другая – для осредненных по территории полей влагозапасов с месячным шагом по времени. Показано, что рассчитанные временные ряды запасов продуктивной влаги могут служить надежным индикатором наступления почвенных засух.

Для системы мониторинга климата, как по отдельным областям, так и для страны в целом, разработан комплекс агроклиматических и биоклиматических показателей (Сиротенко и др., 2008). Назначение предлагаемого комплекса показателей – всесторонняя оценка влияния наблюдаемых изменений климата на сельское хозяйство и сельскохозяйственное землепользование. Одним из показателей системы мониторинга климата, характеризующим режим увлажнения посевов сельскохозяйственных культур, являются запасы продуктивной влаги в почве.

Несмотря на то, что влагозапасы почвы представляются наиболее информативным параметром для оценки условий формирования урожайности и прогноза продуктивности, их инструментальное определение термостатно-весовым методом является трудоемким и не достаточно оперативным. Кроме того, результаты измерений характеризуют сравнительно небольшие участки, в то время как влагозапасы почвы чрезвычайно изменчивы в пространстве и времени. Поэтому задача разработки расчетных методов определения влажности почвы остается по-прежнему актуальной.

В работе рассматривается система численного мониторинга влагозапасов почвы для Европейской территории РФ, реализованная в двух вариантах:

– для полей влагозапасов, заданных на фиксированной нерегулярной сети гидрометеорологических станций (ГМС);

– для полей влагозапасов, осредненных по территории субъектов РФ (областей, краев и республик).

В первом случае для расчетов используются декадные значения следующих метеорологических параметров: осадков, температуры, дефицита влажности воздуха.

Во втором случае используются месячные суммы осадков и среднемесячные значения температуры воздуха.

Для агрометеорологического мониторинга влагозапасов почвы и связанных с ними элементов водного баланса на сети ГМС используется однослойная физико-статистическая модель с декадным шагом по времени (Варчева, 2009). Численная схема основывается на решении двух балансовых уравнений – для запасов воды в снежном покрове и в метровом слое почвы. Моделируются процессы накопления воды в снежном покрове, интенсивность таяния снега, испарение с поверхности почвы и динамика влагозапасов в метровом слое почвы. Модель апробирована на материалах многолетних (с 1966 по 2006 гг.) наблюдений за озимой пшеницей на ГМС Гигант Ростовской области. Коэффициент корреляции между рассчитанными и измеренными значениями запасов продуктивной влаги составил при непрерывном расчете за 134 декады – 0,90, за 540 декад – 0,83 и за 1140 декад (40 лет) – 0,78.

В то же время существует круг задач, где необходима не детализация влагозапасов по территории, а, наоборот, их пространственное обобщение. К таким задачам относится, прежде всего, долгосрочное прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур, а

также прогнозирование влагозапасов почвы. Достаточно очевидно, что с большой заблаговременностью можно предсказывать лишь самые общие особенности распределения влагозапасов на большой территории.

Основным препятствием для разработки расчетных методов мониторинга водно-теплового режима сельскохозяйственных посевов на больших площадях для крупных регионов России, таких как Северный Кавказ, Поволжье и т.д. является отсутствие адекватной базы данных наблюдений за влажностью почвы достаточного объема. Для локальной (по отдельным административным единицам) идентификации параметров расчетной схемы мониторинга необходимы наблюдения за влажностью почвы за несколько десятков лет.

В работе для построения и проверки адекватности численной схемы привлечена уникальная база данных (Мещерская и др., 1982). Она включает данные о среднемесячных величинах запасов продуктивной влаги в пахотном и метровом слоях почвы для 58 областей России и Украины с 1951 по 1977 гг. Для расчета средних величин влагозапасов использовались данные наблюдений 447 агрометеорологических станций.

Предлагаемая схема расчета средних областных запасов продуктивной влаги в пахотном и метровом слоях почвы представляет собой систему рекуррентных уравнений для 30 регионов Европейской территории РФ. Начальные значения влагозапасов задаются в октябре предыдущего года и затем, начиная с марта, рассчитываются среднемесячные значения влажности почвы.

Получены следующие оценки коэффициентов корреляции между рассчитанными значениями влагозапасов и данными наблюдений: для пахотного слоя почвы – от 0,74 до 0,79, а для метрового слоя почвы – 0,65 – 0,69. Таким образом, схема обеспечивает непрерывный расчёт средних по области влагозапасов почвы на протяжении заданного числа лет и воспроизводит порядка 55-60 % межгодовой дисперсии влагозапасов почвы в течение теплого периода года на Европейской территории России.

Рассчитанные временные ряды запасов продуктивной влаги с 1976 по 2010 гг. позволили провести анализ повторяемости засух – самого важного для сельского хозяйства юга России неблагоприятного гидрометеорологического явления. На большей части Центрального федерального округа частота почвенных засух в пахотном слое не превышала 25 % лет (кроме территории Воронежской области в июне и в июле), в Приволжском федеральном округе наиболее частые (до 70% лет) засухи наблюдались в Оренбургской области в июле, в Ульяновской и Саратовской областях – до 50 % лет в июле. Что касается Южного и Северо-Кавказского федеральных округов, то здесь чаще всего (до 50 % лет) засухи в пахотном слое почвы наблюдались в Волгоградской и Ростовской областях, начиная с июня.

Таким образом, представленные численные схемы позволяют вести непрерывный круглогодичный мониторинг динамики запасов продуктивной влаги в почве в задачах разного пространственного осреднения.

Литература

Варчева С.Е. Метод расчета динамики влагозапасов почвы для системы круглогодичного агрометеорологического мониторинга // Известия Самарского научного центра РАН. - 2009. - Т. 11. - № 1 (7). - С. 1642-1648.

Мещерская А.В., Болдырева Н.А., Шапаева Н.Д. Средние областные запасы продуктивной влаги в почве и высота снежного покрова (Статистический анализ и примеры использования).- Л.: Гидрометеоиздат, 1982. - 244 с.

Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н., Долгий-Трач В.А. Разработка системы регионального круглогодичного мониторинга водно-теплового режима посевов сельскохозяйственных культур // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. – Калуга. - 2008. - Вып. 13. - С. 276-281.

ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ ПОЧВ КУРСКОЙ ОБЛАСТИ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Величенко М.В. [1], Архангельская Т.А.[2]

[1,2]МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[1]velichenko_m@gmail.com
[2]arhangelskaia@gmail.com

Приведены результаты математического моделирования зависимостей температуропроводности от влажности для черноземов типичных тяжелосуглинистых, вскрытых на землях различного землепользования. Температуропроводность почв при увлажнении возрастает в 2.5–3 раза. В результате аппроксимации экспериментальных данных подобраны параметры, позволяющие рассчитывать температуропроводность исследованных почв при любых значениях влажности.

Введение

При расчетном определении температуропроводности почв обычно используют данные о плотности, содержании органического вещества, гранулометрическом и минералогическом составе, текущих значениях влажности.

Смена характера землепользования приводит к изменениям почвенного профиля, что сказывается и на тепловых свойствах горизонтов. К примеру, уменьшение плотности и увеличение содержания углерода в условиях залежи приводят к уменьшению температуропроводности гумусово-аккумулятивного горизонта (Лукьященко, 2012). Изучение изменения тепловых свойств при переводе земель в залежь представляется актуальным и с точки зрения прогнозирования уровней выделения углекислого газа при возможных глобальных изменениях климата.

Объекты и методы

Образцы ненарушенного сложения высотой 7 см и диаметром 5 см были отобраны из трех разрезов, расположенных на целинном участке некосимой степи Центрально-черноземного заповедника им. А. А. Алехина (участок 1) и на опытном поле Петринского опорного пункта Почвенного института (участки 2 и 3) в Курской области.

Температуропроводность целинной почвы была определена для образцов из гор. А1 с глубин 10–17 и 50–57 см, из гор. АВ с глубины 75–82 см, из гор. В1 с глубины 95–102 см и из гор. Вса 120–127 см. Для залежи исследовали образцы с глубин 0–7, 10–17 и 25–32 см, т. е. из бывшего пахотного горизонта и из подпахотного гор. А1. Для обрабатываемой площадки исследовали образцы из пахотного слоя с глубин 0–7 и 22–29 см.

Температуропроводность отобранных монолитов определяли в лаборатории, применяя метод регулярного режима. Для каждого образца определяли зависимость температуропроводности (κ) от влажности (θ) в диапазоне от капиллярного насыщения до воздушно-сухого состояния. После измерений температуропроводности определяли плотность почвы и содержание органического углерода.

Результаты и обсуждение

Исследования показали, что плотность почвенных образцов варьировала в интервале от 0.87 г/см^3 до 1.40 г/см^3. Содержание органического углерода изменялось в пределах 0.5–4.3 %. При этом для гумусово-аккумулятивных горизонтов в ряду целина –пашня – залежь отмечался рост плотности и уменьшение количества углерода. Высокая плотность образцов, отобранных на залежи, и небольшое содержание в них органического вещества, вероятно, являются следствием того, что процесс восстановления почвы не достиг своей завершающей стадии.

По результатам лабораторных измерений были построены экспериментальные зависимости температуропроводности от влажности, которые в дальнейшем были аппроксимированы регрессионной функцией (Архангельская, 2009):

$$\kappa = \kappa_0 + a \exp\left[-0.5 \left(\frac{\ln\left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)}{b} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где θ – объемная влажность почвы, κ – соответствующая ей температуропроводность, κ_0, a, θ_0, b – параметры аппроксимации.

Для исследованных горизонтов были рассчитаны параметры функции (1). Параметр κ_0 изменяется в интервале 1.09–1.65Ч10^{-7} м^2/с, параметр a – в пределах 1.60–2.46Ч10^{-7} м^2/с, параметр θ_o – в пределах 0.27–0.37 см^3/см^3 и безразмерный параметр b варьирует от 0.40 до 0.65 (таблица 1). Все полученные параметры являются значимыми (p<0.005).

В ряду целина – пашня – залежь температуропроводность гумусово-аккумулятивных горизонтов возрастает (параметры κ_0 и a). Для образцов из старопахотного горизонта с глубины 10–17 см характерна ярко выраженная S-образная форма кривой $\kappa(\theta)$, что отражается в особенно низком значении параметра b.

Таблица 1 – Плотность (ρ), содержание органического углерода (C), параметры функции (1) κ_0, a, θ_0, b и стандартные ошибки аппроксимации (SEE) экспериментальных зависимостей $\kappa(\theta)$ функцией (1) для исследованных горизонтов

Участок	Горизонт	Глубина, см	ρ, г/см^3	C, %	κ_0, 10^{-7} м^2/с	a, 10^{-7} м^2/с	θ_0, см^3/см^3	b	SEE, 10^{-7} м^2/с
Целина	A1	10–17	0.87	4.33	1.09	1.60	0.32	0.65	0.11
		50–57	1.06	2.74	1.25	1.84	0.30	0.61	0.14
	AB	75–82	1.14	1.70	1.46	2.12	0.28	0.54	0.18
	B1	95–102	1.11	0.98	1.46	2.23	0.27	0.59	0.16
	B1ca	120–127	1.20	0.54	1.65	2.08	0.30	0.56	0.15
Пашня	Апах	0–7	1.24	3.10	1.29	2.11	0.35	0.43	0.10
		22–29	1.14	2.85	1.34	1.92	0.37	0.48	0.08
Залежь	Аст пах	0–7	1.30	2.94	1.44	2.46	0.34	0.51	0.14
		10–17	1.40	2.45	1.51	2.26	0.37	0.40	0.08
	A1	25–32	1.13	2.27	1.38	1.95	0.33	0.58	0.14

Полученные регрессионные кривые хорошо описывают экспериментальные данные: ошибки аппроксимации составляют 0.08–0.18Ч10^{-7} м^2/с при общем диапазоне изменения температуропроводности от 1.09–1.65 до 2.69–3.90Ч10^{-7} м^2/с. Приведенные параметры могут быть использованы для расчетов температуропроводности схожих по свойствам почв.

Литература

Архангельская Т.А. Параметризация и математическое моделирование зависимости температуропроводности почвы от влажности // Почвоведение. 2009. № 2. С. 178-188.

Лукьященко К.И. Температуропроводность почв различного гранулометрического состава и генезиса и ее математическое моделирование. Автореф. дисс…кан. биол. наук. Москва. 2012 г. 24 с.

ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОПУЛЯЦИИ ЖИВОТНЫХ.

Виленкин Б. Я. [1]

Оттава, Канада.
bovilen@gmail.com

Аннотация: параметр-порог реакции на внешнее возмущение-определяет смертность от внешних и внутренних причин. Дан метод оценки параметра для природных популяций. Распределение популяций по вероятности выживания U-образно. Эта вероятность не зависит от тренда, но всегда ниже у популяций с колебательной динамикой. Демографические причины смертности преобладают у популяций в правой ветви распределения.

Введение

Исследование рядов динамики численности диких популяций широко используется для оценки жизнеспособности популяций, т.е. вероятности выживания за заданный период времени. Основные усилия направлены на определение параметров популяционного роста, и в разных случаях оказываются пригодными разные модели. Предлагается стохастическая модель, не содержащая параметров роста. Дан способ оценки единственного параметра, приведены результаты исследования диких популяций животных.

Модель, оценка параметра и результаты

Использован изменённый алгоритм исходной модели (Vilenkin, 2006): X(t)=X(t-1)+r1-r2 если T≥E и X(t-1)+r1-r2 >0. Иначе X(t)=0. r1, r2 и *E* - случайные числа, меняющиеся от 0 до 1 при каждом шаге. r1 соответствует приросту+иммиграция; r2-смертности+эмиграция. Колебания внешних условий заданы случайной переменной *E*. *T* - параметр популяции (толерантность), т.е. порог реакции на амплитуду внешнего возмущения. При каждом из 75 значений *T* модель прогонялась на 10000 шагов. Считали порознь количество нулей вследствие X(t-1)+r1-r2≤0- эффект структурной, (демографической) стохастичности, и вследствие *T<E* - эффект стохастичности среды. Единичные нули являются проявлением quasiextinction (Ginzburg et al., 1982), их частота служит оценкой вероятности вымирания. Зависимость этих величин от T показана на рисунке 1: p(m)-вероятность вымирания от демографических (квадраты) и внешних (крестики) причин. Соответствующие формулы позволяют оценить вероятность выживания: p(s)=T/(1+√1-T).

Из глобальной базы данных динамики популяций (GPDD, 1999) выбраны 142 непрерывных ряда наблюдений не короче 20 лет, относящиеся к 80 видам рыб, птиц и млекопитающих. Предполагается, что наилучшей для тестируемой популяции является такая величина *T*, при которой наибольшая часть реализации модели занята похожими на динамику популяции отрезками. Для определения величины *T* каждая выборка прогонялась 20 раз по 10000 шагов при каждом из 26 заданных значений *T* модели. Всюду подсчитывали количество значимых положительных корреляций, и соответствующие пикам средние значения *T* и *p(s)* принимали как характерные для данной популяции. Относительные стандартные ошибки не превосходят соответственно 8,0% и 10,3%. Распределение частот *p(s)* по всему массиву показано на рисунке 2. Величина *p(s)*<0.55 найдена всего у одной популяции.

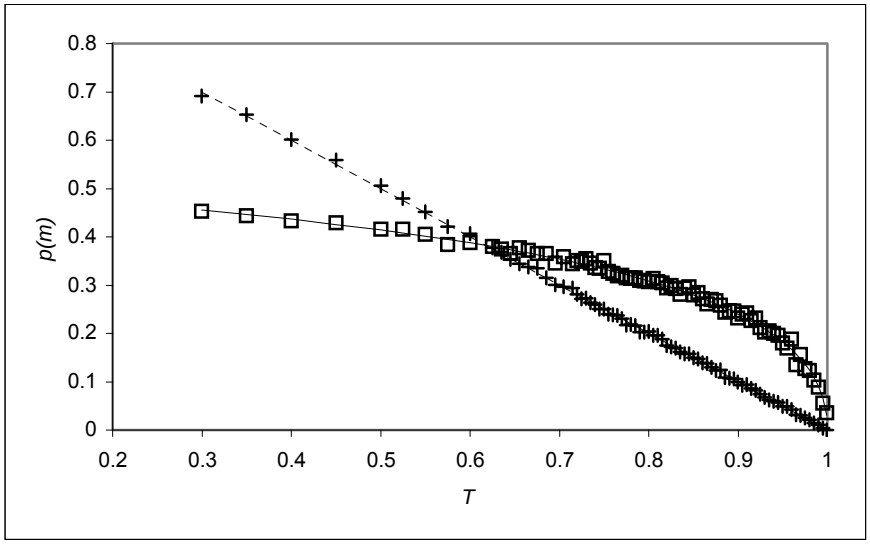


Рисунок 1.

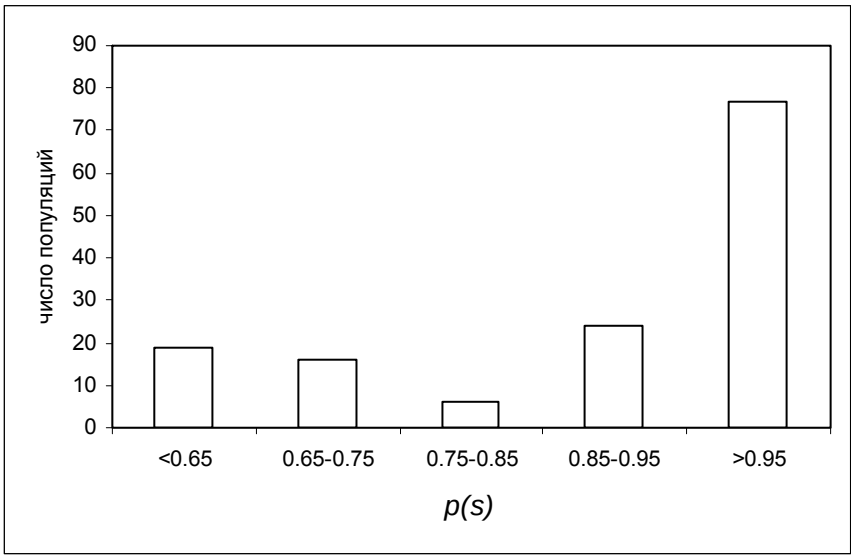


Рисунок 2.

Подавляющая часть популяций существует при очень высоких величинах *p(s*), при этом основной причиной смертности является демографическая стохастичность; меньшая часть-при относительно низких, промежуточные состояния редки, *p(s*)≤0,5 грозит вымиранием. Малые величины *p(s*) характерны для популяций с резкими периодическими колебаниями численности. В более благоприятных условиях колебания у тех же популяций теряют периодичность и снижают амплитуду, *p(s*) перемещается из левого пика рисунка 2 в правый. Вероятно, малая жизнеспособность в периодическом режиме видетельствует о нахождении системы вблизи границы устойчивости, о чём неоднократно напоминал А.М.Молчанов и что описано в нелинейной динамике (Sagdeev, Usikov, Zaslavsky, 1988). Величина *p(s*) не зависит от средней численности или тренда. Необходимо иметь в виду, что модель и оценки параметра не могут использоваться для прогноза и относятся только к конкретным отрезкам прошедшего времени.

Литература

Ginzburg LR, LB Slobodkin, K.Johnson, AG Bindman. Quasiextinction Probability as a Measure of Impact on Population Growth. Risk Analysis (1982), 2:171-181.

GPDD, NERC Center for Population Biology, Imperial College. (1999). http://www.sw.ic.ac.uk/cpb/gpdd.html

Sagdeev RZ, DA Usikov, GM Zaslavsky. "'Nonlinear Physics. From the pendulum to turbulence and chaos". Contemporary Concepts in Physics, Vol. 4. Routledge Publ., 1988. P 671.
Vilenkin, B. Ecological reading of random numbers. Ecological Modelling (2006), 195: 385-392.

СТРАТЕГИИ ВЫЖИВАНИЯ ЛЕСНОЙ КУНИЦЫ В АНТРОПОГЕННОЙ СРЕДЕ ОБИТАНИЯ

Владимирова Э.Д.

Самарский аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия
elyna-well@nm.ru

Аннотация: в условиях энергетических ограничений лесная куница достигает оптимального сочетания решений противоречивых задач: максимизации полезности добычи кормовых объектов и минимизации возможного риска, заключенного в последствиях взаимодействия с опасными объектами среды обитания. Кормовой поиск животных этого вида ориентируется вдоль лесолуговых экотонов, благодаря чему оптимальные кормовые условия сочетаются с оптимальными защитными.

Целевая функция живого организма – максимизация времени жизни с одновременным сохранением гомеостаза (Ashby, 1959). Для этого млекопитающие проявляют активность, что может быть понято как решение ряда последовательно актуализирующихся задач. Перечислим их в порядке снижения приоритета: 1) обеспечение безопасности; 2) достижение энергетического баланса (Kooijman, 2010): максимизация добычи лучшего корма, со снижением затрат на жизнедеятельность; 3) снижение информационной неопределенности среды, включая освоение территории, – большей, чем необходимо на данный момент. Приоритеты задач выявлены на основе наблюдений. Способы, которыми достигаются оптимальные сочетания решений этих задач, противоречивых при необходимости одновременного выполнения («стратегии выживания»), отличаются у животных разных видов, при различных уровнях антропогенной трансформации среды и в различных частях ареала.

Материал собран в 1993 – 2013 гг. в пойменных биотопах Средней Волги методом зимних троплений. Исследовали поведенческую экологию лесной куницы (*Martes martes*) и обыкновенной лисицы (*Vulpes vulpes*). Передвигаясь по среде на дистанцию Θ, равную 2 – 4 суточным ходам (ее предельная продолжительность определяется соматическими энергетическими запасами особи, погодными условиями и кормностью среды), особь избирательно воспринимает n объектов x^1, x^2, … x^n, генерируя при этом ответные реакции. Учитывали следующие показатели (Мозговой, 1982; Владимирова, 2012). 1. Число n и разнообразие l средовых объектов определенных классов x_q, в ходе восприятия которых особь проявила реакции (u_i, y_{i_h}); $x_q \in \{x_1, x_2, \ldots, x_l\}$, к примеру, x_1 – дерево (для куниц это защитный объект, используемый при опасности, локализованной на грунте), x_2 – куст (место нахождения кормовых объектов – полевок). 3. Число m и разнообразие j классов унитарных реакций $u_i \in \{U\}$, имеющих определенное приспособительное значение и проявленных при восприятии n объектов; $u_i \in \{u_1, u_2, \ldots, u_j\}$, к примеру, u_1 – локомоторная реакция, u_{18} – ориентировочная и др. 4. Число r – количество проявленных элементарных реакций y_{i_h}, входящих в состав одной реализованной унитарной реакций u_i. К примеру, u_{30} – охотничья реакция на птиц, y_{30_1} – остановка и настораживание, y_{30_2} – прыжок, y_{30_3} – поимка птицы, y_{30_4} – пробежка после неудачной попытки охоты на птицу. Число z – общее число элементарных реакций, произведенных особью при прохождении дистанции Θ, с восприятием n единиц средовых объектов и генерацией m единиц унитарных реакций.

В среде с характеристикой X опасные объекты распределены с частотой bn, а кормовые – с частотой cn. Объект x определенного класса q отбирается, согласно правилу $\Phi(g_w)$, из множества объектов разных классов, попадающих в поле восприятия особи, g_w – форма активности (кормовой поиск, переход к другому кормовому участку и др.) По ходу

восприятия объекта x_q особь реагирует: переходит из состояния u^1 в состояние u^2, продуцируя в каждом состоянии элементарные двигательные реакции. Один объект x_q может быть воспринят и отреагирован k раз, после чего особь переходит к восприятию другого объекта. Число z выступает показателем энергетических затрат и тревожности адаптирующейся особи.

Если a_1 – энергия, заключенная в среднестатистической единице кормового ресурса (к примеру, в одной полевке), α – доля поглощения особью энергии, содержащейся в единице кормового ресурса ($0 < \alpha < 1$), cn – число единиц кормового ресурса, которое особь добывает на дистанции Θ, a_2 – энергия, затраченная на производство элементарной реакции y_{i_h}, z – число элементарных реакций, произведенных особью на этой дистанции, то $E^{\Theta}_1 = cn\alpha a_1$, а $E^{\Theta}_2 = za_2$, где E^{Θ}_1 – добытая энергия, а E^{Θ}_2 – затраченная. Общее условие выживания, которое должно выполняться на дистанции Θ, будет иметь вид (1), а частное, – вид (2) или, при известных показателях *а)* кормности данной среды и *б)* навыков кормодобычи особи, – вид (3)

$$E^{\Theta}_2 < E^{\Theta}_1, \quad (1)$$

$$E(X) = E^{\Theta}_1(X) - E^{\Theta}_2(X) \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$E^{\Theta}_2(X) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $E(X)$ – энергетическая комфортность среды обитания, X – характеристика среды, выраженная через разнообразие и концентрацию средовых объектов определенных классов.

Для лесной куницы, эволюционно выработанные стратегии выживания связаны с успешностью добычи корма на наиболее кормных и безопасных участках территории. В антропогенной среде кормовой поиск ведется на ограниченной кормовой территории в условиях повышенного риска. С целью экологического мониторинга есть смысл исследовать условия, сочетающие снижение энергозатрат жизнедеятельности E^{Θ}_2, с одновременным повышением продуктивности кормодобычи E^{Θ}_1, а также снижением риска последствий взаимодействия особи с опасными объектами, то есть, максимизацией nr по r. Это достигается у куниц неоднократной ориентацией кормового поиска по одним и тем же тропам (min bn по b), локализованным вдоль кустов (max cn по c), произрастающих по лесолуговым экотонам, то есть вдоль границ древесной растительности (min ra_2 по r защитного компонента кормопоискового поведения), так как *M. martes,* при восприятии опасных объектов, уходят на близлежащие деревья с помощью стереотипных (инстинктивных) реакций, экономных на число двигательных элементов, содержащихся в одной u_i (min ra_2 по r защитной реакции u_4). В одной многофункциональной и стереотипной цепочке движений Δ объединяются защитные, кормовые и ориентировочные реакции (min m, min z_{Δ}). Тем самым достигается оптимальное сочетание решений противоречивых задач, сформулированных выше.

Автор выражает благодарность д. ф.-м. н. Д.О. Логофету (ИФА РАН) и д. т. н. В.А. Твердохлебову (ИПТМУ РАН), – за неоднократную помощь в разработке формального каталога параметров, учитываемых методом зимних троплений, и формализации причинно-следственных связей, наблюдаемых при этом.

Литература

Владимирова Э.Д. Этологическая формализация материалов зимних троплений // Современные проблемы природопользования, охотоведения и звероводства. Мат. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию ВНИИОЗ. Киров: ВНИИОЗ, 2012. С. 426-427.

Мозговой Д.П. Изучение биологических сигнальных полей млекопитающих методом тропления следов их жизнедеятельности // Коммуникативные механизмы регулирования популяционной структуры у млекопитающих / Ред. В.Е. Соколов. М: Изд-во ВТО АН СССР, 1988. Т. 2. С. 92–94.

Ashby W.R. An Introduction to Cybernetics. London: Chapman & Hall, 1956. 295 p.

Kooijman S.A.L.M. Dynamic Energy Budget theory for metabolic organisation. Cambridge Univ. Press, 2010. 424 p.

УСТАНОВКА КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ АДАПТИВНЫМИ СТРАТЕГИЯМИ ВЫЖИВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ХИЩНЫХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

Владимирова Э.Д.

Самарский аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия
elyna-well@nm.ru

Аннотация: лесная куница, по сравнению с лисицей, *а)* отбирает из потока внешней информации более однообразные сведения; *б)* в ситуации неопределенности проявляет только защитные реакции; *в)* в большей мере управляется видовыми стереотипами, чем индивидуальной памятью.

Принципы и параметры моделирования поведения лесной куницы (*Martes martes*) и обыкновенной лисицы (*Vulpes vulpes*), проведенного по материалам зимних троплений – те же, что и в сообщении 1. Задачи адаптивного поведения хищных млекопитающих, ведущих большую часть года одиночный образ жизни – это 1) обеспечение безопасности, 2) достижение баланса энергии, 3) снижение информационной неопределенности. Первая задача обладает приоритетом выполнения. Максимизация числа проявленных реакций, при взаимодействии с новыми объектами, – условие достижения оптимального решения первой и третей задач, максимизация числа воспринятых объектов – дополнительное условие оптимального решения третей задачи. Оптимальное сочетание способов решения всех этих трех задач (Swait, Marley, 2013) лимитировано энергетически и требует минимизации числа проявленных реакций при повышении избирательности взаимодействий. Задачи противоречивы (при одновременной постановке), что требует ситуативного управления.

Отличия в способах *а)* принятия перцептивных решений и *б)* выбора ответных реакций у куницы и лисицы определены возможностями памяти, коррелирующей с объемом головного мозга. Память о предыдущих состояниях среды и проявленном «ответном» поведении, а также периодически осуществляемый особью комплексный анализ информации, формируют у нее установку – состояние, предшествующее деятельности и задающее предрасположенность к определенным содержаниям восприятия и поведенческим «ответам» (Узнадзе, 2004). Формирование установки может быть рассмотрено как способ самоуправления выбираемыми объектами и генерируемыми реакциями. Разновидность установки обозначим d_μ (*directive* (анг.) – директива). Выбранная установка на общий способ взаимодействия особи со средой не изменяется за такт *t,* где *t* имеет смысл времени и принимает целочисленные значения. Пусть $d_\mu \in \{d_1, d_{2_1}, d_{2_2}\}$; d_1 – установка на взаимодействие, изолирующее особь от опасных объектов внешней среды, она сопровождается сужением восприятия и генерацией защитных реакций; $d_{2_}$ – установка на ассимилирующее взаимодействие, она сопровождается избирательным восприятием классов объектов по правилу $\Phi(g_w)$ и генерацией реакций, направленных на использование вещества, энергии и информации в соответствии с целью g_w. Пусть $d_{2_} \in \{d_{2_1}, d_{2_2}\}$, где d_{2_1} – установка на непосредственное потребление, т.е., на немедленное использование ресурсов среды, d_{2_2} – установка на информационное взаимодействие, т.е., на получение сведений о наличии в среде ресурсов, необходимых особи.

Выбор куницей той или иной установки осуществляется по следующему алгоритму. Установка d_1 выбирается: 1) в состоянии информационной неопределенности, то есть в ситуации, когда многие объекты внешней среды, воспринятые особью, принадлежат подмножеству классов объектов, не специфичных для восприятия лесными куницами X''; 2) при восприятии нескольких «сигналов опасности» – классов объектов, принадлежащих подмножеству X']. В противном случае выбирается установка d_{2_1}. Выбор установки d_{2_2} может быть осуществлен некоторыми немолодыми куницами, – позже, и в тех случаях, когда

поведение, реализуемое некоторое время в соответствии с установкой d_{2_1}, не дало результатов, соответствующих актуальной цели g_w. Формальная схема в виде конечного автомата A (Цетлин, 1963) может быть использована для моделирования процесса выбора куницей разновидности установки d_1 или d_{2_1}:

$$\varsigma(t+1) = A\,[\varsigma(t),\ I(t+1)], \quad (1)$$

$$\zeta(t) = Z\,[\varsigma(t)]. \quad (2)$$

Здесь ς (t) – состояния автомата, I – входная переменная (комплексно оцененная внешняя информация). I принимает два значения: 1 и 0. Ситуация $I = 1$ соответствует восприятию особью информации X'' или X'^1, при условии, что $X'' \approx X_t$ или $X'^1 \in X_t$, где X_t – множество объектов, воспринятых за такт t, $X'' \approx X_t$, что соответствует состоянию информационной неопределенности. Ситуация $I = 0$ соответствует восприятию особью информации типа $X'^2 \approx X_t$, где подмножество X'^2 образовано классами объектов видоспецифического умвельта *M. martes*. Выходная переменная $\zeta(t)$ может принимать v различных значений, $\zeta_1, \ldots \zeta_v$, v – емкость памяти автомата. В частном случае, рассмотренном для лесной куницы, выходная переменная автомата $\zeta(t)$ принимает два значения – d_1 и d_{2_1}.

Адаптивные стратегии хищных млекопитающих других видов, определяющие общий способ взаимодействия вида со средой обитания, характеризуются другими алгоритмами. Так, лисицы, в состоянии информационной неопределенности, формируют установку d_{2_2}, а не установку d_1. Формализация процесса выбора особью установки d_{2_1} или d_{2_2} возможна в виде двухблочной модельной конструкции с обратной связью, где результат активности, формализованной работой второго блока, влияет на начальное состояние первого блока. Поведение, соответствующее установке d_{2_1}, в большей мере характерно для животных, обитающих в центральной части видового ареала, при условии, что среда обитания трансформирована действием антропогенного фактора в незначительной степени. В среде, наполненной объектами, опасными для жизни, а также в среде, бедной необходимыми ресурсами, поведение всех видов млекопитающих чаще определяется установками d_1 и d_{2_2}. Успешность выживания какого-либо вида животных в антропогенных условиях под управлением установки зависит от способности определить оптимальную продолжительность такта t, что, в свою очередь, зависит от степени сложности высшей нервной деятельности. Экологический смысл установки заключается в экстраполяции комплексно оцененной информации. Это позволяет животным в ряде случаев отказаться от тотальной максимизации числа реакций, проявленных при восприятии неизвестных объектов (для минимизации риска) и повысить избирательность средовых взаимодействий – ситуационно минимизировать восприятие объектов определенных классов. Для лесной куницы свойственна генерализация защитной установки, что приводит к нарушению энергетического баланса особи, лисица же способна к адекватному выбору разновидности установки в соответствии с требованиями среды обитания. Тем самым достигается баланс решения противоречивых задач, сформулированных выше. В целом, в среде обитания, характеризующейся избытком нерегулярных факторов и повышенной динамикой условий, стратегии выживания, основанные на стереотипных ответах, – малоэффективны.

Литература

Узнадзе Д.Н. Общая психология. М.: Смысл, 2004. 417 с.

Цетлин М.Л. Конечные автоматы и моделирование простейших форм поведения // Успехи математических наук. 1963. Т. 18. Вып. 4 (112). С. 7.

Swait J., Marley A.A.F. Probabilistic choice (models) as a result of balancing multiple goals // J. of Math. Psychology, 2013. V. 57. P. 1 – 14.

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СУКЦЕССИИ ПОЧВЕННЫХ МИКРОБНЫХ СООБЩЕСТВ

Воробьев Н.И. [1], Семенов А.М.[2], Бубнов И.А.[2], Свиридова О.В. [1]

[1]*ГНУ ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии Россельхозакадемии, Санкт-Петербург, Российская Федерация*
vorobyov@arriam.spb.ru.
[2]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация*
amsemenov@list.ru

Аннотация: построен фрактально-таксономический портрет и математическая модель биосети почвенного микробного сообщества. По молекулярно-генетическим данным определена фрактальная плотность микробной биосети. Проведенные исследования показали, что периодическая сукцессия микроорганизмов в почве связана с запланированной перестройкой биосетей в микробных сообществах.

Введение

Почвенные микробные сообщества находятся в постоянном поиске новых форм межорганизменных взаимодействий, стремясь к высокоэффективному использованию поступающих в почву субстратов для собственных потребностей, потребностей растений и без нарушения экологического равновесия в природе (Проворов, 2012). При этом совершенствованию подвергаются те взаимодействия, от точной настройки которых зависит скорость и согласованность инициируемых биохимических процессов. Найденные со временем наилучшие адаптационные программы закрепились в метагеноме микробного сообщества в виде адаптационных планов (А-планов). В А-планы были включены команды, активизирующие ферментативную деятельность микроорганизмов, а также команды, объединяющие микроорганизмы в биосети, необходимые для реализации заданной последовательности синтеза ферментов. В сложной субстратно-экологической обстановке, когда в почве меняется качественный и количественный состав субстратов, А-планы запускают необходимые изменения в конфигурации и микробиологическом составе биосетей.

Биосети отличаются от метаболических цепей более высокой степенью организации и сбалансированным распределением всех подфункций между объединенными микробными генотипами. В биосетях каждый генотип с максимальной эффективностью и высокой скоростью продуцирует необходимые ферменты и гармонично встраивается в общую схему преобразований. В настоящее время, с развитием молекулярно-генетических методов анализа почвенных микробных сообществ, представилась реальная возможность детального изучения частотно-таксономического состава и конфигурации микробных биосетей. При этом, ключевую роль в расшифровке этих данных и получении необходимой информации о биосетях играют математические модели, описывающие организационные формы почвенных микробных сообществ.

Задачей данного исследования является разработка математической модели микробной биосети, определение ее параметров по частотно-таксономическим данным микроорганизмов и оценка с помощью модели уровня функциональной организации почвенных микробных сообществ.

Математическая модель микробной биосети

При математическом моделировании микробных биосетей использовался фрактально-таксономический портрет микробного сообщества, который представляет частотно-таксономические данные микроорганизмов в виде массива точек на координатной

плоскости. При этом для каждого *i*-того микробного генотипа координаты соответствующей точки $\{X_i, Y_i\}$ вычислялись по следующим формулам:

$$\begin{cases} Y_i = (I_{MAX} - I_i) : (I_{MAX} - I_{MIN}) \\ X_i = (F_{MAX} - F_i) : (F_{MAX} - F_{MIN}) \end{cases},$$ где $I_i = Int\left[10 \cdot Bene^{-1}\left(1/\sqrt{p_i}\right)\right]$ – целая величина; $F_i = \left[10 \cdot Bene^{-1}\left(1/\sqrt{p_i}\right)\right] - I_i$ – дробная величина; I_{MIN}, I_{MAX} и F_{MIN}, F_{MAX} – минимальные и максимальные значения соответствующих величин; $\frac{1}{\sqrt{p_i}} = Bene(Z_i) = \left(\varphi^{Z_i} - \frac{Cos(\pi \cdot Z_i)}{\varphi^{Z_i}}\right) : \sqrt{5}$, $\varphi = \left(1+\sqrt{5}\right)/2$ – формула Бинэ для фрактального ряда чисел Фибоначчи (Воробьев, 1969).

Фрактально-таксономический портрет микробного сообщества позволяет выделить характерные тройки генотипов (фрактальные триплеты), отличающиеся особым расположением точек генотипов на одной прямой. Причем две крайние точки триплета одинаково удалены от центральной точки. Из этого следует, что частоты генотипов во фрактальном триплете связаны следующими равенствами:

$$10 \cdot Bene^{-1}\left(1/\sqrt{p_1}\right) = 10 \cdot Bene^{-1}\left(1/\sqrt{p_2}\right) + \mathrm{d} = 10 \cdot Bene^{-1}\left(1/\sqrt{p_3}\right) + 2 \cdot \mathrm{d} + \sigma,$$

где p_i – частота встречаемости *i*-того генотипа в составе триплета (i = 1, 2, 3); d – величина фрактального шага; σ – погрешность измерения частотных данных микробных генотипов. Фрактальное соотношение частот генотипов в триплете является отражением фрактальной структуры полимерных молекул и фрактальной схемы биохимических процессов при их преобразованиях (Долгоносов, 2007). В результате, математическая модель биосети строится как соединение всех выявленных фрактальных триплетов в микробном сообществе.

Очевидно, что с увеличением σ число выявленных триплетов в микробных сообществах должно расти. Поэтому для сравнения микробных сообществ по уровню организации была выбрана более стабильная характеристика – это фрактальная плотность биосети, которая вычислялась по следующей формуле (Кронвер, 2000): $ln(T_k) = C_M + f_M \cdot ln(k)$, где $k = \sigma_k / \sigma_0 = (1; 2)$ – двузначная переменная; C_M, –постоянная величина; f_M – искомая фрактальная плотность биосети; T_k – число выявленных фрактальных триплетов в микробном сообществе при σ_k. При вычислении фрактальной плотности биосети использовалось условие: равенство количеств фрактальных триплетов и микробных генотипов, образующих эти фрактальные триплеты при σ_0.

Заключение

Исследование суточной сукцессии почвенных микробных сообществ с помощью разработанной математической модели показало, что фрактальная плотность биосетей имеет бигармонический колебательный характер. Вероятно, высокочастотная составляющая этих колебаний связана с мобильной перестройкой r-стратегов, а низкочастотная – со стратегической перестройкой K-стратегов в почвенных микробных сообществах (Звягинцев, 1981).

Литература

Воробьев Н.Н. Числа Фибоначчи. М., 1969. 112 с.

Долгоносов Б. М., Губернаторова Т. Н. Кинетика ферментативной деструкции органических макромолекул с фрактальной структурой // Теоретические основы химической технологии. 2007. № 6. С. 671-680.

Звягинцев Д.Г., Кожевин П.А., Кочкина Г.А., Полянская Л.М. Микробная сукцессия в почве и определение экологических стратегий конкретных популяций//Микробиология, 1981. Т. 50. №2. С. 353-359.

Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М., 2000. 352 с.

Проворов Н.А., Воробьев Н.И. Генетические основы эволюции растительно-микробного симбиоза. СПб., 2012. 400 с.

ПРИБЛИЖЕННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И ВЛАГИ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ С УЧЕТОМ БАЛАНСА ЭНЕРГИИ

Воротынцев А.В.

Учреждение Российской академии наук Вычислительный Центр им. А.А. Дородницына РАН, Москва, Россия
avv_alexv@mail.ru

Аннотация: Для задачи связанного переноса тепла и влаги в растительном покрове и почве с учетом баланса энергии формулируется сравнительно простая модель в алгебраических выражениях для потоков тепла и влаги, дефицита влажности воздуха как линейная комбинация этих величин для испарения со свободной поверхности воды и для испарения с поверхности почвы, лишенной растительности.

Перенос тепла и влаги в растительном покрове $H_l \ge x \ge 0$ и корнеобитаемом слое почвы $0 \ge x \ge -H_s$ описывается 4 сопряженными дифференциально-алгебраическими системами с граничными условиями на верхней границе $x = H_l$ растительного покрова, на поверхности $x = 0$ и нижней границе $x = -H_s$ почвы, (Воротынцев, 2012). Для хорошо вентилируемого растительного покрова получены упрощенные выражения для дефицита влажности воздуха d_a, потоков влаги J_{qa} и тепла J_{Ta} на верхней границе покрова и потоков J_{q0} и J_{T0} на поверхности почвы, а также транспирации J_{ql} и потока тепла, исходящих от растений J_{Tl} :

$$d_a = \chi^{-1} G \frac{R_a^0 - b_l R_l - b_s R_s}{D'_\Sigma} + \frac{D'_a d_a^0 + D'_s d_s}{D'_\Sigma}\ ,\ b_l = G^{-1} D'_l / D'_T\ ,\ \ b_s = G^{-1} D'_s / D'_{Ts}\ ; \quad (1)$$

$$J_{qa} = \chi^{-1} G R_a^0 + D'_a \left(d_a^0 - d_a\right), \qquad J_{Ta} = (1-G) R_a^0 - \chi D'_a \left(d_a^0 - d_a\right); \quad (2)$$

$$J_{ql} = \chi^{-1} D'_l \left(R_l / D'_T + \chi d_a\right), \qquad J_{Tl} = D'_l \left(R_l / D'_q - \chi d_a\right); \quad (3)$$

$$J_{q0} = \chi^{-1} D'_s \left(R_s / D_{Ts} + \chi\left(d_a - d_s\right)\right),\ J_{T0} = D'_s \left(R_s / D_{qs} - \chi\left(d_a - d_s\right)\right), \quad (4)$$

где R_a^0, R_s - радиационный баланс на границе H_l и поверхности почвы, R_l - радиация, поглощенная покровом, d_a^0 и d_s - дефициты влажности воздуха при $x = H_l$ и $x = 0$. Транспирация J_{ql} покрова складывается из потоков влаги, испаряемой листьями через устьичные щели. Проводимость D'_l устьичных щелей листьев, существенно зависит от их водного потенциала и в модели (1)-(4) является переменной. Остальные величины считаются положительными константами, $D'_\Sigma = D'_a + D'_l + D'_s$.

Приближение (1)-(4) получено для условия $A\,\overline{D}_\Sigma / D'_{Hk} << 1$, (Воротынцев, 2012), которое соответствует хорошо вентилируемому покрову при большом коэффициенте проводимости турбулентного обмена. Получим дальнейшие упрощения (1)-(4) для следующих условий, которые выполняются, когда проводимости D'_T, D'_{Ts} для потоков тепла значительно больше проводимостей D'_l, D'_s для потоков влаги на границах лист-воздух и почвы-воздух:

$$D'_l / D'_T << 1\ ,\ D'_s / D'_{Ts} << 1\ ,\ A\,\overline{D}_\Sigma / D'_{Hk} << 1; \quad (5)$$

$$D'_\Sigma / D'_T << 1\ ,\ D'_\Sigma / D'_{Ts} << 1\ ,\ A\,\overline{D}_\Sigma / D'_{Hk} << 1. \quad (6)$$

Введем обозначения

$$\beta = \left(D'_a + D'_s\right) / D'_l\ ,\ b = D'_s / \left(D'_a + D'_s\right); \quad (7)$$

$$d_t = \left(\chi^{-1} G R_a^0 + D'_a d_a^0 + D'_s d_s\right) \Big/ \left(D'_a + D'_s\right) ; \tag{8}$$

$$J_{qa}^- = b J_{qa}^+ , \qquad J_{qa}^+ = \chi^{-1} G R_a^0 + D'_a d_a^0 ; \tag{9}$$

$$J_{Ta}^+ = b J_{Ta}^- + (1-b) R_a^0 , \qquad J_{Ta}^- = (1-G) R_a^0 - \chi D'_a d_a^0 ; \tag{10}$$

$$d_a^+ = d_t , \qquad d_a^- = 0 ; \tag{11}$$

$$q_a^- = q_a^0 + J_{qa}^- \big/ D_a , \qquad q_a^+ = q_a^0 + b^{-1}\left(q_a^- - q_a^0\right) ; \tag{12}$$

$$T_a^- = T_a^0 + J_{Ta}^- \big/ \left(c_p D_a\right) , \qquad T_a^+ = T_a^0 + b\left(T_a^- - T_a^0\right) + (1-b) R_a^0 \big/ \left(c_p D_a\right) . \tag{13}$$

Теорема 1. При $D'_l / D'_T << 1$, $D'_s / D'_{Ts} << 1$, $d_s \to 0$, *справедливы равенства*

$$y_q = \frac{y_q^+ + \beta y_q^-}{1+\beta} , \qquad y_T = \frac{y_T^- + \beta y_T^+}{1+\beta} , \tag{14}$$

где через y_q^σ *и* y_T^σ, $\sigma \in$ *{пусто, +, -} обозначены переменные из множеств* $y_q^\sigma \in \left\{J_{qa}^\sigma , q_a^\sigma\right\}$ и $y_T^\sigma \in \left\{J_{Ta}^\sigma , d_a^\sigma , T_a^\sigma\right\}$. *При этом* $J_{Ta}^+ + \chi J_{qa}^- = R_a^0$, $J_{Ta}^- + \chi J_{qa}^+ = R_a^0$, и *для каждого* β

$$J_{Ta} + \chi J_{qa} = R_a^0 . \tag{15}$$

Теорема 2. При $D'_\Sigma / D'_T << 1$, $D'_\Sigma / D'_{Ts} << 1$ *дополнительно к (14)-(15) справедливы соотношения*

$$J_{ql} = J_{qa}^+ \big/ (1+\beta) , \; J_{Tl} = R_l - \chi J_{ql} ; \quad J_{q0} = \beta b J_{qa}^+ \big/ (1+\beta) , \; J_{T0} = R_s - \chi J_{q0} . \tag{16}$$

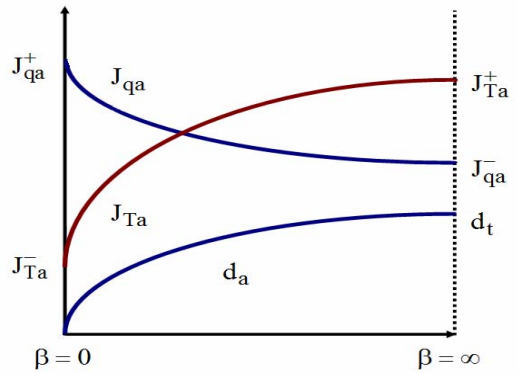


Рисунок 1

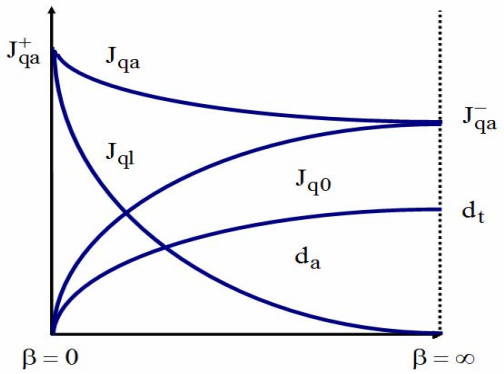


Рисунок 2

Выражения (8)-(16) полезны тем, что в параметре β аккумулируются все параметры растений, влияющие на тепло- и влагоперенос в покрове, включая водный потенциал листьев, площади активных поверхностей листьев и корней. Зависимости (14) от β представлены на рис. 1, а зависимости (16) – на рис. 2. Можно показать, что зависимости в левой части (8)-(13) отвечают испарению с поверхности почвы, лишенной растительности ($\beta \to \infty$), а соотношения в правой части (8)-(13) – испарению со свободной поверхности воды ($\beta \to 0$). Таким образом, зависимости (14) для растительного покрова представляют линейную комбинацию этих двух крайних ситуаций. Выражения (14) позволяют также сформулировать легко измеряемые критерии выполнения условий (5)-(6) в виде

$$\left(y_q^+ - y_q\right) \big/ \left(y_q - y_q^-\right) = \beta , \quad \left(y_T^+ - y_T\right) \big/ \left(y_T - y_T^-\right) = \beta^{-1} .$$

Литература

Воротынцев А.В. Исследование модели переноса тепла и влаги в системе почва-растение // Математическая биология и биоинформатика. Спецвыпуск по итогам конференции ЭкоМатМод-2011. – 2012. - Т. 7, № 1. - С. 45-53.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ ТАЕЖНОГО КЛЕЩА

Вшивкова О.А.

ФГБУН Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, Россия
oavshivkova@mail.ru

Аннотация: В работе проведен статистический анализ динамики численности популяций таежного клеща (*Ixodes persulcatus*) и его прокормителей.

Описание и интенсивное изучение популяций таежного клеща (*Ixodes persulcatus*) началось в начале XX века. Это связано с установлением их роли как переносчиков возбудителей многих природно-очаговых заболеваний человека и животных.

Полученные по динамике популяции клеща данные используются для решения ряда практических задач, связанных с профилактикой природноочаговых заболеваний, разработкой методов снижения численности клещей в экосистемах.

Во всех перечисленных направлениях были достигнуты значительные успехи, за исключением вопросов исследования популяционной динамики таежного клеща, поскольку ряды натурных измерений численности клеща и его прокормителей на большинстве исследуемых территорий для анализа недостаточно длинны. Успешное решение многих практических задач профилактики клещевого энцефалита и совершенствования эпидемиологического прогноза зависит от степени развития теоретических методов описания динамики популяций клеща.

В некоторых работах проведена качественная статическая обработка данных по численности клеща, предпринимаются попытки прогнозирования динамики численности, тем не менее, мы все еще практически ничего не знаем о характере динамики популяции клеща. Нет ответов на такие важные вопросы, как: существует ли устойчивое значение плотности популяции клеща, и какие факторы могут на него воздействовать, существует ли периодические колебания плотности популяции клеща относительно некоторого устойчивого значения, к какому типу популяционной динамики можно отнести популяции клеща.

В предлагаемой работе проведен последовательный анализ динамики численности популяций таежного клеща. Для анализа характера динамики были использованы временные ряды численностей популяций клеща, обитающих в Красноярском крае (длина ряда 45 лет) и Новосибирской области (длина ряда 20 лет). Для популяции клеща характерен нестабильный тип динамики численности, при этом колебания нельзя считать симметричными. Для симметризации колебаний был проведен анализ рядов логарифмических плотностей популяций таежного клеща. Для этого была введена новая характеризующая плотность популяции переменная, равная логарифму плотности популяции $Q = \ln X$. Для описания колебаний ввели нормированную величину $z(i) = Q(i) - \overline{Q}$. В динамике численности клеща можно выделить линейную и колебательную составляющие. Положительный линейный тренд характерен как для популяции клещей Красноярского края так и для популяции клещей Новосибирской области. Это свидетельствует о том, что в настоящее время популяции клеща все еще «осваивают» эти территории.

Для анализа циклических колебаний были вычислены автокорреляционные функции для многолетних рядов динамики численности таежного клеща в Красноярском крае и г. Новосибирске.

Проведенный корреляционный анализ влияния численности прокормителей на динамику численности популяций таежного клеща показал, что временные ряды численностей клеща и прокормителей коррелируют. При этом ряд данных по численности

клеща «запаздывает» на год, это позволяет говорить о том, что основной вклад в динамику численности таежного клеща прокормители вносят на стадии нимфы.

АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ДИНАМИКИ ИКСОДОВОГО КЛЕЩА

Вшивкова О.А. [1], Комаров А.С.[2], Фролов П.В.[2]

[1] *ФГБУН Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, Россия*
oavshivkova@mail.ru
[2] *ФГБУН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*
as_komarov@rambler.ru

Аннотация: Работа посвящена построению, описанию и исследованию имитационной клеточно-автоматной модели динамики численности популяций иксодового клеща в экосистемах.

В данной работе предлагается имитационная модель динамики популяции иксодового клеща, построенная на основе клеточно-автоматного подхода.

Разработанная программа моделирования процесса оформлена в информационно-вычислительную систему, позволяющую численно анализировать влияние различных природных и антропогенных факторов на численные характеристики популяций иксодового клеща.

Построенная модель включает следующие условия развития популяции клеща:

- Число клеток по горизонтали;
- Число клеток по вертикали;
- Продолжительность жизни;
- Исходное количество клещей;
- Репродуктивный возраст;
- Возраст клеща после размножения;
- Количество откладываемых яиц;
- Вероятность гибели клеща;
- Вероятность заселения по всему полю;
- Вероятность того, что самка отложит яйца;
- Вероятность перехода яйцо-личинка;
- Вероятность перехода личинка-нимфа;
- Вероятность перехода нимфа-имаго;
- Вероятность перемещения личинок и нимф;
- Вероятность перемещения имаго.

Для простоты анализа динамики в модели рассматривали два типа территорий: а) однородные по благоприятным условиям – территории, где популяция клеща может успешно существовать; б) неоднородные по условиям – территории, на которых встречаются участки, где тот или иной фактор делает невозможным существование популяции клеща. В реальных экосистемах расположение таких участков носит случайный характер.

Анализ поведения модельной популяции проводили при «наихудшем» (для человека) сценарии развития (представляет особую опасность для населения). Для этого в процессе моделирования были подобраны параметры, при которых численности популяции иксодового клеща были максимальны.

Для простоты анализа динамики в модели рассматривали два типа территорий: а) однородные по благоприятным условиям – территории, где популяция клеща может успешно развиваться; б) неоднородные по условиям – территории, на которых встречаются участки, где тот или иной фактор делает невозможным существование популяции клеща на таком участке. В реальных экосистемах расположение таких участков носит случайный характер.

Перемещение имаго иксодовых клещей крупными млекопитающими имеет большое значение в динамике численности популяций клеща. Особенно велика его роль при распространении клеща на незанятые территории. С использованием автоматной модели проведен анализ зависимости численности популяции от вероятности перемещения имаго. Получено, что при увеличении вероятности перемещения имаго скорость роста и средняя численность популяции уменьшаются как для однородных по условиям территорий, так и для неоднородных. Однако в случае неоднородных по условиям существования клеща территорий эти изменения носят более выраженный характер, а в случае, когда вероятность перемещения = 0,9, на неоднородной по условиям территории популяция клеща элиминируется, начиная 64 шага моделирования.

Построенная модель позволила провести анализ зависимости численности популяции от вероятности случайной гибели клеща. При увеличении вероятности случайной гибели скорость роста и средняя численность популяции уменьшаются как для однородных по условиям территорий, так и для неоднородных. Однако в случае неоднородных по условиям существования клеща территорий эти изменения носят более выраженный характер, так в случае, когда вероятность случайной гибели равна 0,2, популяция клеща вымирает, начиная с 25 шага моделирования.

Также была проведена оценка скорости распространения популяции иксодового клеща на однородной и неоднородной по условиям его существования территории. Построенная клеточно-автоматная модель позволяет ответить на вопрос: за какое время на неоднородной по условиям существования клеща территории, на которую так или иначе были занесены отдельные особи иксодового клеща, его популяция будет элиминирована. В экспериментах менялась доля территории с неблагоприятными условиями существования. Можно видеть, что при сокращении территории с оптимальными условиями развития популяции иксодового клеща более чем на 60%, элиминация клеща происходит уже на первых 5 – 7 шагах моделирования.

В реальных экосистемах сокращение доли доступной для иксодового клеща площади, возможно достигать посредством изменения одного из необходимых параметров его существования на этой площади, например, уменьшить число мелких или крупных прокормителей, убрать подстилку и др.

МОДЕЛЬ ОПОСРЕДОВАННОГО ВЛИЯНИЯ МУРАВЬЕВ НА ДИНАМИКУ ПОПУЛЯЦИЙ ИКСОДОВОГО КЛЕЩА

Вшивкова О.А. [1], Хлебопрос Р.Г.[1,2,3]

[1]*ФГБУН Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, Россия*
[2]*ФГБУН Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*
[3]*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*
oavshivkova@mail.ru

Аннотация: В работе приведена качественная модель, описывающая опосредованное влияние муравьев на динамику численности популяции иксодовых клещей через прокормителей клеща на ранних стадиях метаморфоза.

Во многих работах отмечается активное влияние муравьев на растительный покров, на численность и видовой состав беспозвоночных вблизи муравейников. Большинство исследований долгое время было направлено на выявление связей между муравьями и их конкурентами, их жертвами, их хищниками. Практически не уделялось внимания исследованию сосуществования популяций муравьев и популяций мелких млекопитающих, птиц, ведущих приземный образ жизни, – основных прокормителей иксодового клеща. Работы, подтверждающие существование в природе опосредованного влияния популяций рыжих лесных муравьев на динамику численности иксодовых клещей (экспериментальные и натурные исследования) появились сравнительно недавно (Быкова И.В., Резникова Ж.И., 2009; Быкова И.В. и др, 2009). Ж.И. Резниковой и ее учениками найдена новая, на редкость удачная методика эксперимента, когда вместо того, чтобы следить за поведенческими реакциями особей мелких млекопитающих, рассматривается фиксированный во времени результат этого взаимодействия. А именно на территориях вблизи и вдали от муравейников исследуется количество нор мелких млекопитающих. Проведенные работы свидетельствуют о том, что роющая активность грызунов, отражающая их относительную численность, на территориях, заселенных муравьями, существенно ниже, чем на контрольных участках, где муравейники отсутствуют. При этом на участках, не занятых муравьями, норы грызунов распределены относительно равномерно, а на территориях с муравейниками встречаются в основном отрезки ходов грызунов, видные на поверхности почвы; немногочисленные норы появляются на расстоянии более 10 м от муравейников. При построении качественной модели именно этот феномен и был взят в качестве важного аргумента в пользу наличия опосредованного воздействия муравьев на популяции иксодового клеща в реальных экосистемах.

Математическую модель опосредованного воздействия популяций муравьев на плотность популяции иксодового клеща строили в виде разностных уравнений, основываясь на имеющейся модели взаимодействия популяций иксодовых клещей и мелких млекопитающих (Вшивкова О.А. и др., 2009). В модель вошли следующие параметры: N - количество яиц в кладке одной самки клеща; η_1 - вероятность кладки яиц самкой в подстилку; η_2 -вероятность превращения яйца в личинку; η_3 – вероятность перехода «личинка–нимфа»; $\eta_i(n)$ – вероятность перехода «нимфа–имаго», где i, в зависимости от экологических условий местности, равно 4 или 5; γ – доля самок в популяции клеща; n – плотность популяции мелких млекопитающих; m – плотность популяции муравьев; $y_1, y_2, ..., y_v$ - абиотические факторы в экосистеме.

Наличие и отсутствие иксодового клеща в экосистеме определяется значением мальтузианского параметра популяции. Для реально существующих популяций характерно

значение мальтузианского параметра $æ > 1$; в случае, когда для популяции характерно значение мальтузианского параметра $æ < 1$ - такая популяция вымирает.

$$æ = \varphi(n, y_1, y_2, ..., y_v). \quad (1)$$

При заданных значениях y_v и n (1) можно записать в виде (2):

$$æ = æ(n) = N\gamma\eta_1\eta_2\ldots\eta_i. \quad (2)$$

Зависимость $\eta_i(n)$ можно записать в виде системы уравнений (3):

$$\frac{d\eta_i}{dn} = \alpha_i\eta_i - \beta_i\eta_i^2 \text{ , где } \beta_i \geq \alpha_i. \quad (3)$$

Решения системы будет представимо в виде (4):

$$\eta_i(n) = \frac{1}{\beta_i}\eta_{i0}e^{\alpha_i n} \Big/ \left(\frac{1}{\beta_i} + \eta_{i0}(e^{\alpha_i n} - 1)\right). \quad (4)$$

Увеличивая численность муравьев в экосистеме, можно снижать значение мальтузианского параметра размножения иксодовых клещей. Зависимость плотности популяции мелких млекопитающих от плотности популяции муравьев описали в виде уравнения (5), решение которого графически представимо в виде монотонно убывающей кривой.

$$n = A/(1 + B \cdot m), \quad (5)$$

где А плотность мелких млекопитающих при $m = 0$ и В – численный параметр.

Тогда мальтузианский параметр размножения клеща в условиях опосредованного влияния муравьев – $æ'$ (6), при этом $æ' \leq æ$.

$$æ' = æ(n(m)) = N\gamma\eta_1'\eta_2'\eta_3'\eta_i'. \quad (6)$$

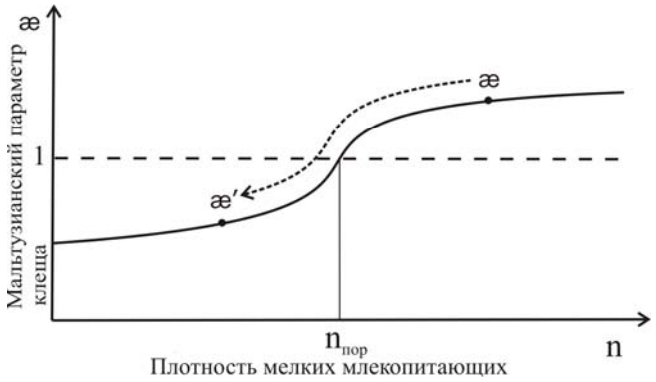


Рисунок 1 – Опосредованное влияние популяций муравьев на мальтузианский параметр размножения иксодовых клещей

Как следует из рисунка 1, при опосредованном (через прокормителей) воздействии муравьев плотность популяции прокормителей уменьшается, а значение мальтузианского параметра размножения иксодовых клещей переходит по кривой из точки $æ$ в точку $æ'$.

Литература

Быкова И.В., Резникова Ж.И. Предварительные данные об опосредованном влиянии рыжих лесных муравьев на численность таежного клеща // Материалы XIII Всероссийского мирмекологического симпозиума «Муравьи и защита леса». – Нижний Новгород, 2009. – С. 47–48.

Быкова И.В., Яковлев И.К., Дорошева Е.А., Выгоняйлова О.Б. Предварительные данные о влиянии рыжих лесных муравьев на численность и пространственное распределение мелких грызунов // Материалы XIII Всероссийского мирмекологического симпозиума «Муравьи и защита леса». – Нижний Новгород, 2009. – С. 49–50.

Вшивкова О.А., Круглик О.В., Моргулис И.И., Новиков В.Н., Хлебопрос Р.Г. Контроль численности популяции иксодового клеща в экосистеме // Инженерная экология. – 2009. – №4. – С. 55–62.

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ В МОДЕЛИРОВАНИИ РОСТА ДРЕВОСТОЕВ: ФЕНОМЕНОЛОГИЯ "УГЛЕРОДНОГО" ЛЕСА

Гавриков В.Л. [1], Хлебопрос Р.Г.[2]

[1]*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*
vgavrikov@mail.sfu-kras.ru
[2]*Сибирский федеральный университет, МНЦИЭСО КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия*
olikru@yandex.ru

Аннотация: Рассматриваются подходы к моделированию ценности леса как носителя традиционных коммерческих ценностей и ценности, связанной с выполнением экологических функций.

Термин «углеродный» лес появился в ходе научных дискуссий о путях противодействия угрозам нарушения глобальных циклов (Проблема…, 2006, см. выступление академика А.С. Исаева). Создание «углеродного» леса и управление им означает особый вид хозяйствования в природопользовании, в котором одной из главных, хотя и не единственной целью является эффективное связывание избытка углекислоты, попадающей в атмосферу в результате промышленной деятельности.

Существуют перспективы того, что на национальном уровне могут возникнуть свои внутристрановые рынки квот на выброс CO_2. Потенциал секвестра CO_2 различными экосистемами является актуальной темой исследований (Нильссон с соавт., 2003).

В работе изучается возможность применения моделирования, используемого в экономических исследованиях, к описанию функционирования «углеродного» леса как объекта эколого-экономической системы. С некоторой точки зрения, лесной объект, функционирующий по биолого-экологическим законам, можно рассматривать как «предприятие». Это «предприятие», с одной стороны, выпускает специфическую продукцию (поглощает CO_2), а с другой – обладает основным капиталом (биомассой). Особенность леса с этой точки зрения состоит в том, что капитал и продукция относятся друг к другу, как переменная (X) и ее производная по времени ($\dot{X}$).

«Углеродный» лесной объект выполняет биосферную работу и обладает традиционной коммерческой значимостью как источник древесины. Стоимость такого леса-«предприятия» может быть представлена некоторой функцией стоимости $F = F(\dot{X}, X)$.

Вид F в общем случае неизвестен, однако можно привлечь ряд экономических положений, которые позволят выдвинуть гипотезы о ее форме. В традиционном финансовом анализе разработано несколько способов оценки стоимости предприятия, из которых доходный подход и затратный подход наиболее применимы в случае «углеродного» леса. Доходный подход говорит о том, что стоимость предприятия $V = P/R$, где P – чистый доход за год, а R – коэффициент капитализации. Коэффициент капитализации традиционно определяется как $R = D/(D + K)$, где D – долгосрочные обязательства, а K – собственный капитал. В случае лесного объекта разумно считать, что $K >> D$, тогда $R \to 1/K$ и $V \approx D \bullet K$. Таким образом, доходный подход приводит к мультипликативной форме функции $F(\dot{X}, X) = \varepsilon \cdot \dot{X} \cdot X$. Затратный подход представляет стоимость предприятия как стоимость суммы активов за вычетом стоимости обязательств. В применении к лесу понятие обязательств отсутствует, а активы представляют доход от поглощения CO_2 и стоимость запасов древесины. Следовательно, из затратного подхода следует аддитивная форма функции F, которая может быть представлена как $F(\dot{X}, X) = \alpha_1 \dot{X} + \alpha_2 X$. Привлечение конкретного вида функции роста $X(t)$ позволяет исследовать динамику функции F и найти точку ее максимума.

Литература

Нильссон С., Ваганов Е. А., Швиденко А. З., Столбовой В., Рожков В. А., МакКаллум И., Йонас М. Углеродный бюджет растительных экосистем России // ДАН. – 2003. – т. 393, №4. – С.541-543.

Проблема общенаучного звучания. Обсуждение доклада. // Вестник Российской Академии Наук. – 2006. т. 76. № 1. – С.25-29.

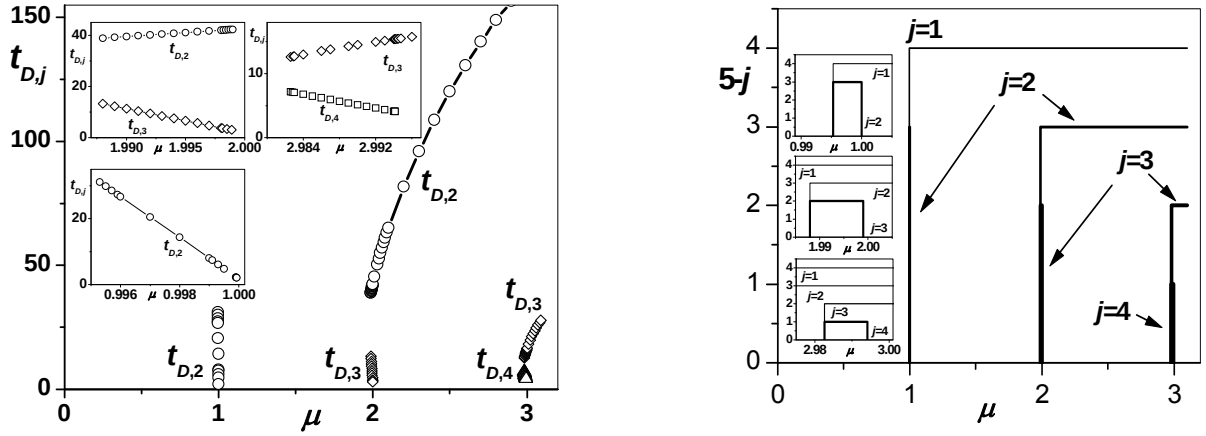
ОБ ЭВОЛЮЦИИ ФОРМЫ ДЕРЕВА ПО ФРАКТАЛЬНОМУ ПАРАМЕТРУ

Галицкий В.В.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, РФ
galvv@rambler.ru

Аннотация: Обсуждаются некоторые модельные особенности эволюции по аллометрическому (фрактальному) параметру представленной ранее секционной модели регулярной системы ветвей дерева. Результаты могут оказаться полезными при обсуждении и интерпретации эволюции растительных таксонов.

В работе (Галицкий, 2012) секционная модель дерева (Галицкий, 2010) была распространена на систему ветвей дерева, несущих зеленую биомассу секций. Приложение этой модели к натурным данным (Цельникер, 1994) для времен жизни ветвей разных порядков ели обыкновенной показало, что в этом случае модель системы *регулярных* ветвей четырех порядков, необходимо дополнить особенностями роста ели. Здесь представлено поведение модели системы регулярных ветвей дерева (число имеющихся порядков ветвей и изменение их времен жизни) при варьировании аллометрического параметра μ ($B \sim H^{\mu}$, B – зеленая биомасса дерева, H - высота) и обсуждаются возможные аналогии с некоторыми известными фактами, связанными с происхождением и эволюцией формы растений (и деревьев в том числе).



a *b*

Рисунок 1 - a) Зависимости модельных длительностей жизни tD,j регулярных j-ветвей дерева от параметра μ; b) Наличие ветвей j-порядка в интервале μ. На врезках в крупном масштабе “эфемерные” интервалы наличия j-ветвей вблизи целых значений μ.

На рисунке. 1*a* приведены зависимости продолжительностей жизни $t_{D,j}$ от μ для регулярных ветвей всех порядков (для ели $1 \le j \le 4$) в диапазоне $0 \le \mu \le 3$ при значениях остальных параметров модели $A_1 = 102.69$ и $r = 1.1243$, исходно найденных для полной модели ели обыкновенной (Галицкий, 2012). Ветвь порядка 1 появляется при $\mu \approx 0.9952$, не отмирает за модельное время ($T \le 360$) и не отображена на рисунке. Рисунок 1*a* демонстрирует интересные особенности модели системы регулярных ветвей дерева. В интервале значений μ [0, 0.9952) отсутствуют ветви любых порядков, что может означать непосредственное размещение биомассы на стволе дерева. Ветвь 1-го порядка имеется при всех $\mu \ge\approx 0.9952$. При $\mu \ge 0.9952$ и до $\mu \approx 1.0$ имеются ветви также 2-го порядка, причем при $\mu \to \approx 1.0$ длительность жизни ветви 2-го порядка постепенно уменьшается и ветвь исчезает. В интервале μ [≈1.0, ≈1.9876) имеется только ветвь 1-го порядка, а в интервале [≈1.9876, ≈

1.998] имеются ветви также 2-го и 3-го порядков. Ветвь 3-го порядка при $\mu \rightarrow \approx 1.998$ постепенно исчезает. Далее до $\mu \approx 2.9825$ имеются ветви только 1-го и 2-го порядков. В интервале [2.9825, 2.9941] имеются ветви также 3-го и 4-го порядков, причем при $\mu \rightarrow \approx 2.9941$ ветвь 4-го порядка исчезает. На рисунке 1*b* показаны интервалы существования ветвей 1 - 4-го порядков (j = 1, 2, 3, 4) и на врезках - в крупном масштабе их "эфемерные" версии вблизи целых значений параметра μ. При других наборах параметров A_1 и r регулярной модели эти зависимости могут несколько меняться, например, отсутствовать ветвь 4-го порядка, но характер зависимостей сохраняется. При дополнении модели регулярных ветвей субмоделями начального торможения роста и межмутовочных ветвей (Галицкий, 2012) "эфемерные" интервалы отсутствуют и ветви всех порядков появляются при значительно меньших значениях μ, а при $\mu > 2.0$ появляется и 5-ветвь. Зависимости $t_{D,j}(\mu)$ монотонно растут с μ.

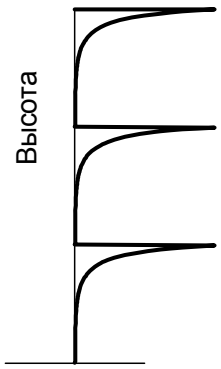


Рисунок 2. Плотность распределения точек

Аллометрическая связь типа $B \sim H^{\mu}$ согласно (Мандельброт, 2002) может в данном случае рассматриваться как фрактальная. Фрактальный характер этой зависимости дает возможность структурировать реальный интервал изменения показателя μ на диапазоны, отличающиеся по геометрическим характеристикам и биологическим особенностям соответствующих деревьев.

Можно следующим образом интерпретировать эволюцию регулярной системы ветвей по параметру μ. В интервале $0 < \mu \leq 1$, зеленая биомасса представлена "точками", некоторым образом размещенными по секциям ствола и ветвей. В интервале μ [0, 0.9952) "точки" размещаются только по стволу. При $\mu \rightarrow 1$ время жизни 2-ветвей уменьшается и при $\mu \approx 1$ они исчезают, что вполне закономерно - "точки" полностью заполняют все междоузлия и зеленая биомасса распределится линейно с размерностью 1.

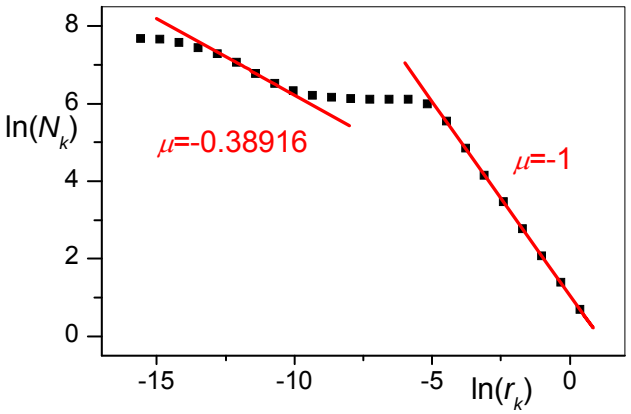


Рисунок 3. Групповое размещение, 150 групп размером 10^{-5} на секцию, 5 точек в группе

Проводились численные эксперименты с распределением "зеленых" точек по стеблю и вычислялись значения μ подсчетом числа N_k непустых отрезков при последовательном разбиении высоты на уменьшающиеся равные отрезки r_k с использованием формулы $\mu = -\ln(N_k)/\ln(r_k)$, $r_k = r_0/2^k$ (Zeide, 1998). Равномерное случайное размещение дает μ=1 также как и, по-видимому, другие сплошные размещения. При периодическом размещении точек не перекрывающимися группами с распределениями в группах типа (рисунки 2 и 3) дает значения μ<1.

Обсуждаются биологические интерпретации и возможная связь с эволюцией растений.

Литература

Галицкий В.В. Секционная структура дерева. Модельный анализ вертикального распределения биомассы // Журн. общ. биологии. 2010. № 1. С.1–29.

Галицкий В.В. Динамика биомассы ветвей высших порядков дерева. Модельный анализ // Журн. общ. биологии. 2012. № 6. С. 442–452.

Цельникер Ю.Л. Структура кроны ели // Лесоведение. 1994. № 4. С.35–44.

Мандельброт Б.Б. 2002. Фрактальная геометрия природы. М.: Инст. компьют. иссл. 656 с. (Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. 1982. NY: W.H. Freeman).
Zeide B. Fractal analysis of foliage distribution in loblolly pine crowns // Can. J. For. Res. 1998. Vol. 28, P. 106-114.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО СРЕДНЕГО ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Гасанова З.У.

Прикаспийский институт биологических ресурсов ДНЦ РАН, Махачкала, Россия
zgasanova@list.ru

Аннотация: Предлагается способ расчета площади круговой фильтрующей палетки для мониторинга динамики засоления почвенного покрова.

Особенностью почвенного покрова аридных территорий является наличие легкорастворимых солей в почвенных толщах, динамичных как в профилях, так и в пространстве. Подобная динамика солей при определенных условиях способствует негативным или, наоборот, позитивным изменениям в почвах вследствие увеличения или уменьшения запасов солей в верхних толщах почв. Могут появиться «мобильные» ареалы почв, кратковременно возникающие при изменении факторов почвообразования (Гасанова, 1996). Наиболее динамичными свойствами обладают так называемые переходные области в почвенном покрове, обусловленные сезонными, годичными, антропогенными и прочими изменениями. Дискретный характер традиционных картограмм засоления не дает возможности обозначить эти области, в связи с чем возникает необходимость континуализации исходных разновременных картограмм, что больше соответствует непрерывной природе явлений.

Осреднение с помощью фильтрующей ячейки в форме окна, кружка, гексагональной палетки (Берлянт, 1978, 1986; Fortin, 1997) является одним из наиболее употребимых методов преобразования картографических изображений. После работ В.А. Червякова (1976, 1978) широкое распространение получил метод скользящего кружка. Первая задача, с которой всегда сталкивается исследователь – это определение площади палетки, что, как правило, делается эмпирически и такой подход вполне удовлетворителен при изучении природного явления в целом, но не дает гарантии учета всех свойств, допущенных масштабом карты.

В настоящем исследовании предлагается способ расчета площади круговой фильтрующей палетки на основе почвенной карты масштаба 1:1000 тестового полигона в центральной части Терско-Кумской низменности (Северный Дагестан) для составления карт динамики засоления ПП. Состав почвенного покрова полигона наиболее типичен для почвенного покрова низменности: светло-каштановые почвы, солончаки, солонцы-солончаки, луговые засоленные почвы. Для определения площади палетки были измерены площади всех элементарных почвенных ареалов (ЭПА), удовлетворяющих следующим условиям: полная представленность на карте, форма ареалов по В.М. Фридланду (1986) округлая или вытянутая с последующей выбраковкой сомнительных значений по критерию τ (Доспехов, 1973). Был определен диапазон варьирования площади палетки (ДВ) и стандартное отклонение (σ). ДВ составил от 3.79 кв.см, соответствующий площади минимального ЭПА до 13.97 кв.см - средней площади всех ареалов, $\sigma = 9.39$ кв.см. С учетом σ ДВ сужается до 4.58-13.18 кв.см. Оптимальная площадь палетки была определена центральной позицией в разрешающем диапазоне - 8.88 кв.см.

Для получения карт динамики засоления почвенного покрова на картограммы фактического суммарного содержания солей в полуметровой толще почв была нанесена сеть контрольных точек с интерполированием средних значений точек. Расстояние между контрольными точками соответствует радиусу кружка – 1.68 см, что обеспечивает при каждом новом наложении центра круговой палетки на контрольную точку результат с перекрытием - скользящий оператор (Берлянт, 2001). Средневзвешенное содержание солей рассчитывалось по Е.А. Дмитриеву (1995). На итоговой и исходной карте появились

переходные области с набором изолиний различной степени изреженности. Через год была проведена та же процедура, разница между двумя картами дала остаточную поверхность динамики засоления почвенного покрова.

Преобразование разновременных почвенных карт учитывает малейшие изменения почвенного покрова, профили почв которого содержат легкорастворимые соли. Простота вычислений и наличие постоянной сети контрольных точек дает возможность мониторинга динамики почвенного покрова в годичных и сезонных циклах.

Литература

Берлянт А.М. Картографический метод исследования. - М.: Изд-во МГУ. - 1978. - 252 с.
Берлянт А.М. Образ пространства: карта и информация. - М.: Мысль. - 1986. - 240 с.
Берлянт А.М. Картография. - М.: Аспект-Пресс. - 2001. - 336 с.
Гасанова З.У. Влияние режимов пастбищного использования на почвенный покров Терско-Кумской низменности: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. - М., 1996. - 23 с.
Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. - М.: Изд-во МГУ. - 1995. - 319 с.
Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. - М.: Колос. - 1973. - 336 с.
Фридланд В.М. Проблемы географии, генезиса и классификации почв. - М.: Наука. - 1986. - 243 с.
Червяков В.А. Карты динамики явлений основанные на концепции векторного поля // Вестн. Моск. Ун-та, Сер. 5, география. - 1976. - № 5. С. 53-58.
Червяков В.А. Концепция поля в современной картографии.- Новосибирск: Наука. - 1978. - 149 с.
Fortin M.-J. Effects of data types on vegetation boundary delineation // J. For. Res. – 1997. -V. 27. – H. 1851-1858.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫМ ФАКТОРАМ

Глаголев В.А, Коган Р.М.

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия
carpi@yandex.ru

Аннотация: Предложена авторская версия детерминировано-вероятностной методики прогноза возникновения пожаров растительности с учетом погодных условий и дифференциации антропогенных источников огня. Верификация методики произведена на территории Еврейской автономной области по данным 2010 г.

Целью работы является разработка детерминированно-вероятностной методики прогноза возникновения пожаров растительности с дифференциацией природно-антропогенных факторов.

Возникновения пожаров растительности зависит от двух совместных событий: погодных условий (событие *C*), способствующих высыханию растительных горючих материалов, и наличия источника огня антропогенного от жителей населенных пунктов или пришедших по дорожной сети (события *N* и *D*) или природного происхождения от молний при сухих грозах (событие *M*).

На определенной территории участки растительности должны быть представлены уникальными операционно-территориальными единицами (ОТЕ): лесной фонд - кварталами участковых лесничеств, не лесного фонда разбивается на ячейки регулярной сети заданной формы, размер которых выбирается в зависимости от уровня детализации пространственного прогноза пожарной опасности.

Вероятность появления пожаров растительности $F_{i,j}(B)$ на *i-ый* день прогноза в *j-ой* ОТЕ рассчитывается по модифицированной модели А.И. Филькова (2005), в которой учтено происхождение источника огня, и введено понятие критическое расстояние (R_{cr}) - минимальное расстояние между населенным пунктом и исследуемой территорией, после которого значительно уменьшается количество пожаров:

$$F_{i,j}(B)=\begin{cases} F_{i,j}(C)\left[\ (F_{i,j}(N)F_{i,j}(B/N)+F_{i,j}(M)F_{i,j}(B/M)\ \right] & при \quad R_N \le R_{cr} \\ F_{i,j}(C)\left[\ (F_{i,j}(D)F_{i,j}(B/D)+F_{i,j}(M)F_{i,j}(B/M)\ \right] & при \quad R_N > R_{cr} \end{cases}$$

где: $F_{i,j}(B)$ - вероятность возникновения пожаров растительности; $F_{i,j}(C)$ – вероятность возгорания растительности при определенном значении комплексного показателя (КП), которая определяется степенью пирологической опасности участков растительности по лесорастительным условиям; $F_{i,j}(N)$, $F_{i,j}(D)$ – вероятность появления антропогенного источника огня в ОТЕ от ближайших населенных пунктов или железных и автомобильных дорог; $F_{i,j}(B/N)$, $F_{i,j}(B/D)$ - вероятность возгорания вследствие появления антропогенного источника огня; $F_{i,j}(M)$ - вероятность появления природного источника (молний); $F_{i,j}(B/M)$ - вероятность возгорания вследствие появления природного источника огня, молний; R_N – расстояние от *j-ой* ОТЕ до ближайшего населенного пункта. События *N*, *D* и *M* образуют полную группу несовместных событий, которые пересчитываются после наступления события *B* по частотным характеристикам.

Вероятность возгораемости растительности $F_{i,j}(C)$ равна единице, если ежедневный показатель P_i превышает $P_{крит,}$, либо вычисляется по формуле:

$$F_{i,j}(C)=\frac{P_i}{P_{крит.}},$$

где P_i - значение КП в *i-ый* день (Нестеров,1968), $P_{крит.}$ - минимальное значение КП, при котором возможно появление пожаров на данном участке в зависимости от степени природной пирологической пожарной опасности растительности в ОТЕ (Костырина, 1985).

Вероятность появления источников огня в ОТЕ определяется по относительной частоте появления молниевых разрядов и возникновения пожаров от ближайших населенных пунктов и дорог:

$$F_{i,j}(M) = \frac{QM_{i,j}}{Q},\ F_{i,j}(N) = \frac{QN_R}{Q},\ \ F_{i,j}(D) = \frac{QD_R}{Q}$$

где: Q – количество сезонов за базовый период; $QM_{i,j}$ - количество сезонов, в которых наблюдались молниевые разряды; QN_R, QD_R– количество сезонов, в которых были зафиксированы пожары, возникшие в пожароопасной зоне в радиусе R *(км)* от населенного пункта или дорожной сети.

Вероятность возгорания вследствие появления молний, либо населения от близлежайщих пунктов и дорожной сети вычисляются следующим образом:

$$F_{i,j}(B/M) = \frac{NMP_{i,j}}{NP},\ F_{i,j}(B/N) = \frac{NNP_{i,j}}{NP},\ F_{i,j}(B/D) = \frac{NDP_{i,j}}{NP}$$

где: $F_{i,j}(B/M)$, $F_{i,j}(B/N)$ и $F_{i,j}(B/D)$ – условные вероятности появления огня от разных источников; $NMP_{i,j}$ – количество пожаров от молний; $NNP_{i,j}$, $NDP_{i,j}$ - количество пожаров от населенных пунктов или дорожной сети; NP - общее количество пожаров за базовый период.

Верификация методики проводилась в выбранные дни (начало обнаружения горельников) сезона 2010 г на территории Еврейской автономной области. Составлено 214 пространственных прогноза возникновения пожаров с учетом текущих погодных условий в дни возникновения лесных пожаров и количества молниевых разрядов с 1997 по 2012 гг.

Анализ возгораемости растительности по условиям погоды, показал, что расчетные значения фактического комплексного показателя P_i в полной мере соответствуют шкале возгорания основных растительных формаций при заданных погодных условиях Т.В. Костыриной (1985). Установлена высокая достоверность прогноза: при вероятности 0,95 она равна (86 ±6)%.

Рассчитаны относительные частоты $F_{i,j}(N)$ и $F_{i,j}(D)$, выделены зоны различной антропогенной пожарной опасности. Наибольшая относительная частота появления антропогенной нагрузки наблюдается в зонах, расположенных на расстоянии 3 - 9 км от населенных пунктов и в пределах 0-3 км от ближайшей к ОТЕ дорожной сети; наименьшая концентрация источников антропогенной опасности расположена на расстоянии 0-3 км от населенных пунктов и 6-12 км от дорожной сети.

При анализе значений вероятности появления пожаров $F(B)$ на текущий день около 10% пожаров растительности зафиксированы при нулевой вероятности, что обусловлено отсутствием статистических данных о горельниках на день прогноза. Распределение пожаров и вероятности их возникновения $F(B)$ выглядит следующим образом: 0 ч 10 %; 0-0,2 ч 3%; 0,2-0,4 ч 20%; 0,4-0,6 ч 30%; 0,6-0,8 ч 31%; 0,8-1 ч 6%, где первая цифра соответствует $F(B)$, а вторая – количеству пожаров (%). Между количеством пожаров растительности и значениями вероятности $F(B)$, при которых они обнаружены, выявлена высокая степень корреляционной зависимости, равная 0,78 по фактическим метеоданным и 0,63 на день прогноза.

Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН №12-1-0-09-013 и РФФИ № 12-07-31070

Литература

Костырина Т. В. Прогнозирование пожарной опасности в лесах юга Хабаровского края: Автореф. дис. … канд. с.-х. наук. - Красноярск, 1978. - 23 с.

Нестеров В.Г., Гриценко М.В., Шабунина Т.А. Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса // Гидрология и метеорология. - 1968. - № 9. – С.102-104.

Фильков А.И. Детерминированно-вероятностная система прогноза лесной пожарной опасности: Дис...канд. ф.-м. наук. – Томск, 2005. - 163 с.

ОЦЕНКА ПОТОКА МЕТАНА ИЗ ПОЧВ РОСИИ НА ОСНОВЕ ПРОСТЕЙШИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Глаголев М.В. [1,2,4], Филиппов И.В.[2], Клепцова И.Е.[2], Максютов Ш.Ш.[3]

[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
m_glagolev@mail.ru
[2]*Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия*
filip83pov@yandex.ru, kleptsova@gmail.com
[3]*National Institute for Environmental Studies, Цукуба, Япония*
shamil@nies.go.jp
[4]*Институт лесоведения РАН, Успенское, Россия*

Аннотация: в работе оценивается эмиссия метана из болот России на основе трех карт распространения болот и пяти простейших математических моделей. Управляющими параметрами моделей являются: первичная продуктивность, либо среднегодовая температура и/или осадки, либо географическая широта. По наиболее точной карте на основе использованных моделей эмиссия CH_4 оценивается величинами от 9.7 до 13.1 МтС·год$^{-1}$.

1. Введение

Метан – важный компонент фотохимической и климатической систем атмосферы. В XX в. скорость возрастания его концентрации достигала 1%/год. Очевидно, что исследование причин столь быстрого возрастания чрезвычайно важно. Известно, что одним из главных источников метана являются болота. Представляется, что Россия может быть одним из основных источников метана из-за существенной заболоченности ее территории.

2. Объекты и методы

Для расчета эмиссии CH_4 из болот в региональном масштабе годовая эмиссия метана (F, г·м$^{-2}$·год$^{-1}$) представлялась как сумма эмиссий по отдельным географическим областям:

$$F = \sum_k (s_k \cdot \mu_k \cdot q)$$

здесь S_k – площадь k-ой области, μ_k – доля площади, занимаемой болотами в k-ой области, q – удельный поток CH_4 (гС·м$^{-2}$·год$^{-1}$). Для расчета q мы применяли несколько моделей. Три из них («модель *Taylor et al.*», «модель *Taylor*-Miami» и «модель Andronova-Karol», или сокращенно – MoTEA, MoTaM и MAK) вместе с соответствующими ссылками приведены ранее в [Глаголев с соавт., 2012]. Теперь опишем еще две:

а) Ю.Г. Пузаченко [2010, с. 110] предложил модель для NPP, зависящую от тех же входных переменных, что и Miami-model, тогда

$$q=e\cdot\{76.76\cdot T_K - 0.1323\cdot T_K^2 - 530.9\cdot\ln(P) + 65.51\cdot[\ln(P)]^2 - 7.249\cdot(T_K/P) + 0.0123\cdot(T_K/P)^2 - 9958.25\}$$

где $T_K = T + 273.15$.

б) А.В. Наумов [2010] предложил использовать параболическую регрессионную связь NPP непосредственно с географической широтой (x, °с.ш.), тогда:

$$q = d\cdot(19.958 - 0.0328\cdot x - 0.003\cdot x^2).$$

Эти модели мы кратко будем обозначать, соответственно, MoTaP и MoTaN.

Поскольку на территории РФ наиболее изученной областью к настоящему времени является таежная зона Западной Сибири, мы подбирали неизвестные параметры в моделях (например, в MoTaP и MoTaN – это d и e) так, чтобы расчеты по моделям наилучшим образом удовлетворяли потоку CH_4 из болот подзон именно этой зоны. Конкретная методика (минимизируемый функционал; особенности картографических расчетов; использованные картографические материалы: слой границ субъектов РФ, маска болот из набора данных GLWD-3, растры нетто-первичной продуктивности болот, среднегодовых температур и годовых осадков; пространственное разрешение наборов данных) вместе с необходимыми ссылками частично была описана ранее в [Глаголев с соавт., 2012].

Для моделирования распространения болот по GLWD3 были взяты классы легенды с 4 по 9 (поскольку первые три класса являются водными объектами, а последние три не попадают на территорию РФ). В качестве класса болот GlobCover более всего подходит 180-й класс легенды; остальные классы помимо болот включают и другие не болотные объекты. Кроме того, на основе продукта MCD43A4 космической съемки MODIS нами была начата разработка карты болот (PeatMap1) на территорию России. Точность карт оценивалась по величине «условной каппы» (κ_{+i}) – см. [Rosenfield и Fitzpatrick-Lins, 1986].

3. Результаты и обсуждение

Результаты расчетов эмиссии метана приведены в Таблице 1. Представляется, что значение потока CH_4 со всей территории РФ полученное на основании карт GlobCover и GLWD3, является существенно заниженным. После проверки точности ландшафтных покрытий по космической съемке Landsat и топографическим картам выяснилось, что κ_{+i} для GlobCover, GLWD3 и PeatMap1 составила, соответственно, 0.10, 0.13 и 0.37. Т.е. во всех трех случаях точность карт болот довольно низкая (в первых двух случаях – очень низкая).

Очевидно, что различия в эмиссии (50-90%), рассчитанной для болот РФ по разным картам существенно больше, чем на одной и той же карте по разным моделям (20-30%). Отсюда, по-видимому, можно сделать вывод о том, что в настоящее время для уточнения эмиссии CH_4 из болот РФ не столь важно совершенствование моделей, сколь уточнение карт распространения болот.

Таблица 1 – Эмиссия CH_4 болотами РФ (TгC/год) согласно различным моделям и картам*

Модель	*Подзоны таежной зоны Западной Сибири*				*РОССИЯ*
	Северная	*Средняя*	*Южная*	*Всего*	
Bd8	1.00	1.01	1.52	3.53	
MAK	0.58/1.09/1.05	1.38/1.13/1.17	0.71/0.95/0.63	2.66/3.17/2.85	**6.11/6.20/ 9.66**
MoTaM	0.62/1.13/1.05	1.37/1.09/1.17	0.69/0.93/0.63	2.68/3.15/2.85	**5.88/6.60/11.44**
MoTEA	0.57/1.01/1.09	1.37/1.20/1.14	0.65/0.91/0.61	2.59/3.13/2.84	**5.12/6.75/13.00**
MoTaN	0.66/1.20/0.99	1.36/1.02/1.22	0.69/0.86/0.60	2.72/3.08/2.81	**5.36/7.35/13.13**
MoTaP	0.75/1.27/1.13	1.33/0.90/1.09	0.58/0.64/0.58	2.67/2.81/2.80	**5.35/5.36/10.21**

* Расчеты по разным картам представлены в следующем порядке: GlobCover/GLWD3/PeatMap1. Инвентаризация Bd8, основанная на порядка 2000 экспериментальных измерений удельного потока CH_4, включает в себя собственную цифровую карту болотных ландшафтов (существенно более точную, чем вышеперечисленные), кратко описанную в [Kleptsova et al., 2012]. Принцип построения такой инвентаризации см. в [Glagolev et al., 2011], где описана ее предыдущая версия - Bc8.

Литература

Глаголев М.В., Филиппов И.В., Клепцова И.Е. Материалы IV международной конференции «Биогеоценология и ландшафтная экология: итоги и перспективы». – Томск: ТГУ. 2012. С. 29-33.

Наумов А.В. Материалы конференции «География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов: к 100-летию профессора Н.И. Базилевич». – М.: ИГ РАН., 2010. С. 96-99.

Пузаченко Ю.Г. Материалы конференции «География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов: к 100-летию профессора Н.И. Базилевич». – М.: ИГ РАН., 2010. С. 100-113.

Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., Machida T. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // Environ. Res. Lett. - 2011. - V. 6. N. 4. 045214. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045214.

Kleptsova I., Glagolev M., Lapshina E., Maksyutov S. 1st International Conference “Global Warming and the Human-Nature Dimension in Siberia: Social Adaptation to the Changes of the Terrestrial Ecosystem, with an Emphasis on Water Environments” (7-9 March 2012, Kyoto, Japan). - 2012. - P. 38-41. URL (дата обращения 08.11.2012): http://www.chikyu.ac.jp/siberia/2012_Siberia_International_workshop@RIHN1.pdf.

Rosenfield G.H., Fitzpatrick-Lins K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy // Photogramm. Eng. Remote Sensing - 1986. - V. 52 P. 223-227.

МОДЕЛЬ РЕГИОНАЛЬНОГО ЛЕСОУПРАВЛЕНИЯ

Гладков Е.Г. [1], Плехов О.Г.[2], Тетюхин С.В.[3]

[1]*Санкт – Петербургский государственный лесотехнический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация*
gladkov2807@ya.ru
[2]*Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Российская Федерация*
plekhov-og @ rambler.ru
[3]*Санкт – Петербургский государственный лесотехнический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация*
7tsv1100@ya.ru

Аннотация: экономико-математическая модель обоснования региональных планово-проектных решений освоения усыхающих лесов Архангельской области. Распределяет инвестиции в элементы региональной структуры обеспечивая максимальную прибыль по рассматриваемому кругу лесозаготовок, лесовосстановления и защиты леса.

1. Введение

Проблема освоения усыхающих лесов Архангельской области имеет региональный многоаспектный характер. Ее решение может быть достигнуто коллективными усилиями специалистов из различных научных областей. Взвешенный системный подход к решению проблемы в части организации лесного комплекса предполагает разработку математических инструментов рассматривающих достаточную полноту экономических, производственных, лесоводственных, социальных и иных связей и ограничений, возникающих на региональном уровне при решении проблемы.

2. Объекты и методы

В частности, модель REG3 (Гладков, 2006; Гладков ,2010) рассматривает следующую ситуацию на интервале 3-4 года[1]. В регионе заготавливается древесина различных категорий качества (порода и товарность) в лесном фонде, состоящем из площадей спелого и неспелого леса, а также закупается [2]и продается древесина различного качества за пределами региона. Спелый лес в регионе вырубается в объеме, не превышающем расчетную лесосеку. В технологию интенсивного лесовыращивания могут быть сделаны дополнительные инвестиции к существующим на начало планирования. Полагается, что инвестиции вкладываются в технологии, обеспечивающие на этих площадях *гарантированное* повышение среднего прироста, что позволяет выполнить корректировку расчетной лесосеки с момента вложения инвестиций. Отдача инвестиций в интенсивное лесовыращивание дифференцирована по лесным площадям. Помимо интенсивного (в т. ч. плантационного) лесовыращивания в регионе ведется лесовосстановление по традиционным экстенсивным технологиям. Затраты на лесовосстановление дифференцированы по типам этих вырубок. Полагается известным перечень лесных площадей, где выполняется специализированная охрана и защита леса. При этом объем вырубаемого запаса с охраняемой

[1] До горизонта экономического планирования.

[2] За пределами региона возможны закупки древесины из числа партий леса с известной ценой, качеством и ограниченным объемом для обеспечения спроса, превышающего расчетную лесосеку. Речь идет о больших партиях леса. Полагается, что увеличение размера партии связано с вовлечением в рубку менее эффективных лесных площадей. Поэтому Y древесины можно купить по цене C, но $Y_1 > Y$ купить можно по цене $C_1 > C$. В этой связи возможный объем каждой закупаемой партии обусловлен ее ценой и является ограниченным.

площади, ассоциируемой с *i* –м пунктом, описывается линейным уравнением вида $V = V_0 + cW$, при условии $V \leq Q$, где V- вырубаемый запас; V_0 – ожидаемый объем древесины, который может быть заготовлен без привлечения затрат на охрану и защиту леса; W – затраты выделяемые на охрану и защиту леса; c – ожидаемый объем древесины, сохраняемый при выделении единицы затрат; Q –существующий ликвидный запас на рассматриваемой площади[3]. Совокупный вырубаемый лесной запас и ввозимый объем древесины потребляются или перерабатываются в конечном множестве пунктов. В транзитных пунктах возможны затраты на перегрузку и прочее. Затраты перерабатывающих предприятий зависят от объемов переработки древесины и ее качества, а доходы определяются объемами переработки и договорными ценами на продукцию. Пункты потребления связаны с лесными площадями и пунктами ввоза древесины транспортной сетью, часть элементов которой построена, а часть задана избыточными связями, возможными к строительству. (На этом множестве существующих и возможных к строительству связей находится оптимальный план строительства и реконструкции дорог.) Транспортная сеть требует затрат на содержание, ремонт, реконструкцию существующих и строительство новых элементов сети для обеспечения транспортной доступности вновь вовлекаемых в эксплуатацию лесных площадей.

3. Результаты

Модель исследовалась на контрольном примере при различных объемах внутреннего и внешнего (на экспорт) потребления леса в регионе (в том числе «свободный план»). В результате определялась структура и параметры лесного комплекса, обеспечивающие максимальную прибыль по рассматриваемому кругу производств за период планирования (ввоз, собственные заготовки древесины, охрана, защита и восстановление леса, переработка и экспорт, внутрирегиональная транспортировка, содержание и реконструкция существующих и строительство новых дорог). Анализ двойственного решения в линейном варианте модели позволяет судить о его устойчивости.

4. Обсуждение результатов

Контрольный пример позволил установить работоспособность и пригодность модели, одновременно выявив необходимость выполнения обширного объема работ по информационному обеспечению реальной задачи Архангельской области. Для ее решения необходимо создание АРМ использующего ГИС[4] региона с актуализированными лесоустроительными данными совместно с базами других необходимых данных по лесозаготовительным предприятиям и потребителям.

Выводы

1. Разработан инструмент для обоснования планово-проектных решений освоения усыхающих лесов Архангельской области учитывающих производственные, экономические и лесоводственные реалии проблемы.
2. Принятие решений существенным образом базируется на математических методах обоснования решений, использовании ГИС и спутниковой информации, организованной в базы картографических и иных данных, служащих исходной информационной основой для математической модели.

Литература

Гладков Е. Г. Территориальная динамика лесозаготовок: Моделирование и оптимизация эффективного развития лесозаготовок в современных экономических условиях. СПб.: СПбГУ, 2006 г. -187 с.

[3] То есть, полагается, что без охраны и защиты с данной площади можно снять запас в размере лишь V_0, а при максимальном уровне охраны - не более существующего ликвидного запаса Q.
[4] АРМ – автоматизированное рабочее место; ГИС – географическая информационная система.

Гладков Е. Г. Моделирование технологических процессов: моделирование территориальной динамики лесопромышленных предприятий. Учебное пособие. СПб.: СПбГЛТА, 2010. – 148 с.

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ТОРФООБРАЗОВАНИЯ ОЛИГОТРОФНЫХ И ЭВТРОФНЫХ БОЛОТ ЮЖНОЙ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Головацкая Е.А.

ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
golovatskaya@imces.ru

Аннотация: В статье представлены результаты оценки скорости торфообразования болот разного типа в южно-таежной подзоне Западной Сибири. На основе детального анализа стратиграфии торфяных месторождений и радиоуглеродного датирования оцениваются закономерности развития торфяников в голоцене. Современные скорости аккумуляции углерода в торфяниках оценивалась на основе данных о чистой первичной продукции и скорости трансформации растительных остатков.

В болотных экосистемах нашей планеты в виде торфяных залежей сосредоточены значительные запасы углерода - 120 - 455 Гт С (Вомперский, 1994; Gorham, 1991). На территории Западной Сибири болотные экосистемы занимают почти 50 % площади, и в них содержится около 36 % общего пула почвенного углерода России. Детальный анализ стратиграфии торфяных залежей позволяет не только оценить запасы углерода в исследуемых болотных экосистемах, но и проследить закономерности развития болотных массивов при изменении климатических условий в течение голоцена. Исследование процессов продукции и трансформации растительных остатков дает возможность оценить текущее связывание углерода в болотных экосистемах.

Объекты и методы

Исследования проводились на научно-исследовательском стационаре «Васюганье» (ИМКЭС СО РАН), на олиготрофном болоте «Бакчарское» и эвтрофном болоте «Самара». Оценивалась скорость торфообразования в торфяных залежах следующих видов олиготрофных фитоценозов: сосново-кустарничково-сфагновые фитоценозы (высокий и низкий рямы), грядово-мочажинный комплекс (ГМК) и осоково-сфагновую топь (мощность торфяной залежи изменяется от 1 до 3 м); и эвтрофных фитоценозов: ерниково-осоковом, осоково-ерниково-гипновом и сосново-елово-кедрово-березовая согре (мощность торфа 3,5-4,2 м). На каждом пункте наблюдения были отобраны образцы торфа на всю глубину торфяных залежей (каждые 10 см) для проведения анализа ботанического состава, плотности торфа, содержания углерода в торфе и др. Получено более 30 радиоуглеродных датировок торфа (Лаборатория геологии и палеоклиматологии кайнозоя в Институте геологии и минералогии СО РАН и в Лаборатории биоинформационных технологий ИМКЭС СО РАН на QUANTULUS 1220). Для оценки современной скорости депонирования углерода также были выполнены измерения чистой первичной продукции (NPP) и оценена скорость трансформации растений торфообразователей. Скорость накопления торфа определялась путем деления запасов углерода в торфяной залежи на возраст образцов торфа придонного слоя, скорость вертикального прироста торфа определялась как отношение мощности торфяной залежи к возрасту придонного слоя торфа.

Результаты исследования

Согласно данным радиоуглеродного датирования на исследуемом болотном массиве наиболее древней является торфяная залежь открытой топи (7148±90 лет), самой молодой – гряды ГМК (2477±80). На эвтрофном болоте наиболее древней является торфяная залежь согры (8065±135 лет), наиболее молодой центральная часть болота «Самара» (4939±85). Результаты проведенных исследований показывают, что усредненная скорость накопления

углерода в изученных торфяных залежах олиготрофного болота составляет в среднем для олиготрофного болота 19 гС/м^{2}год и изменяется в пределах от 11 до 26 гС/м^{2}год. Для эвтрофного болота скорость накопления углерода выше – 23,0 (20,2–27,0) гС/м^{2}год. Полученные значения значительно ниже приводимых для болот Западной Сибири и бывшего СССР (Лапшина, 2004; Boch et al., 1995). Наиболее близкие значения получены для болот северной Европы и Канады (Tolonen, Turunen, 1996; Ovenden, 1990; Gorham, 1991).

Среди олиготрофных фитоценозов максимальной скоростью вертикального прироста торфа характеризуется ГМК (0,77 мм/год) и низкий рям (0,63 мм/год), минимальной – высокий рям (0,25 мм/год). На эвтрофном болоте для исследованных фитоценозов средняя скорость прироста торфа изменяется от 0,47 до 0,71 мм/год. Скорость накопления торфа в течение голоцена изменялась с изменением климата и, соответственно, растительного покрова болот. Это находит отражение как в изменении скорости накопления углерода, так и в изменении скорости вертикального прироста торфа. Максимальные скорости накопления в основном характерны для начальной стадии торфообразования.

Современную скорость депонирования торфа, косвенно можно оценить, используя данные по биологической продуктивности и скорости разложения растительных остатков. Текущая скорость аккумуляции углерода в среднем составляет 150 гС/м^{2}год для олиготрофного болота и 137 гС/м^{2}год для эвтрофного. Сопоставление данных по средней долговременной скорости депонирования углерода и текущего связывания его показали, что в настоящее время скорость депонирования значительно выше. Однако следует учитывать, что средняя долговременная скорость торфонакопления не отражает реальную скорость торфообразовательных процессов в прошлом, так как процессы разложения растительных остатков в анаэробных условиях глубоких залежей продолжаются, хотя и с гораздо более низкой скоростью. Часто предпринимаются попытки сопоставить скорость долговременной аккумуляции углерода с текущей чистой первичной продукцией (Вомперский, 1994, Пьявченко, 1985, Елина и др., 1984). Согласно этим оценкам долговременная аккумуляция составляет от 4-20% от современной NPP. Аналогичные расчеты, проведенные для исследуемых нами болот, дают более низкие значения – 2-35 %. Современное накопление углерода составляет в среднем около 40 % от чистой первичной продукции болотных экосистем.

Таким образом, средняя долговременная скорость депонирования углерода в течение голоцена для исследованных болот почти в 2 раза полученных ранее оценок для болот Западной Сибири. Изменение вертикального прироста торфа и скорости депонирования углерода определяется изменением климатических условий и сменой растительного покрова. Современная (текущая) скорость связывания углерода болотами выше по сравнению со средней долговременной скоростью в 1,5 – 2 раза в зависимости от типа болот.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований гранты 11-05-00227а, 12-04-90023 Бел_а

Литература

Вомперский С. Э. Роль болот в круговороте углерода / Биогеоценотические особенности болот и их рациональное использование. М.: Наука, 1994. - С.5-37.

Елина Г. А., Кузнецов О. П., Максимов А. И. Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии. Л., 1984. 128 с.

Пьявченко Н.И. Торфяные болота, их природное и хозяйственное значение. 1985. М.: Наука. 152 с.

Boch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S. & Kolchugina T.P. Carbon pools and accumulation in peatlands of the Former Soviet Union. Global Biogeochemical Cycles. 9. 1995. 37-46.

Gorham E. Northern Peatlands: role in carbon cycle and probable responses to climatic warming // Ecological Applications. 1991. V.1. №2. P.182-195.

Ovenden L. Peat accumulation in northern wetlands // Quaternary Research 33. 1990. P. 377-386.

Tolonen K., Turunen J. Accumulation rates of carbon in mires in Finland and implications for climate change // The Holocene 6 (2). 1996. P. 171-178.

ДОПУСТИМЫЕ ПРЕДЕЛЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ НЕЧЁТКИХ МНОЖЕСТВ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Голубев С.Н.

Лаборатория фрактального анализа, экологии и программирования, Шахты, Россия
Schwejk-rpnt@rambler.ru

Аннотация: описаны допустимые пределы использования теории нечётких множеств, обусловленные синергетическим эффектом в природных системах.

1. Введение

Успешное применение теории нечётких множеств (Заде, 1976) в технике привело к возрастанию популярности нечётких вычислений в других сферах, в том числе в экологическом моделировании. Моделирование растительного покрова с помощью нечётких множеств позволяет объединить континуальный и дискретный подход в рамках одной модели (Голубев, 2012). Это создаёт ошибочное ощущение универсальности данного подхода. Допустимые пределы использования теории нечётких множеств, как и факторы, обуславливающие эти пределы, до сих пор не определены.

2. Применение теории нечётких множеств

Теория нечётких множеств представляет собой развитие классической теории множеств. В отличии от последней, в теории нечётких множеств один элемент может принадлежать одновременно нескольким множествам. При этом степень принадлежности его к тому или иному множеству выражается при помощи функции принадлежности (характеристической функции). Значение характеристической функции обычно является дробным числом в диапазоне от 0 (элемент абсолютно не принадлежит множеству) до 1 (абсолютная принадлежность элемента множеству) (Заде, 1976).

В качестве примера применения теории нечётких множеств в экологических моделях можно привести нечёткую типологию лесов Северо-Запада России (Голубев, 2012). Данная типология основана на новейших лесотипологических исследованиях (Федорчук и др., 2005) и принципах классификации нечётких множеств (Заде, 1976). Серии типов леса в типологии выделяются на основе обилия групп индикаторных видов. Для каждой серии характерна индикаторная группа с уникальным набором видов. Растительное сообщество может одновременно относиться к одной (истинной) серии или нескольким (переходным) сериям. Истинная серия характеризуется присутствием только одной индикаторной группы с суммарным проективным покрытием травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового яруса 100 %. Показатель истинности серии рассчитывается как мера количественного сходства (например, коэффициент Чекановского (Словарь..., 1989)) между рассматриваемым растительным сообществом и истинной серией типа леса.

Одним из ключевых преимуществ такой типологии является возможность обоснованной интерполяции данных. Зная значение индикационных параметров (например, агрохимических почвенных показателей) в истинных типах леса (или типах с известной истинностью), мы можем рассчитать эти параметры для произвольного участка леса на основе его нечётких лесотипологических показателей (близости к тому или иному типу леса). Результаты расчётов будут содержать погрешность, иногда значительно искажающую результаты. Основной причиной данной погрешности является неприменимость теории нечётких множеств к описанию природных систем, которая проявляется в возникновении синергетического эффекта при объединении различных множеств природных объектов.

3. Синергетический эффект при объединении нечётких множеств

Синергетический эффект - эффект взаимодействия нескольких систем, характеризующийся тем, что их совместное действие существенно превосходит простую сумму действий каждого отдельного компонента (Жилин, 2004). Частным случаем синергетического эффекта является эмергентность — свойство факторов образовывать при совместном влиянии новый фактор, отличный от исходных и от их суммарной мощности.

В нечётком типологическом ряду «лишайниковая-кустарничковая-мелкотравная» (серии типов леса) (Голубев, 2012), кустарничковая серия не является простой механической смесью лишайниковой и мелкотравной серий. В связи с этим индикационные показатели, рассчитанные на основе близости кустарничкового типа леса к лишайниковому и мелкотравному будут содержать определённую ошибку. Величина этой ошибки может быть использована как показатель мощности синергетического эффекта: чем больше расхождение реальных данных с расчётными, тем менее сообщество похоже на механическую смесь других растительных сообществ (и тем менее применимы к нему разработанные для других типов леса хозяйственные мероприятия).

4. Расширение пределов использования теории нечётких множеств

Из приведённого примера следует, что теорию нечётких множеств допустимо применять лишь для систем с незначительным синергетическим эффектом. С более примитивной лесохозяйственной точки зрения это устранимо за счёт введения поправочных коэффициентов, рассчитанных указанным методом для каждого из типов леса. В то же время, невозможно построение на основе теории нечётких множеств аппарата, пригодного для анализа состояний детерминированного хаоса в природных системах.

Математическим аппаратом, расширяющим теорию множеств, может служить аппарат субъективных вычислений, в котором изменение характеристической функции принадлежности элемента к одному из двух подмножеств не влияет на характеристическую функцию принадлежности элемента ко второму подмножеству.

5. Выводы

Применение теории нечётких множеств допустимо в системах с пренебрежимо малым синергетическим эффектом объединения систем. Ограниченно эту теорию допустимо использовать в практической деятельности с использованием поправочных коэффициентов на синергетический эффект (эти же коэффициенты, возможно использовать в качестве меры тесноты взаимосвязи элементов в растительном сообществе). Для характеристики состояний детерминированного хаоса в экологических моделях применение теории нечётких множеств недопустимо.

Литература

Голубев С.Н. Лесная типология на базе теории нечётких множеств / Материалы международной конференции «Современные проблемы лесного хозяйства и лесоустройства», посвящённой памяти классиков отечественного лесоводства Морозова Г.Ф. И Орлова М.М., МЦЛХП, СПБГЛТУ им. С.М. Кирова, 2012, стр. 74-75.

Жилин Д. М. Теория систем.— М.: УРСС, 2004. с. -183.

Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Пер. с англ.— М.: Мир, 1976. с. -167.

Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипин Н.А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову – М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1956, с.– 472.

Словарь понятий и терминов современной фитоценологии / – М.: Наука, 1989. с.– 223.

Федорчук В.Н., Нешатаев В.Ю., Кузнецова М.Л. Лесные экосистемы северо-западных районов России: Типология, динамика, хозяйственные особенности. – С.-Пб., 2005. с. -382.

ГИПОТЕЗА О ПОЯВЛЕНИИ В СТРУКТУРЕ СИСТЕМЫ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФИБОНАЧЧИ ВСЛЕДСТВИЕ ПРОЦЕССА ЭМЕРГЕНТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ

Голубев С.Н.[1]

[1]*Лаборатория фрактального анализа, экологии и программирования, Шахты, Россия*
Schwejk-rpnt@rambler

Аннотация: приведена гипотеза, согласно которой последовательность Фибоначчи в природных объектах, есть следствие эмергентного взаимодействия факторов различного рода.

1. Введение

Последовательность Фибоначчи представляет собой ряд чисел, в котором каждое последующее число равно сумме двух предыдущих чисел (1, 1, 2, 3, 5, 8…). Отношение последующего члена к предыдущему в данной последовательности стремится к обратному значению золотого сечения (Шредер, 2001).

Золотое сечение чрезвычайно широко распространено в природных объектах. Правилу золотого сечения подчинено строение растений (Чайковский, 1990), формы тела животных (Петухов, 1981) и человека (Zeising, 1984), особенности психологии (Лефевр, 2005), воздушные вихри (Ахметов, 2001), системы с динамическим хаосом (Шустер, 1987) и даже строение галактик (Бутусов, 1978).

В.Г. Буданов (2000) отмечает, что «современная наука, …, по прежнему в недоумении по поводу истоков системной общности феномена золотого сечения».

2. Предпосылки гипотезы

Предпосылкой гипотезы послужили исследования особенностей воздействия на растительное сообщество различных сочетаний природных факторов. В ходе анализа формализованных данных возникал «шум», обычно принимаемый за «статистическую ошибку». Поскольку объектом исследования являлись неустойчивые (переходные) сообщества, пренебречь «шумом» было невозможно.

Главным источником погрешности являлись неучтенные (второстепенные факторы). Большинство из них является результатом эмергентного взаимодействия между собой основных факторов. При таком взаимодействии два фактора образуют третий, который в свою очередь взаимодействует с ними, образуя каскад новых, неподдающихся учету факторов.

Так, на состояние древостоя в лесопарке «Пискаревка» (Санкт-Петербург) влияет не просто степень рекреационной нагрузки и санитарные рубки, а именно результат сочетания этих двух факторов: многочисленные инфекционные поражения ослабленных деревьев. При этом снижается рекреационная ценность участка, что совместно с высокой рекреационной нагрузкой в парке ведет к перераспределению рекреационного влияния и дальнейшему распространению инфекции.

Для теоретического изучения таких взаимодействий был построен формальный эмергирующий ряд. Свойства этого ряда оказались настолько согласованы с последовательностью Фибоначчи, что позволили выработать гипотетическое объяснение широкой распространенности золотого сечения в природе.

3. Суть гипотезы

Эмергентность — свойство факторов образовывать при совместном влиянии новый фактор, отличный от исходных и от их суммарной мощности.

Рассмотрим два фактора F1 и F2.

Действуя совместно, они образуют фактор F3(F1+F2), тем самым образуется три способных к взаимодействию друг с другом фактора и появляется возможность для двух новых взаимодействий (F1 и F3, F2 и F3).

Взаимодействуя между собой, три исходных фактора образуют еще два фактора дополнительно F4(F1+ F3) и F5(F2+ F3). При этом факторы F4(F1+ F3) и F5(F2+ F3) принадлежат следующей итерации.

В эмергентную связь вступает только один из факторов в итерации. Это значит, что из двух факторов F4(F1+ F3) и F5(F2+ F3), в эмергентную связь вступит только один, образовав три новых фактора. Внутри одной итерации факторы не взаимодействуют.

Из трех новых факторов, образовавшихся при очередной итерации, опять только один вступит в следующую эмергентную связь, образовав в свою очередь пять новых факторов.

При этом количество возможных форм возрастает до шести (три формы, образованные в нынешней итерации, три формы, образовавшиеся если бы в предыдущей итерации в эмергентную связь вступил альтернативный фактор).

В последующем, повторяя процедуру до бесконечности, мы получаем две последовательности: последовательность действующих факторов различных порядков итерации (1,1,2,3,5,8,13... - последовательность Фибоначчи) и последовательность числа альтернативных форм — вариантов последствий действия среды (1,1,1,2,6,30,330,13530...).

Действие разных факторов приводит к различным результатам. При выборе между одним из эмергентных факторов происходит выбор между несколькими альтернативными последствиями действия среды (формами системы). Момент выбора соответствует состоянию хаоса (бифуркации или полифуркации).

С каждой последующей итерацией, сила факторов снижается (возможно, есть и обратные примеры). Применительно к растениям, каждая итеративная процедура соответствует образованию одного из все более тонких ответвлений побега: первое ответвление крупное, для его изменения (модификации) требуется большая энергия, но изменившись, он оказывает влияние на все растущие из него ответвления. Меньшая энергия недостаточна для изменения главного ответвления (1-го порядка) но способна изменить ответвление 2-го порядка и как следствие ответвления всех последующих порядков.

Такая гипотеза согласуется как с идеей онтогенеза у растений (Корона, Васильев, 2007), так и с идеей филогенеза (Чайковский, 1990, Мейен, 2009).

Исходя из такой гипотезы, золотое сечение, так или иначе, должно выявляться во всех природных объектах. Кроме того существуют объекты, в которых выбор факторов всегда происходит однообразно, образуя различные спиралевидные формы.

Литература

Ахметов Д.Г. Формирование и основные параметры вихревых колец // Прикладная механика и техническая физика / 2001. Т. 42, № 5 с. 70-83.

Буданов В.Г. Синергетическая алгебра гармонии // Синергетическая парадигма - М.: 2000. - с.121–137.

Бутусов К.П. Золотое сечение в Солнечной системе // В сб.: Астрометрия и небесная механика. -М.,1978. - 500с.

Корона В.В., Васильев А.Г. Строение и изменчивость листьев растений: основы модульной теории // Изд. УРО РАН, 2007. - 280 с.

Лефевр В.А. Космический субъект. Изд. 3-е, доп. - М.: "Когито-центр", 2005. - 221 с.

Мейен С.В. Теоретические основы палеоботанических исследований. – М., Геос, 2009. – 107 с.

Петухов С.В. Биомеханика, бионика и симметрия», -М.: Наука, 1981. - 239 с.

Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. - Ижевск: НИЦ «РиХД». 2001. - 528 с.

Шустер Г. Детерминированный хаос. Мир. 1987. - 240 с.

Чайковский Ю.В., Элементы эволюционной диатропики, 1990. - 271 с.

Zeising A. Neue lehre von den proportionen des menschlichen korpers. Leipzig, 1854.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЕДИНИЦ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Голубев С.Н.

Лаборатория фрактального анализа, экологии и программирования, Шахты, Россия
Schwejk-rpnt@rambler.ru

Аннотация: предложены доступные для математической формализации единицы растительного покрова.

1. Введение

В основе «классических» методов классификации растительного покрова (Александрова, 1969) положены принципы булевой логики, которая опирается на следствие аддитивного свойства множеств (образование непересекающихся подмножеств при делении множества). Для сложно устроенных (Растригин, 1981) природных систем, характерна не аддитивность, а эмергентность признаков. Пренебрежение этим фактом ведёт к тому, что растительность внутри синтаксонов недостаточно охарактеризована, либо число синтаксонов неоправданно велико.

Используемые классификации не годятся для количественного представления выраженности тех или иных синтаксонов, что является тормозом для изучения структуры и динамики растительности. Требуется метод разделения растительного покрова на математически формализованные единицы.

2. Методы формализованной классификации

Предлагаемый метод классификации растительности построен на обобщённом математическом аппарате теории множеств. Характеристика синтаксонов базируется на теории нечётких множеств (Заде, 1976).

Растительное сообщество представляет собой конечную группу, в связи с чем, признается дискретность пространственных границ. В тоже время, растительное сообщество не является примером непрерывного множества, поэтому описать его границу непрерывной, всюду дифференцируемой кривой невозможно. Таким образом, пространственные границы дискретны, но средствами эвклидовой геометрии выразить их невозможно (псевдоконтинуум).

Пространственные границы формализованы как мажорирующий контур растений. Если представить, что для каждой клетки растения характерны три координаты положения и координата времени, то мажорирующий контур будет проходить через клетки с максимальным значением координат. В самом простом случае это будет контур с параметрами равными максимальной высоте, длине и ширине растения, изменяющийся со временем, но сохраняющийся до момента гибели последней особи. В общем же случае, мажорирующий контур представляет собой объект с фрактальными границам.

Биологической основой новой классификации является трансформированный эколого-доминантный метод разделения растительного покрова (Александрова, 1969). Наличие эдификаторных свойств разной силы предполагается у всех особей сообщества. Основанием для выделения единиц растительности является степень обилия видов или групп видов. Она выражается через объем, занимаемый видами в пространстве (заполненность мажорирующего контура).

3. Единицы формализованной классификации

Основной единицей растительного покрова является **специалитет** – группа растений одного вида, целиком занимающая в пространстве объём своего мажорирующего контура.

Каждый специалитет обладает свойством истинности, выражающим степень его принадлежности к тому или иному синтаксону. Истинность характеризует степень заполненности мажорирующего контура органами растений. Примером абсолютно истинного специалитета (истинность равна 1) можно считать накипной лишайник *Rhizocarpon geographicum* (L.) DC. Большинство специалитетов имеет значительно меньшую истинность. Так расчётная истинность еловых специалитетов на Северо-Западе России составляет в среднем 0,001-0,003.

Специалитеты объединяются в группы. **Группы -** это комплекс специалитетов в границах мажорирующего контура доминантного специалитета. Во многом этот класс напоминает эколого-ценотическую группу или тип леса в лесной типологии (Федорчук и др., 2005). В естественных лесах Северо-Запада России встречаются лишайниковая, кустарничковая, мелкотравная, неморальная, сфагновая, багульниковая, долгомошная, болотнотравяная, таволжная и приручейная группы (Голубев, 2012). Луга представлены насыпной, влажнозлаковой, злаковой и травяной группами (на основе данных: Нешатаев, Егоров, 2006). Поскольку мажорирующие контуры специалитетов (в том числе доминирующих) пересекаются, зачастую наблюдается пересечение групп.

Группы формируют формы. **Формы** — комплекс групп, занимающих в пространстве объем, ограниченный мажорирующим контуром групп с единой жизненной формой доминантов. Выделены древесные, кустарниковые, кустарничковые, травяные, моховые, лишайниковые, водорослевые, лиановые, подушковые и гетеротрофные формы.

4. Выводы. Формализованное представление синтаксонов

Таким образом, если особь вида s одновидового сообщества S={s1, s2, s3,..., sn} представить как множество клеток с параметрами: длина, ширина, высота, время s={(x1, y1, z1, t1) , (x2, y2, z2, t2),..., (xn, yn, zn, tn)}, то понятие специалитета можно формализовать как множество Sp={s1, s2, s3,..., sn}, такое, что:

$$\forall x \in Sp \Rightarrow x \leq x_{max},\ \forall y \in Sp \Rightarrow y \leq y_{max},\ \forall z \in Sp \Rightarrow z \leq z_{max},\ \forall t \in Sp \Rightarrow t \leq t_{max}.$$

Понятие группы и формы растительного сообщества в формализованном виде выглядит следующим образом:

Группа — множество G={S1, S2,..., Sn}, такое, что для любого S справедливо:

$$(\sum xyz) \in S \leq (\sum xyz)_{max},$$

Форма — множество F={G1, G2,..., Gn} такое, что для любого G справедливо:

$$(\sum xyz) \in G \leq (\sum xyz)_{max}.$$

Литература

Александрова В.Д. Классификация растительности. Обзор принципов классификации и классификационных систем в различных геоботанических школах - Л.: Наука, 1969. - 275 с.

Голубев С.Н. Лесная типология на базе теории нечётких множеств / Материалы международной конференции «Современные проблемы лесного хозяйства и лесоустройства», посвящённой памяти классиков отечественного лесоводства Морозова Г.Ф. И Орлова М.М., МЦЛХП, СПБГЛТУ им. С.М. Кирова, 2012, стр. 74-75.

Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Пер. с англ.— М.: Мир, 1976. с. -167.

Нешатаев В.Ю., Егоров А.А. Разнообразие растительного покрова и его мониторинг. СПб.:СПБГЛТА, 2006. с.68

Растригин Л. А. Адаптация сложных систем. — Рига: Зинатне, 1981. — 375 с.

Федорчук В.Н., Нешатаев В.Ю., Кузнецова М.Л. Лесные экосистемы северо-западных районов России: Типология, динамика, хозяйственные особенности. – С.-Пб., 2005. с. -382.

МАТЕМАТИКО-КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭКОСИСТЕМАХ

Голубева Е.И. [1], Тульская Н.И.[2]

[1] *Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
egolubeva@gmail.com
[2] *Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
tnadyal@mail.ru

Аннотация: Рассматриваются подходы к количественной оценке продукционных процессов в экосистемах. Помимо традиционных параметров – фитомасса и продукция - предлагается использовать комплексные показатели такие как продукционный потенциал и коэффициент полезного действия использования фотосинтетически активной радиации. Проанализированы значения и пространственные закономерности этих показателей для территории России.

Один из важнейших показателей устойчивости экосистем, их роли в биогеохимических процессах – накопление органического вещества и энергии. Изменение продукционных характеристик экосистем сигнализируют о «сбоях» в системе либо под воздействием каких-либо природных факторов – похолодания, потепления, изменения уровня грунтовых вод, засоления и т.п., либо об антропогенном воздействии.

Объективная и многоплановая оценка требует учета совокупного вклада в продукционный процесс показателей запаса фитомассы и ежегодной продукции, что дает картину распространения экосистем наиболее «активных» в биосферных процессах и позволяет оценить их устойчивость. Геоинформационные технологии позволяют на основе единой базы данных разрабатывать различные комплексные параметры, интегрирующие показатели фитомассы и продукции. Для комплексной оценки продукционных процессов в экосистемах можно использовать удельный показатель - продукционный потенциал, который определяется как произведение показателей запаса фитомассы (т/га) и продукции (т/га/год) конкретной экосистемы или выдела на карте растительности, ранжированное относительно максимально (либо минимально) возможного значения этой величины. Для территории России максимальные значения продукционного потенциала (75 - 100%) характерны для горных и предгорных дубовых и дубово-грабовых лесов Северного Кавказа, европейской лесостепи и для коренных и квазикоренных широколиственных лесов, которые в совокупности занимают менее 1% от площади страны. Напротив, более половины территории России относятся к экосистемам с минимальными значениями продукционного потенциала (менее 10% от максимально возможного).

В условиях интенсивного хозяйственного освоения территорий значения показателей, характеризующих продукционные процессы, позволяют их ранжировать по степени антропогенных преобразований экосистем и установить примерные количественные градации. Так, снижение продукционного потенциала в результате антропогенного воздействия менее, чем на 20% характеризует территории как стабильные; от 20 до 60% – как разной степени кризисные; а более, чем на 60% – как катастрофические.

Важным в оценке функционирования экосистем представляется показатель, отражающий эффективность использования растительным покровом солнечной радиации - коэффициент полезного действия использования фотосинтетически активной радиации ($КПД_{ФАР}$). Он равен отношению величины продукции растительного покрова на единицу площади, выраженной в энергетических единицах (в среднем, в 1 г абс.сух. вещества заключено 16,75 кДж (или 4 ккал), к приходу фотосинтетически активной радиации на эту же площадь. До последнего времени расчет $КПД_{ФАР}$ сопровождался значительными сложностями, связанный с различиями в локализации и количественных подходах к определению продукции и фотосинтетически активной радиации (ФАР). Продукция

традиционно характеризуется с помощью количественных интервалов (от-до) для конкретного контура. ФАР же определяется в конкретных точках на метеостанциях (общее количество и плотность распространения, которых довольно низкие) с дальнейшим построением на основе методов интерполяции изолинейных карт. Однако, сейчас стало возможным использование открытой базы данных NASA SSE, которая включает большое количество различных метеохарактеристик, определяемых различными методами (натурными, дистанционными, расчетными) для точек земной поверхности, расположенных в узлах регулярной сети с шагом 1^0.

На территории России величина $КПД_{ФАР}$ естественной растительности варьирует от менее, чем 0,1 до 2,2%, что близко к значениям $КПД_{ФАР}$ сельскохозяйственных культур. Значительное антропогенное воздействие на экосистемы (химическое, физическое и биологическое загрязнение территорий), вырубки лесов, распашки, развития эрозионных процессов, потери почвенного плодородия в целом, уничтожение коренной растительности и замена ее малопродуктивными вторичными сообществами или агроценозами ведет к снижению $КПД_{ФАР}$ и потерям экосистемами устойчивости.

Особое значение имеет анализ диапазона величин $КПД_{ФАР}$ одного и того же выдела растительности при благоприятных и неблагоприятных гидротермических условиях, которые различаются почти в два раза в зависимости от метеорологических особенностей конкретного периода – похолодания, засухи, уменьшения глубины снежного покрова и т.п.

Показатели продукционного потенциала и эффективности использования растительным покровом солнечной радиации позволяют прогнозировать процессы создания органического вещества в условиях изменения климата, антропогенного воздействия и дают важную информацию для оценки экосистемных функций территорий.

ЦИКЛ АЗОТА В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД

Голубятников Л.Л.

Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия
golub@ifaran.ru

Аннотация: Разработана модель азотного цикла для наземных экосистем. Предложенная модель в целом достаточно реалистично воспроизводит значения современных запасов и интенсивностей потоков азота в наземных экосистемах. Проведены расчеты содержания азота в наземных экосистемах при ожидаемых изменениях климата.

В разработанной модели азотного цикла наземные экосистемы представлены в виде четырех пулов азота – растительный покров, подстилка, почвенные неорганические (минеральные) соединения и органические соединения в почве. Рассматриваемые пулы азота взаимосвязаны такими потоками, как усвоение растительностью неорганического азота почвы, опад растительной органики, минерализация и гумификация органического вещества подстилки, минерализация органических соединений азота в почве. Атмосфера в модели рассматривается в виде единого хорошо перемешанного азотного пула и динамика азотных газообразных соединений в атмосфере исключена из рассмотрения. Азотные пулы наземных экосистем связаны с атмосферным его пулом посредством биологической фиксации, атмосферной фиксации и денитрификации. С материковым стоком определенное количество неорганических соединений почвенного азота поступает в морские экосистемы. В модели учитываются два антропогенных потока – внесение удобрений в наземные экосистемы, которое пополняет пул почвенных неорганических соединений азота, и выбросы азота в атмосферу, которые пополняют его атмосферный пул. Интенсивности потоков азота между модельными пулами зависят от содержания азота в них и ряда биофизических параметров. Динамика азота в рассматриваемых пулах описывается дифференциальными уравнениями.

Расчеты показали, что предложенная модель достаточно адекватно воспроизводит азотный цикл в наземных экосистемах и дает удовлетворительные количественные оценки потенциальных запасов азота в растительном покрове и почве. На основе разработанной модели получены прогнозные оценки изменения содержания азота в наземных его пулах при возможных изменениях климата в XXI веке.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН "Процессы в атмосфере и криосфере как фактор изменений природной среды"
и проекта РФФИ 12-05-01092-а

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОДРОСТА ЛЕСНОГО ЦЕНОЗА

Грабарник П.Я.[1], Алейников А.А.[2], Ефименко А. С.[2], Безрукова М.Г.[1]

[1] *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*
gpya@rambler.ru
[2] *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия.*
aaacastor@gmail.com

Аннотация: В работе проведен статистический анализ пространственного размещения подроста относительно деревьев, образующих верхний полог. Показано, что расположение особей имматурно-виргинильных состояний зависит от положения деревьев, занимающих доминирующее положение в сообществе.

В последние годы отмечается значительный интерес к анализу пространственной структуры лесных экосистем на ценотическом уровне. Этот интерес обусловлен предположением, что текущая пространственная структура и ее изменения могут пролить свет на экологические процессы, происходящие в сообществе. Трудность, связанная с таким подходом, заключается в том, что наблюдаемая пространственная организация лесного ценоза является результатом большого числа экологических процессов: разброса и успешности всхожести семян, внутривидовой и межвидовой конкуренции, скорости роста и ее зависимости от имеющихся ресурсов, в частности, от минерального питания, реакции растений на внешние воздействия и условия окружающей среды, а также стадии сукцессионного развития Часто действие различных экологических процессов разнонаправлено и, кроме того, может иметь специфические особенности на разных пространственных шкалах.

Одним из важнейших вопросов динамики лесных биогеоценозов является задача изучения процессов возобновления. Ответ на этот вопрос позволяет приблизиться к пониманию основ устойчивого развития экосистем. Одной из общепринятых концепций динамики лесного ценоза является "оконная" модель или гэп-мозаика. Основные положения этой концепции сводятся к следующему описанию этапов динамики древостоя: 1) образовании «окна» в пологе леса за счет усыхания или вывола отмершего дерева, 2) появления в «окне» многочисленного подроста 3) развитие подроста, заканчивающегося тем, что одно или несколько молодых деревьев врастают в полог, закрывая «окно», 4) отмирание оставшегося подроста (McCarthy, 2001). Таким образом, лесной покров представляется сочетанием "оконных" когорт деревьев, находящихся на разных этапах развития. В этом случае появление подроста и его развитие до стадии взрослого дерева связано в большей степени с отпадом деревьев и в меньшей степени с расположением соседних крупных деревьев. Так, в случае смешанного широколиственно-темнохвойно-кедрового леса на основе результатов дендрохронологического и пространственного анализа было показано (Ухваткина, Омелько, 2011), что расположение подроста не определяется размещением деревьев верхнего полога, а связано с существованием в прошлом «окон» в древостое.

В данной работе анализируется пространственная организация древостоя елово-пихтарника крупнопапоротникового. Биологический интерес представляет задача анализа пространственной структуры подроста, которая позволяет высказать гипотезы о процессе возобновления лесов данного типа. В отличие от широколиственно-темнохвойно-кедрового леса, пространственная организация которого изучалась в работе (Ухваткина, Омелько, 2011), концепция гэп-мозаики или "окон" возобновления в данном случае не является удовлетворительной моделью, так как процесс возобновления на открытых участках, т.е. в "окнах", образованных упавшими деревьями, тормозится из-за наличия сильного конкурента в травяно-кустарничковом ярусе. Естественным конкурентом подроста на открытых

участках является крупный папоротник *Dryopteris dilatata*, покрытие которого составляет от 80% до 100% территории, не перекрытой кронами деревьев. Биологическая гипотеза, которую мы хотели проверить, состояла в том, что расположение подроста приурочено к местам, соответствующих относительно низкому затенению кронами деревьев, при котором развитие подроста физиологически возможно. Таким образом, согласно данной гипотезе плотность подроста на периферии крон должна быть выше, чем при случайном расположении молодых деревьев, и наоборот плотность подроста на открытых участках и в областях сильного затенения должна быть ниже, чем при его случайном размещении. Для проверки данной гипотезы была построена модель затенения дерева с учетом его размерных характеристик, высоты ствола и площади кроны. Все необходимые характеристики были измерены в ходе полевых экспериментов (Алейников, Лазников, 2012). На рисунке 1 представлена карта рассчитанной освещенности, соответствующая расположению деревьев, образующих полог первого и второго ярусов.

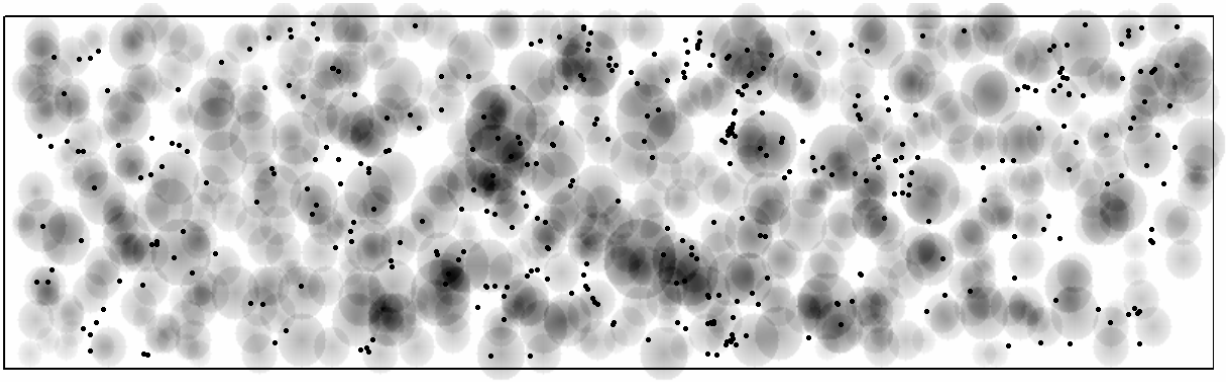


Рисунок 1 - Карта освещенности, рассчитанная по расположению деревьев, образующих верхний полог и расположение деревьев подроста.

Класс подроста был выделен по одной из размерных характеристик деревьев - диаметру ствола, который хорошо соответствует показателю онтогенетического состояния растения. Далее был рассчитан критерий хи-квадрат, который суммировал отклонения частоты встречаемости подроста в каждом из классов затенения. В качестве теоретических частот были взяты соотношения площадей классов затенения, рассчитанные по карте освещенности. Величина статистики хи-квадрат равная 13.0 при числе степеней свободы 5 соответствует p-значению 0.023. Это ведет к отклонению нулевой гипотезы о независимости расположения подроста относительно зон затенения. Кроме того, анализ отклонений хи-квадрат статистики позволяет характеризовать причины расхождения между нулевой гипотезой и данными. Наибольший вклад в статистику критерия дает малая численность подроста на открытых участках относительно ожидаемой величины, и наоборот превышение ожидаемой численности для зон с относительно низким затенением.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №12-04-01527, 12-04-33193, 13-04-01491) и гранта Президента РФ для молодых ученых (проект МК-2102.2012.4)

Литература

Алейников А.А. Лазников, А.А. Пространственная организация крупнопапоротниковых лесов в верховьях реки Печоры (Печоро-Илычский заповедник) //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. -2012.- Т. 14, № 1(5),- С.1180-1183.

Ухваткина О.Н, Омелько А.М. Структура подроста и естественное возобновление в смешанном хвойно-широколиственном лесу Южного Сихотэ-Алиня // Journal of Siberian Federal University. Biology. – 2011.-,№ 3, -С. 266-280.

McCarthy J. Gap dynamics of forest trees: A review with particular attention to boreal forests // Environmental Reviews. -2001.- Vol. 9, P. 1–59.

МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИОННОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТРАТЕГИЙ ПОВЕДЕНИЯ В ИГРЕ "КАМЕНЬ - НОЖНИЦЫ - БУМАГА"

Грабовский В.И. [1]

[1] *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия*
wgrabo@mail.ru

Аннотация: на основе клеточных автоматов построена модель эволюции тримодального распределения стратегий поведения (по типу стратегий в игре "камень – ножницы – бумага"), ключевым параметром которой является величина платы за агрессивность. Показано, что для возникновения тримодального распределения стратегий поведения в первично однородной, не дифференцированной на стратегии популяции, необходимо и достаточно, чтобы а) особи обладали достаточным потенциалом изменчивости по параметру агрессивности и б) плата за агрессивность попадала в некоторый интервал (была не слишком мала, чтобы распределение не сместилось в сторону высокоагрессивных особей, и не слишком велика, чтобы агрессивные особи имели шанс выжить).

В последнее время появляется все больше свидетельств распространенности в природе ситуаций, которые можно описать в терминах игры "камень – ножницы – бумага". Это и внутривидовые стратегии поведения, обнаруженные у ящериц родов *Lacerta* (Vercken et al., 2007)*, Uta* (Sinervo et al., 1996)*, Sceloporus* (Bastiaans et al., 2013), и динамика штаммов в популяции бактерии *Escherichia coli* (Kerr et al., 2002) и система межвидовых отношений в сообществах трав (Cameron et al., 2009) и экосистеме коралловых рифов (Buss, Jackson, 1979), и отношения между различными генотипами внутри вида и между видами у растений (Lankau et al., 2007). Сюда же, по-видимому, можно отнести известные примеры эндогенной циклической смены растительных ассоциаций в сукцессиях экосистем (Разумовский, 1981).

В общем случае игра "камень-ножницы-бумага" включает игроков с тремя стратегиями поведения: стратегией "камня" (К) побеждающей стратегию "ножницы" (Н) (камень тупит ножницы), последняя, в свою очередь побеждает "бумагу" (Б) (ножницы режут бумагу), а стратегия "бумага" побеждает стратегию "камень" (бумага обертывает камень). Иначе говоря: К=>Н, Н=>Б, Б=>К. Взаимодействия, как видно, нетранзитивны.

Было показано, что в популяции пространственно распределенных игроков устойчивое сосуществование стратегий возможно в случае, если система неперемешиваема: взаимодействия между игроками локальны – игра происходит между соседними игроками, а перемещения самих игроков ограничены. В этом случае возникает характерная пространственно – временная динамика системы: автоволны концентраций носителей разных стратегий (Reichenbach et al., 2007; Nahum et al., 2011; Sebastian et al., 2012), а сама система названа эволюционно стабильной социальной системой (ESSS) (Sinervo et al., 2007) (в отличие от Мэйнард-Смидтовских эволюционно стабильных стратегий (ESS) (Maynard Smith, 1981)). Таким образом, вопрос о необходимых условиях сосуществования стратегий более или менее ясен. Однако, вопрос об условиях эволюционного возникновения стратегий до сих пор открыт. Иными словами, могли ли возникнуть стратегии поведения игры в первично недифференцированной по поведению игроков популяции и, если да, то какие условия необходимы и достаточны для этого?

Модель

Рассмотрим гипотетическую популяцию двуполых организмов. Пусть это будут ящерицы с типичной для этой группы животных структурой брачного поселения: полигамные самцы охраняющие свои территории с гаремами. Используем для имитации клеточный автомат, в котором пространство представлено ортогональной решеткой (100*100 клеток), а время – дискретными шагами. Пусть каждая клетка автомата будет реализованной или потенциальной территорией самца. Представим также, что все самцы обладают

изменчивостью по единственному параметру – агрессивности и связанным с ней поведением (все прочие их характеристики равны). Различия в поведении самцов состоят в том, что они по-разному склонны к проникновению на соседние территории и атакам их хозяев с целью узурпации ресурса – спаривания с чужими самками. И эти различия находятся в прямой зависимости от уровня их агрессивности. А именно, самцы с максимальной агрессивностью на каждом такте времени пытаются атаковать соседей, а самцы с минимальной величиной этого параметра не делают этого никогда. Остальные склонны к атакам пропорционально величине их агрессивности:

$$P(attack) = Agr$$

где P(attack) – вероятность атаки соседа, а Agr – агрессивность особи.

Исход атаки самца агрессора зависит от уровня его агрессивности и таковой у атакуемого соседа. При уровне агрессивности атакуемого равном или выше атакующего, последний отказывается от атаки. В прочих случаях ресурс атакуемого разделяется между ним и агрессором. Атакующий несет издержки, связанные с усилиями, затрачиваемыми на атаку, риском получить повреждения и т.д.. Чем ближе по уровню агрессивности объект и субъект атаки, тем выше издержки для агрессора. Процесс отбора имитируется условием, при котором после каждого такта времени каждая особь принимает наиболее успешную стратегию из своего ближайшего окружения. В биологической интерпретации это значит, что особи вытесняются потомками наиболее успешных соседей. В целом, поддержание агрессивности имеет некоторые издержки. Именно величина платы за агрессивность и будет единственным управляемым параметром модели.

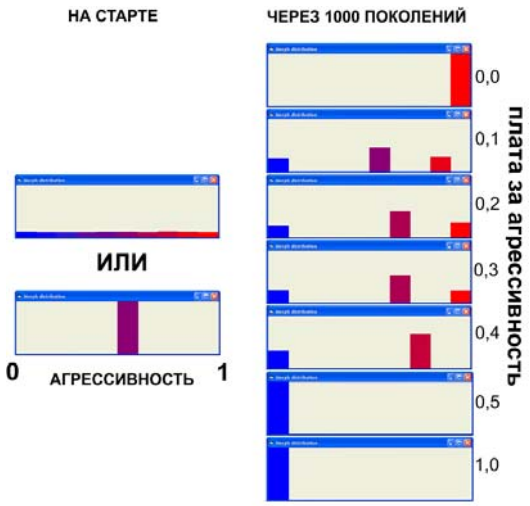


Рисунок 1 - Распределения особей по уровню агрессивности на старте и через 1000 поколений симуляции модели при разной величине платы за агрессивность.

Очевидно, что при отсутствии платы за агрессивность – все особи в популяции через 1000 тактов игры (поколений) имеют максимальную агрессивность (рис. 1). Величина платы от 0,5 до 1 приводит к тому, что все особи к концу симуляции имеют минимальную агрессивность. При величине платы за агрессивность в пределах 0,1 – 0,3 распределение по уровням агрессивности особей в популяции оказывается тримодальным независимо от стартовой позиции. То есть, из мономодального* или униформного распределения особей по уровню агрессивности на старте, через некоторое время в популяции наиболее успешными оказываются особи с одним из трех уровней агрессивности и соответствующим характером поведения, который уже можно назвать стратегией поведения.

* в модели предусмотрены мутации, с заданной вероятностью изменяющие на каждом шаге времени уровень агрессивности особи на заданную величину

Таким образом, для того, чтобы в популяции животных возникли 3 стратегии поведения с нетранзитивными отношениями между ними (по принципу игры "камень-ножницы-бумага") необходимо и достаточно, чтобы плата за агрессивность и сопутствующее ей поведение попадала в некоторый интервал значений, составляющий около 30% от всего возможного диапазона (от 0 до 1). Поэтому, можно ожидать, что распространенность такого феномена в природе значительно шире, чем принято считать.

Литература

Разумовский С.М. Закономерности динамики биоценозов. – Наука, 1981.

Bastiaans E., Gen M., Gamaliel J., Castaceda G., Marshall J.C., Sinervo B. Male aggression varies with throat color in 2 distinct populations of the mesquite lizard // Behavioral Ecology first published online February 21, 2013 doi:10.1093/beheco/art010

Buss L.W., Jackson J.B.C. Competitive Networks: Nontransitive Competitive Relationships in Cryptic Coral Reef Environments // The American Naturalist, 1979, 113 (2), 223-234

Cameron D.D, White A., Antonovics J. Parasite-grass-forb interactions and rock-paper-scissor dynamics: Predicting the effects of the parasitic plant Rhinanthus minor on host plant communities // J. Ecol., 2009, 97:1311–1319.

Kerr B., Riley M.A., Feldman M.W., M. Bohannan B.J. Local dispersal promotes biodiversity in a real-life game of rockpaper-scissors // Nature, 2002, 418:171–174.

Lankau R.A., Strauss S.Y. Mutual feedbacks maintain genetic diversity and species diversity in a plant community // Science, 2007, 317:1561-1563.

Maynard Smith J. Evolution and the theory of games. Cambridge University Press, Cambridge, 1982.

Nahum J.R., Harding B.N., Kerr B. Evolution of restraint in a structured rock-paper-scissors community // Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108:10831-10838.

Reichenbach T., Mobilia M., Frey E. Mobility promotes and jeopardizes biodiversity in rock–paper–scissors games // Nature, 2007, 448, 1046–1049.

Schreiber S.J., Killingback T.P. Spatial heterogeneity promotes coexistence of rock-paper-scissor metacommunities // arXiv:1207.0485 [q-bio.PE], 2012. http://arxiv.org/abs/1207.0485

Sinervo B., Heulin B., Surget-Groba Y., Clobert J., Miles D.B., Corl A., Chaine A., Davis A. Models of density-dependent genic selection and a new rock-paper-scissors social system // Am Nat., 2007, 170:663–680.

Sinervo B., Lively C.M. The rock-paper-scissors game and the evolution of alternative male strategies // Nature, 1996, 380:240–243.

Vercken E., Massot M., Sinervo B., Clobert J. Colour variation and alternative reproductive strategies in females of the common lizard Lacerta vivipara // Journal of Evolutionary Biology, 2007, 20: 221-232.

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ТЕРСКО-КУМСКОЙ НИЗМЕННОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЦИКЛОВ ЗАТОПЛЕНИЯ

Джалалова М.И., Осипова С.В.

Прикаспийский Институт биологических ресурсов ДНЦ РАН, Махачкала, Россия
d.marina.66@mail.ru

Аннотация: текст аннотации оформляется шрифтом Times New Roman, 10 пт., обычный, выравнивание текста по ширине, междустрочный интервал – одинарный, абзацные отступы слева и справа – по 1 см, отступ перед абзацем – 12 пт. Объем текста аннотации не должен превышать 50 слов.

Прибрежная полоса, или литоральная зона - очень динамичная система, изменяющая свое положение и нередко размеры в зависимости от изменения уровня Каспийского моря. Неустойчивость береговой линии, связана с изменениями уровня воды в Каспийском море (Алиев Н.-К. К., Абдурахманов Г.М. и др.). Считается, что наблюдающийся с 1978 года процесс повышения уровня моря было обусловлен главным образом увеличением речного стока и уменьшением испарения. В 2000г. уровень моря понизился примерно на 30см, а к 2002г. стабилизировался и в настоящее время находится на отметке около -27м. Смены растительности, происходящие под влиянием наступления Каспия, связанные с затоплением, подтоплением и засолением почво-грунтов, относятся к категории гидрогенных и галогенных, обусловленные внешними факторами (Кулешова Л.В.). Интерес представляет изучение влияния этого фактора в зоне прямого действия с преобладанием в растительном покрове гидрофильных фитоценосистем.

Гидрофильная флора литорали представляет сочетание нескольких структурных типологических комплексов. Центральное место в ней занимает собственно водная флора – гидрофитон). Очень большая группа видов, нередко называемых полупогруженными (тростник, камыш озерный, рогозы и др.), а также можно выделить в комплекс гигрогалофитона. Виды засоленных болот или гелофиты относятся к комплексу палюдофитона. На сыром аллювии и в прибрежьях с переменным уровнем характерна группа видов, экогенетически связанных с сырыми песками – псаммогалогигрофитон (Краснова А. Н).

Таким образом, представление о типологической разнокачественности того, что подразумевается под гидрофильной флорой должно быть определяющим, а соответствующие термины - гидрофитон, гигрогалофитон и другие - базовыми понятиями. Систематическая структура гидрофитона литорали представлена 41 видом. Комплекс гигрогалофитона объединяет растения того же экологического фактора. Виды этой группы еще называют воздушно-водными или полупогруженными (тростник, камыш озерный, рогозы и др.)

Частое затопление прибрежной территории, так и отступание воды, обнажения его дна, позволяют четко во времени проследить за изменениями, происходящими в смене растительности (Свиточ А.А., Кулешова Л.В.).

Наибольшее внимание уделяется ценотической структуре и динамике растительности приморских районов, В экологическом ряду водно - болотная растительность по увеличению градиента обводнения занимает самые нижние уровни, прилегающие к Каспию. Верхняя граница фиксируется пределом сплошного распространения сообществ - Pragmiteta, Typheta, Scirpeta. Грунты топкие, представлены песками, супесями, мелкой разбитой ракушкой, суглинками. Сама литораль изрезано заливами, бухтами, большими и малыми плесами, лиманами. Этот тип растительности представлен классами формаций погруженной и плавающей растительности.

Погруженная растительность сложена формациями рдеста гребенчатого (*Potamogetoneta pectinati)*, рдеста курчавого (*Potamogeton crispus),* урути колосистой и мутовчатой *(Myriophyllum spicatum*, *M. verticillatum),* роголистника погруженного (*Ceratophyllum demersum*). Растительность с плавающими на поверхности воды листьями– формациями сальвинии плавающей (Salviniet natantis), рдеста плавающего (*Potamogetoneta natantis*).

Воздушно-водная растительность представлена формациями тростника южного (*Phragmiteta australis*), камыша озерного (*Scirpeta lacustris*), рогоза узколистного (*Typheta angustifoliae*), рогоза Лаксмана (*Typheta laxmannii*), клубнекамыша морского (*Bolboschoenus maritimus*), сусака зонтичного (*Butometa umbellati*), частухи подорожниковой (*Alismateta plantago-aquaticae*). Галофильная растительность включает сообщества солончаков и засоленных лугов. Представлена классами формаций настоящей солончаковой растительности *Salicornieta europaeae, Suaeda prostratae, Salsoeta sodae, Halimioneta pedunculatae* и засоленных лугов *Puccinellieta giganteae, Aeluropeta littoralis.*

Обобщенный эколого-ценотический ряд по градиенту увеличения обводнения для пресноводного комплекса имеет следующий вид: *Alisma plantago-aquatica* → *Butomus umbellatus* → *Typha angustifolia* → *Phragmites australis* → *Scirpus lacustris* → *Potamogeton natans* → *Potamogeton crispus* → *Potamogeton pectinatus*; для галогидрофильного: *Bolboschoenus maritimus* → *Typha laxmannii* → *Phragmites australis* → *Scirpus tabernaemontani* → *Ruppia spiralis* + *R. maritima* + *Najas minor* → *Zostera noltii*.

Приведенные эколого-ценотические ряды соответствуют двум флороценотическим комплексам: пресноводному гидрофильному и его галогидрофильному аналогу.

Для галогидрофильного комплекса трансгрессия Каспия расширяет возможности реализации преадаптационных возможностей видов, что в первую очередь касается погруженных форм, в их числе и *Potamogeton pectinatus*. Безусловно, с повышением уровня краевые популяции, занимающие самые низкие уровни, отмирают. Однако одновременно идет заселение и освоение формирующихся мелководий. Иная картина с формациями воздушно-водной растительности, обладающими меньшей стратегией. Подъем Каспия приводит к постепенному отмиранию сообществ, что выражается в угнетенности и изреженности травостоя. Их формирование на вновь образованных экотопах происходит заново за счет имеющегося автохтонного материала (небольшие по площади сообщества или пятна растительности в микропонижениях на более высоких гипсометрических уровнях) или путем приноса аллохтонного материала (семена, обрывки корневищ, вырванные и принесенные ветром и волнобоем куски сплавин).

Пресноводный гидрофильный комплекс подвержен более существенным изменениям. Подъем Каспия приводит к деградации ценозов воздушно-водной растительности. Их развитие на формирующихся экотопах начинается заново. Из других сообществ почти полностью исчезают очень уязвимые реликтовые ценозы *Trapeta natantis*. Несколько меньше деградирует погруженная растительность - *Myriophylleta spicati, Ceratophylleta demersi.*

Последовательное увеличение продолжительности затопления привело к смене водной и водно-болотной растительности *(Salicornia europaea, Phragmites australis, Puccinellia gigantean)* к лугово-солянковым комплексам *(Halimione verrucifera, Frankenia hirsuta, Halocnemum strobilaceum).*

Структурные особенности прибрежной растительности показывают высокую степень адаптации растений к постоянно изменяющейся природной обстановке (Сулейманова М.И.). Развитие гидрофильной флоры Кизлярского залива в плейстоцене проходило в жестких аридных условиях с отбором популяций, адаптированных к минерализованным водоемам. По-видимому, из-за нестабильного уровня Каспия аллохтонные элементы преобладали над автохтонными. В настоящее время вследствие повышения уровня Каспия происходит

ослабление роли пресноводного флористического комплекса и усиление роли галогидрофильного.

Литература

Алиев Н.-К. К., Абдурахманов Г.М., Мунгиев А.А., Гаджиев А.А. Экологические проблемы бассейна Каспия. Махачкала: «Дагпресс», 1997. 160.

Краснова А.Н. Структура гидрофильной флоры техногенно трансформированных водоемов Северо-Двинской водной системы. Рыбинск: ОАО «Рыбинский Дом печати», 1999. 200 с.

Кулешова Л.В. Очаговые изменения растительности на побережье Каспийского моря как индикатор трансформации среды // Микроочаговые процессы-индикаторы дестабилизированной среды. М.: РАСХН, 2000. С. 138-149.

Свиточ А.А., Кулешова Л.В. Геоэкологическая зональность на участках затопления российского побережья Каспийского моря // Доклады РАН. 1994. Т.339. №1. С. 77-79.

Сулейманова М.И. Динамика растительности приморской полосы Терско-Кумской низменности при различных циклах затопления // Аридные экосистемы. 2002. Т.8. №17. С. 25-30.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕКСАГОНАЛЬНО-РАСТРОВЫХ ЦМР В ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Дмитрук Ю.М.[1], Черлинка В.Р.[2]

Национальный университет им. Ю. Федьковича, Черновцы, Украина
dmytruky@i.ua[1], cherlinka@gmail.com[2]

Аннотация: Обоснована необходимость использования гексагонально-растровых цифровых моделей рельефа в почвенно-экологических исследованиях и описаны методы их получения. Показано визуальное соответствие базовых морфологических элементов рельефа в ортогональных и гексагональных типах ЦМР. Акцентировано, что исследования пространственно-временной изменчивости почвенного покрова, эрозии почв, распределения вещества и энергии на основе растрово-гексагональных ЦМР повысят уровень их точности.

Развитие почвенно-экологических исследований на данный момент времени тесно связано с использованием теоретических и практических достижений целого ряда наук: биологии, химии, физики, геоинформационных систем, ДЗЗ и т.д. Объединяющим началом как в почвенной так и экологии вообще считаем цифровое моделирование рельефа, которое позволяет решать широкий круг вопросов. Созданная цифровая модель рельефа (ЦМР) служит базой для оценки перераспределения потоков вещества и энергии как в пределах локальной экосистемы, так и эколандшафта в целом. При этом учет влияния комплекса природных и антропогенных факторов невозможен без обобщения данных о поверхностном стоке, качественные показатели которого зависят от типа и качества ЦМР (Шарый, 2006; Balázsik, Engler, Mélykúti, 2012). Последнее также непосредственно влияет на точность выделения базовых морфометрических величин (Wood, 1996; Shary, Sharaya, Mitusov, 2002).

Поскольку расчет прогнозируемых линий стока с использованием цифровых моделей рельефа на основе нерегулярной сети треугольников (TIN-модели) недостаточно точен, появились разработки в методологии построения альтернативных растровых ЦМР, которые коренным образом улучшили возможности их практического применения, в частности в гидрологических и, соответственно, в экологических приложениях (Li, Zhu, Gold, 2005; Brimicombe, 2010).

Наиболее распространенные ортогональные GRID-модели рельефа при гидрологических расчетах используют базовый алгоритм D-8 (O'Callaghan, Mark, 1984) в различных современных модификациях. Однако модели такого типа другой размерности, в частности модель на основе множества регулярно расположенных ячеек в форме гексагонов (ISO 19123:2005), имеют ряд безусловных преимуществ. Так, отсутствует неясность относительно определения дистанций, поскольку центры всех шести соседних ячеек находятся на одинаковых расстояниях от центра супергексагона, что позволяет минимизировать погрешности и точнее описывать вероятности перераспределения потоков (Endreny, Wood, 2003; Sousa et al., 2006).

При описании рельефа, согласно J.D.Wood (1996), наиболее широко используется набор базовых морфометрических характеристик, а именно: плоскость (plane), канал (channel), хребет (ridge), седловина/перевал (pass), вершина (peak) и углубление (pit). Их визуальное соответствие в ортогональной и гексагональной типах ЦМР показано на рис. 1. Вопросы идентификации и математического описания этих характеристик и их производных разных порядков в ортогональной системе координат нашли решение в ряде работ (Wood, 1996; Shary, Sharaya, Mitusov, 2002; Флоринский, 2010).

Наиболее коректным способом создания гексагональной ЦМР считаем ее генерирование из предварительно дигитализированных горизонталей или получение при ДЗЗ с использованием гексагональных датчиков. Поскольку распространение последних еще недостаточно, а количество уже разработанных ортогональных ЦМР достаточно велико,

возможно получение гексагональной ЦМР из ортогональной путем передискретизации или ресемплинга. Поскольку ЦМР в общем случае представляется графическим файлом в формате TIFF или GeoTIFF, разработанные подходы в сфере обработки изображений применимы, с небольшими изменениями и для решения рассматриваемой проблемы.

Использование гексагонально-растровой ЦМР в почвенно-экологических исследованиях даст возможность получать более корректные морфометрические, гидрологические и другие показатели. Таким образом, исследование пространственно-временной вариабельности почвенного покрова, эрозии почв, распространения поллютантов и оценка экологических рисков производств выйдет на высший уровень достоверности и реалистичности.

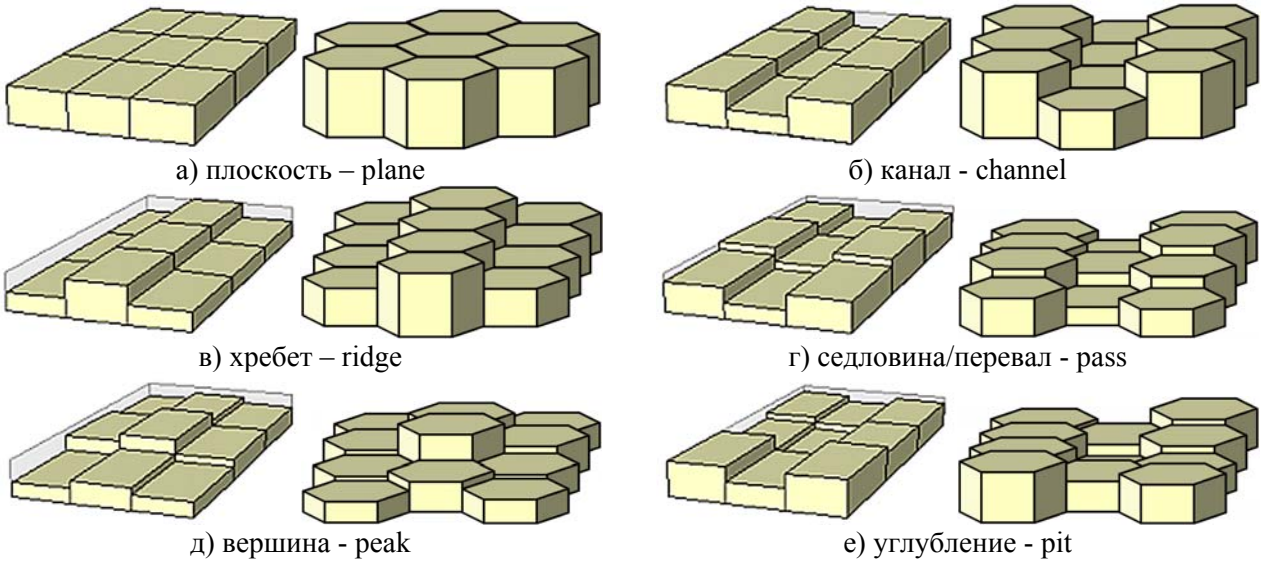


Рисунок 1 – Отображение базовых морфологических элементов рельефа в ортогональных (Wood, 1996) и гексагональных типах ЦМР

Литература

Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа: Автореф. дис… д-ра техн. наук. – М., 2003. – 42 с.

Шарый П.А. Геоморфометрия в науках о земле и экологии: обзор методов и приложений // Известия Самарского НЦ РАН. – Серия Биология. – 2006. – Т.8. – №2. – С. 458-473.

Balázsik V., Engler P., Mélykúti G. Applications of the Terrain Models in the Urban Eco-environment. International Scientific Conference on Sustainable Development & Ecological Footprint. March 26-27. 2012. Sopron, Hungary. – pp. 1-7.

Brimicombe A. GIS, Environmental Modeling and Engineering. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 376 p.

Endreny T.A., Wood E.F. Maximizing spatial congruence of observed and DEM-delineated overland flow networks // International Journal of Geographical Information Science. - 2003. - Vol. 17. - №7. - pp. 699-713.

ISO 19123:2005(E). Geographic information – Schema for coverage geometry and functions. International standart. First edition. Geneva: ISO, 2005. - 65 p.

Li Z., Zhu Q., Gold C. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. - Boca Raton: CRC Press, 2005. - 319 p.

O'Callaghan J.F., Mark M.D. The extraction of drainage networks from digital elevation data // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. - 1984. - Vol. 28, Iss. 3. - pp. 323-344.

Shary P.A. Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. – 2002. – V. 107. – N.1 2. – pp. 1-32.

Sousa L., Nery F., Sousa R. Matos J. Assessing the accuracy of hexagonal versus square tilled grids in preserving DEM surface flow directions // Proceedings of the 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences (Ed. by M. Caetano and M. Painho). - Lisbon: Instituto Geográphico Português, 2006. - pp. 191-200.

Wood J.D. The geomorphological characterisation of digital elevation models. PhD Thesis. – University of Leicester, UK, 1996. – 185 p.

МОДЕЛЬ ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФЛУКТУИРУЮЩИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ХИМИЧЕСКОГО И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА РЕЧНОЙ ВОДЫ

Долгоносов Б.М., Корчагин К.А.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия
borismd@aqua.laser.ru

Аннотация: Показано, что распределения вероятностей значений гидрохимических и микробиологических показателей подчиняются логнормальному закону, который проверен на данных многолетнего мониторинга качества воды в р. Москве (Рублево). Установлено, что сезонная зависимость параметров приводит к расщеплению распределений преимущественно на две логнормальные ветви, одна из которых отвечает меженным периодам, а другая – паводкам.

Разработана модель для нахождения распределения вероятностей концентраций примеси в речной воде. В основе модели лежат балансные соотношения для примеси и воды в масштабе всего водосбора. Из этих соотношений выводится уравнение для концентрации примеси в замыкающем створе реки. Далее учитывается случайный процесс выпадения осадков, который может быть аппроксимирован белым шумом. В результате уравнение для концентрации примеси становится стохастическим. Затем на основе вероятностных представлений строится уравнение Фоккера–Планка для плотности вероятности. Его решение приводит к логнормальному закону распределения концентраций. Агрегирование параметров этого распределения позволяет уменьшить их число с четырех до двух. Найденное двухпараметрическое логнормальное распределение имеет вид $F(x) = \Phi(\alpha \ln x - \beta)$, где Φ – стандартное нормальное распределение (с нулевым средним и единичной дисперсией), α, β – параметры, зависящие в общем случае от сезона.

Полученный закон распределения используется для обработки многолетних временных рядов расхода воды и показателей качества воды р. Москвы (Рублево), среди которых гидрохимические показатели (мутность, цветность, перманганатная окисляемость, щелочность, хлориды) и бактериальные показатели (общее микробное число, колиформные бактерии, фекальные стрептококки). Во всех случаях логнормальный закон распределения выполняется с удовлетворительной точностью, причем параметры распределений отличаются для разных сезонов, приводя к расщеплению распределений на несколько логнормальных ветвей (рисунок 1). Чаще всего расщепление происходит на две ветви, одна из которых соответствует меженным периодам, а другая — паводкам. Исключения составляют такие показатели, как мутность и цветность. Распределение для мутности расщепляется на три логнормальные ветви, одна из которых отвечает зимней межени, другая — летнему периоду с умеренными дождями, а третья — половодьям и интенсивным дождям. Для цветности получается единое для всех сезонов логнормальное распределение без расщепления на ветви.

По расходу воды и гидрохимическим показателям результаты таковы. Расход воды изменяется в интервале 3–750 м^3/с. Имеются две логнормальные ветви распределения, переход между которым происходит в точке 21.5 м^3/с. Верхняя ветвь соответствует дождевым паводкам и половодьям, нижняя – меженным периодам. Мутность варьирует в интервале 1–80 мг/л. Это единственный случай, когда можно различить три логнормальные ветви распределения, переходы между которыми происходят в точках 2.28 и 11.4 мг/л. Самая нижняя ветвь отвечает зимнему периоду, средняя – летнему, а верхняя – половодьям и сильным дождям. Цветность (10–100 град) имеет только одна ветвь, охватывающая все сезоны. Для перманганатной окисляемости (3–15 мгО/л) переход между двумя ветвями распределения происходит в точке 5.90 мгО/л. Щелочность (1.5–5 мг-экв/л) в москворецкой воде обусловлена в основном карбонатами и гидрокарбонатами. Видны две четко выраженные логнормальные

ветви с переходом между ними в точке 3.15 мг-экв/л. Нижняя ветвь отвечает половодьям и сильным дождям, а верхняя – меженным периодам. Хлориды (6–30 мг/л) имеют низкий естественный фон. Переход между двумя ветвями распределения происходит в точке 13.0 мг/л. Верхняя ветвь отвечает ранней фазе снеготаяния и выпадения дождей, когда вода обогащается накопленными на водосборе хлоридами. Нижняя ветвь характерна для поздней фазы этих явлений, когда вымываются оставшиеся хлориды.

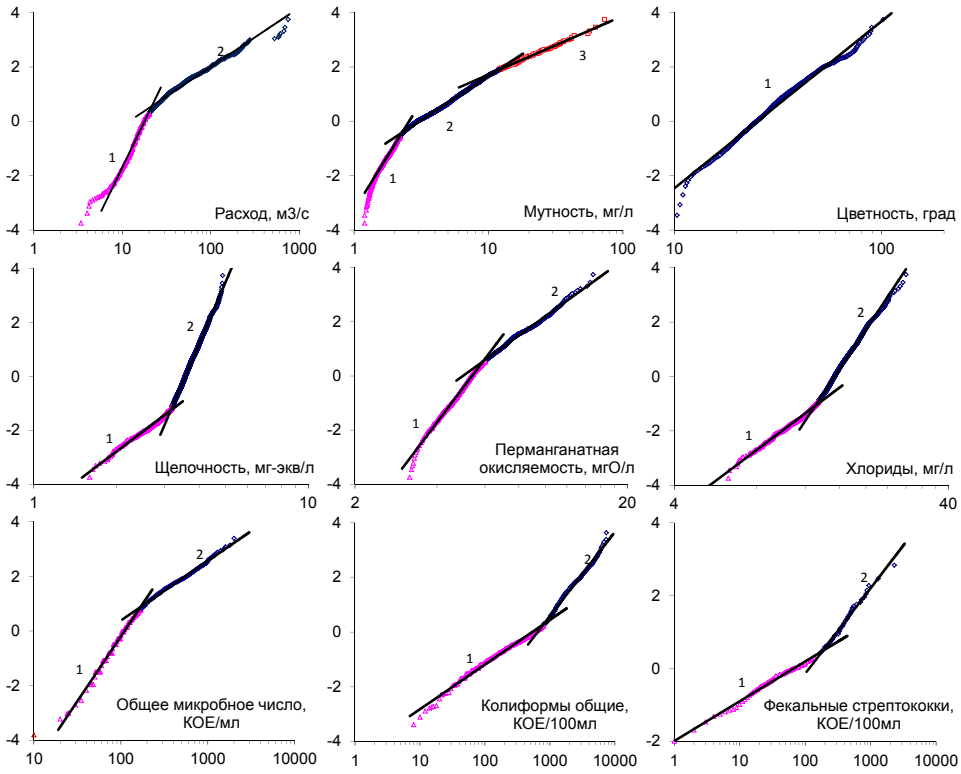


Рисунок 1 - Функции распределения расхода и показателей качества речной воды.

По бактериологическим показателям ситуация такова. Общее микробное число большую часть времени держится на уровне 100 КОЕ/мл. Во время дождей повышается до нескольких сотен. Наибольший рост происходит на пике половодья – до 2000 ед. за счет вымывания почвенных бактерий талыми водами. Интервал изменения 20–2000 ед. Распределение состоит из двух ветвей, пересекающихся в точке 168 ед. Нижняя ветвь отвечает меженным периодам, а верхняя – половодьям и дождям. Колиформы (общий счет 10–8000 КОЕ/100мл) в москворецкой воде представлены преимущественно термотолерантными видами. В летнюю межень колиформы присутствуют в небольших количествах, обычно до нескольких сот единиц, и лишь в периоды дождевых паводков кратковременно повышаются до 1000 ед. В зимний период, несмотря на низкую температуру воды, численность бактерий на один–полтора порядка выше, чем летом. Наиболее высокие максимумы попадают на половодья, когда талые воды смывают бактерий с поверхности водосбора. В эти периоды численность колиформ в речной воде приближается к 8000 ед. Распределение численностей имеет две логнормальные ветви, которые пересекаются в точке 804 ед. Нижняя ветвь отвечает летне-осеннему периоду, верхняя – зимне-весеннему, включая половодье. Фекальные стрептококки варьируют в интервале 1–2500 КОЕ/100мл. В летнюю межень присутствуют в речной воде в небольших количествах, обычно не более нескольких десятков единиц. Во время дождей их содержание повышается. Зимой численность стрептококков держится на высоком уровне – от нескольких сот до тысячи единиц. В периоды половодья отмечаются максимумы числен-

ности. Имеются две логнормальные ветви распределения, пересекающиеся в точке 183 ед. Нижняя ветвь характерна для летнего сезона, а верхняя – для зимы и половодий.

Полученные статистические распределения позволяют находить вероятности различных, в том числе экстремальных, гидрохимических и микробиологических событий.

СУТОЧНЫЙ ХОД ПОТОКОВ CO_2 В СИСТЕМЕ ПОЧВА-РАСТИТЕЛЬНОСТЬ-АТМОСФЕРА

Дюкарев Е.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия
egor@imces.ru

Аннотация: Представлены результаты наблюдений за потоками CO_2 с помощью автоматизированной системы мониторинга с прозрачной камерой на злаково-разнотравном лугу. Использование простейшей модели позволило получить отдельные оценки для дыхания почвы и растений и для фотосинтетической ассимиляции углерода.

Потоки углекислого газа (CO_2) в наземных экосистемах являются результатом многих биологических процессов. Ассимиляция углерода в процессе фотосинтеза, дыхание растений, отмирание частей растений и эмиссия углекислого газа почвой являются основными потоками CO2 в системе почва – растительность – атмосфера.

Измерения потоков CO_2 проводились на наблюдательной площадке Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН в г. Томске (Россия) в апреле и июле 2012 г. и мае, июле 2013 г. Растительность на наблюдательной площадке – злаково-разнотравный луг, почва – серая суглинистая. Потоки CO_2 измерялись с помощью автоматической системы Li-Cor 8100 (США) и прозрачной камеры. Время экспозиции составляло 5 минут, периодичность измерения – 30 минут. Измерение температуры почвы и воздуха, суммарной солнечной радиации и атмосферного давления проводилось ежеминутно с использованием автоматической метеорологической системы АМИС (ИМКЭС СО РАН).

Получено что поток CO_2 имеет четкий суточный ход с максимумом в ночное время и минимум в дневное время. Максимальные значения потока в ночное время составили 7,8 μмоль/м^2/с. Отрицательные значения потока в дневное время показывают, что ассимиляция CO_2 растениями внутри камеры выше, чем дыхание почвы. Минимальные значения потока (-4,2 μмоль/м^2/с) наблюдались 19 августа 2012 г.

Для описания наблюдаемых закономерностей изменения потоков CO_2 была предложена простая модель, в которой суммарный экосистемный обмен (NEE) складывался из дыхания почвы (R), дыхания растений (H) за вычетом ассимиляции углекислого газа в процессе фотосинтеза.

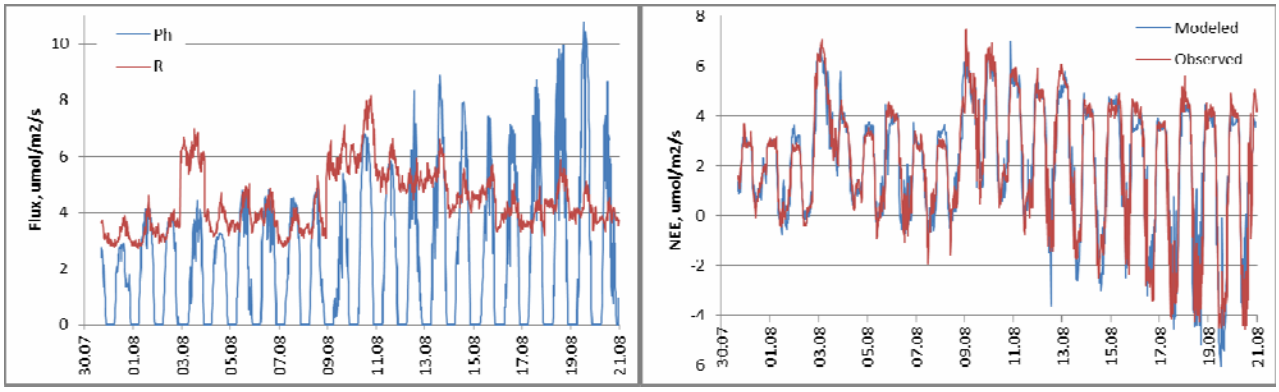
$$NEE = (R + H) - Ph.$$

Основным определяющими факторам в модели были температура почвы и суммарная солнечная радиация.

$$(R + H) = R_0 exp(k_R T), \quad (1)$$

$$Ph = \frac{\alpha I \cdot P_m}{\alpha I + P_m}. \quad (2)$$

Дыхание почвы и растений объединены в один поток и зависят от температуры поверхности почвы (T). Фотосинтез определяется суммарной солнечной радиацией (I). Эмпирические коэффициенты модели (R_0, k_R, α, P_m) оценивалась для каждых суток наблюдения минимизацией расхождения между результатами моделировании и наблюдений. Сначала находились значения коэффициентов для почвенного дыхания (1), для чего использовались наблюдения в ночное время (при I < 20 Вт/м^2), а затем определялись коэффициенты в уравнении (2) с использованием наблюдений в дневное время.



а) б)

Рисунок 1 – а) Результаты расчета величины фотосинтеза (Ph), дыхания почвы и растений (R); б) Суточные вариации NEE с 30 июля до 21 августа 2012 г. данные наблюдений (Observed) и моделирования (Modeled).

Таблица 1 – Средние значения потоков CO_2 в апреле и августе 2013 (μмоль/м^2/с).

	Апрель 2012	**Август 2012**
Дыхание почвы и растений (модель)	2,57	4,40
Фотосинтез (модель)	2,19	2,32
NEE (модель)	0,38± 1.85	2,08 ± 2.43
NEE (наблюдения)	0,49±2.10	2,14 ± 2.49

На рисунке 1 приведен временной ход модельных значений потоков фотосинтетической ассимиляции и дыхания почвы для июля 2012 г., а так же сравнительный ход суммарных потоков (NEE) расчетного и наблюдаемого. Сравнение средних значений потоков для каждого периода (таблица 1) показывает хорошее согласие данных измерений и моделирования. Кроме того, использование простейшей модели позволило получить отдельные оценки для дыхания почвы и растений и для фотосинтетической ассимиляции углерода для каждого периода исследования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ОТБОРА В ПОПУЛЯЦИИ С ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРОЙ

Жданова О.Л.[1], Фрисман Е.Я.[2]

[1]*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия*
axanka@iacp.dvo.ru
[2]*Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия*
frisman@mail.ru

Аннотация: исследуются режимы динамики генетической структуры и численности популяции с двумя возрастными классами, в которой основные популяционные характеристики определяются на генетическом уровне. Показано, что эволюционный рост репродуктивного потенциала и выживаемости сопровождается усложнением динамики численности популяции; в случае антагонистической плейотропии рост одного из этих параметров, как правило, сопровождается закономерным уменьшением другого.

1. Введение

Рассмотрение даже достаточно простой модельной ситуации, когда популяцию составляют две возрастные группы, а ее экологические параметры определяются генетически с учетом Менделевских законов наследования, позволяет заглянуть внутрь эволюционных процессов и выявить ряд неочевидных внутренних свойств, присущих эволюции структурированной популяции, которые остаются неосвещенными в рамках сугубо экологического моделирования.

2. Модель

Разработана и исследована модель динамики генетической структуры и численности популяции с отбором по выживаемостям как в репродуктивной, так и дорепродуктивной группе (1):

$$\begin{cases} x(n+1) = \overline{w} y(n) \\ q_{AA}(n+1) = w_{AA}(p_{AA}(n) + \frac{1}{2} p_{Aa}(n))^2 / \overline{w} \\ q_{Aa}(n+1) = 2w_{Aa}(p_{AA}(n) + \frac{1}{2} p_{Aa}(n))(1 - p_{AA}(n) - \frac{1}{2} p_{Aa}(n)) / \overline{w} \\ y(n+1) = (1 - x(n))x(n) + \overline{c} y(n) \\ p_{AA}(n+1) = \dfrac{(1-x(n))x(n) q_{AA}(n) + y(n) c_{AA} p_{AA}(n)}{(1-x(n))x(n) + \overline{c} y(n)} \\ p_{Aa}(n+1) = \dfrac{(1-x(n))x(n) q_{Aa}(n) + y(n) c_{Aa} p_{Aa}(n)}{(1-x(n))x(n) + \overline{c} y(n)} \end{cases} \quad (1)$$

где $x(n)$ и $y(n)$ – численности дорепродуктивной и репродуктивной группы n-ого поколения соответственно, $q_{ij}(n)$ и $p_{ij}(n)$ – частоты ij-ого генотипа в дорепродуктивной и репродуктивной группе n-ого поколения; $\overline{c}(n) = c_{AA} p_{AA}(n) + c_{Aa} p_{Aa}(n) + c_{aa} p_{aa}(n)$ - средняя выживаемость половозрелых особей n-ого сезона размножения при переходе к следующему сезону,

$$\overline{w}(n) = w_{AA}(p_{AA}(n) + \frac{1}{2} p_{Aa}(n))^2 + 2w_{Aa}(p_{AA}(n) + \frac{1}{2} p_{Aa}(n))(1 - (p_{AA}(n) + \frac{1}{2} p_{Aa}(n))) + + w_{aa}(1 - (p_{AA}(n) + \frac{1}{2} p_{Aa}(n)))^2$$

- средняя приспособленность зародышей; c_{ij} и w_{ij} – коэффициенты приспособленности ij-ого генотипа.

Рассматривается ситуация, когда оба признака кодируются одним плейотропным локусом. Механизм действия плейотропии связан с тем, что продукты многих генов зачастую используются в нескольких переплетающихся друг с другом процессах роста и

развития организма. Особенно характерна плейотропия для генов, кодирующих сигнальные белки (Пасеков, 2010).

Исследование динамики модели (1) вместе с аналогами, где моделируется отдельно отбор по приспособленностям зародышей (Фрисман, Жданова, 2009) и репродуктивной группы (Жданова, Фрисман, 2013), позволяет глубже понять эволюционные процессы, протекающие в структурированной популяции.

3. Результаты

Показано, что увеличение репродуктивного потенциала w и выживаемости c сопровождается усложнением динамики ее численности. Однако эволюционный рост самих этих параметров может быть немонотонным, со значительными флуктуациями; причем в случае антагонистической плейотропии рост одного из этих параметров, как правило, сопровождается закономерным уменьшением другого (рисунок 1).

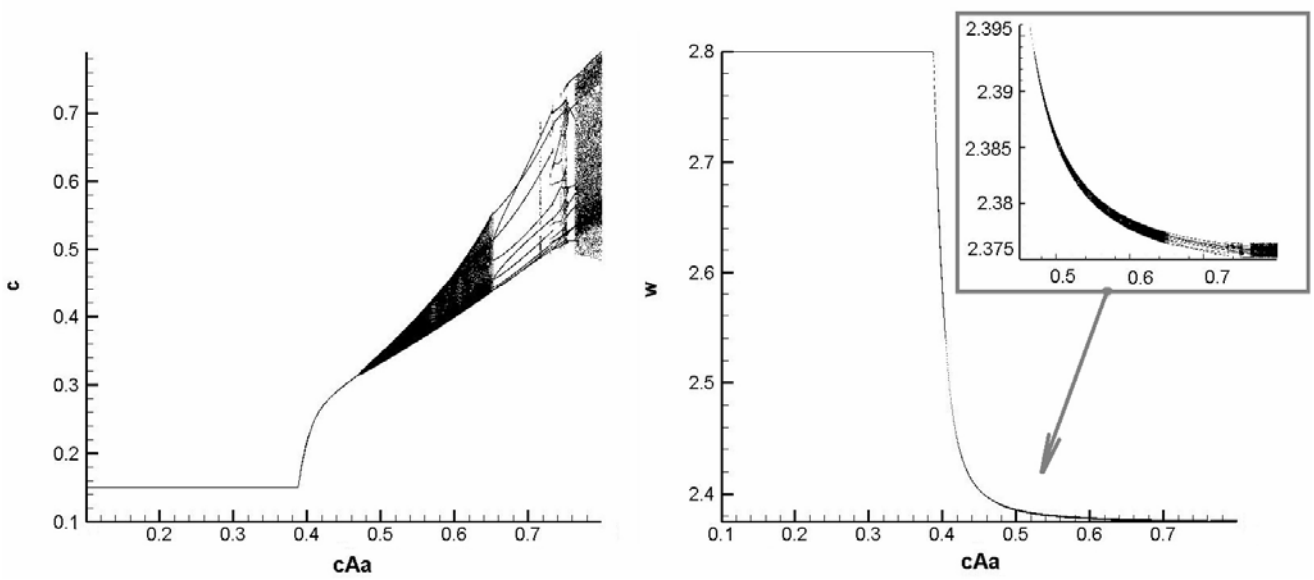


Рисунок 1 - Распределение средней выживаемости ($\bar{c}$) старшей возрастной группы и репродуктивного потенциала популяции ($\bar{w}$) в предельных траекториях системы (1) с изменением бифуркационного параметра c_{Aa}.

Рассматриваемые модели допускают существенное разнообразие динамики генетической структуры и численности двухвозрастной популяции. При этом начальные условия в отдельных случаях могут определять как генетический состав популяции, так и характер динамики ее численности.

Исследование проведено при частичной поддержке РФФИ (грант №11-01-98512) и ДВО РАН в рамках программы Президиума РАН (проекты № 12-I-П28-02, 12-I-П15-02, 12-II-СО-06-019, 12-06-007, 13-III-В-01I-002).

Литература

Жданова О.Л., Фрисман Е.Я. Моделирование эволюции популяции с двумя возрастными классами // Информатика и системы управления. - 2013. - № 2 (36). - С. 36-45.

Пасеков В.П. Популяционная изменчивость и биометрические модели координации признаков организма // Журнал общей биологии. - 2010. - Т. 71. № 1. - С. 7-18.

Фрисман Е.Я., Жданова О.Л. Эволюционный переход к сложным режимам динамики численности двухвозрастной популяции // Генетика. - 2009. - Т. 45, № 9. - С. 1277–1286.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТРОФИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ СОЕДИНЕНИЯМИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Завалишин Н.Н. [1], Виноградова А.А.[2]

[1] *ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия*
nickolos@ifaran.ru
[2] *ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия*
anvinograd@yandex.ru

Аннотация: для исследования влияния соединений тяжелых металлов (ТМ) на трофические цепи наземных экосистем арктических заповедников России построен набор двух- и трехкомпонентных динамических моделей. Компонентами цепей являются содержания загрязнителя в почве, растительности, животных. Исследована устойчивость и бифуркации равновесных состояний, соответствующих накоплению загрязнителя в различных компонентах цепи при изменении внешнего притока соединений ТМ. Результаты применяются к экосистеме Костомукшского заповедника, подверженного атмосферным выпадениям железа, меди и алюминия.

Базовая модель наземной трофической цепи (рис. 1) состоит из всего двух компонент, отвечающих содержанию загрязнителя – соединений тяжелого металла (ТМ) - в почве (P) и растительности (N_1). Загрязнитель выпадает из атмосферы на почву и растительность в количестве Q, из которого доля $\mu f(N_1)Q$ перехватывается растительностью, а остальное попадает на почву. Функция $f(N_1)$ обозначает интенсивность поглощения перехватываемой растительностью доли атмосферных выпадений загрязнителя и обладает свойством насыщения по содержанию ТМ: $f(N_1) = N_1/(S+N_1)$. Поглощению растительностью из почвы с водным раствором отвечает поток $N_1V_{01}(P)$, доля которого $k_1N_1V_{01}(P)$ усваивается растениями, где функция $V_{01}(P)$ характеризует удельное поглощение. В самом простом представлении она линейна: $V_{01}(P) = \gamma_{01}P$. Вместе с опадом в почву возвращается поток m_1N_1, доля которого с коэффициентом a_1 остается в почве, восстанавливаясь до доступного растениям состояния. Вместе со стоком удаляется из почвы поток m_0P. Балансовые уравнения для загрязнителя в цепи имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dP}{dt} = (1-\mu\dfrac{N_1}{S+N_1})Q + a_1m_1N_1 - m_0P - \gamma_{01}PN_1 \\ \dfrac{dN_1}{dt} = Q\mu\dfrac{N_1}{S+N_1} + k_1\gamma_{01}PN_1 - m_1N_1 \end{cases}, \qquad (1)$$

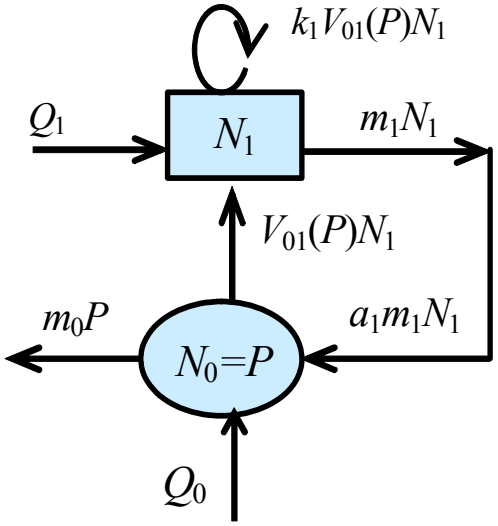


Рисунок 1 - Базовая модель наземной трофической цепи из двух компонентов.
P – ресурс: соединения ТМ в почве, N_1 – содержание ТМ в растительности.

При добавлении в модель третьей компоненты – пула животных – получается цепь со всеядностью (рис.2), в которой соединения ТМ попадают на верхний уровень с потребляемой фитомассой (поток $V_1(N_1)N_2$) и с почвенной влагой (поток $V_{02}(P)N_2$). Совокупная доля $(k_2V_1(N_1) + h_2V_{02}(P))N_2$ усваивается организмами, а остальное возвращается в почву. Функции удельного поглощения $V_{02}(P)$ и $V_1(N_1)$ линейны, как и $V_{01}(P)$. Балансовые уравнения принимают вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dP}{dt} = (1-\mu\dfrac{N_1}{S+N_1})Q + a_1m_1N_1 + a_2m_2N_2 - m_0P - \gamma_{01}PN_1 - \gamma_{02}PN_2 \\ \dfrac{dN_1}{dt} = \mu Q\dfrac{N_1}{S+N_1} + k_1\gamma_1PN_1 - m_1N_1 - \gamma_2N_1N_2 \\ \dfrac{dN_2}{dt} = N_2(k_2\gamma_2N_1 + h_2\gamma_{02}P - m_2) \end{cases}, \qquad 2)$$

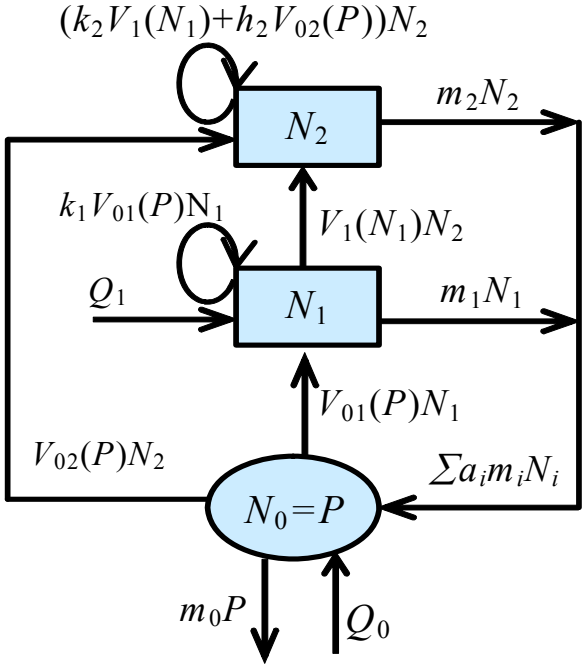


Рисунок 2. - Трехкомпонентная трофическая цепь для загрязнителей – тяжелых металлов в наземных экосистемах.
P – ресурс: соединения ТМ в почве, N_1 – содержание ТМ в растительности, N_2 – содержание ТМ в пуле животных.

Система (1) может иметь до трех равновесий: 1) $[Q/m_0;\ 0]$; 2) $[P_{\pm}^{(2)},\ N_{1\pm}^{(2)}]$, являющиеся корнями квадратного уравнения. Эти же равновесия существуют в системе (2) при N_2=0 и называются укороченными. К ним добавляются равновесие с ненулевыми компонентами, отвечающее равенству $m_2 = k_2\gamma_2N_1 + h_2\gamma_{02}P$, и аномальное равновесие с нулевым содержанием в растительности и ненулевым N_2, соответствующее накоплению загрязнителя только на втором уровне цепи. Равновесие с ненулевой первой компонентой (загрязнитель присутствует только в почве) устойчиво при условии $Q(\frac{\mu}{S}+\frac{k_1\gamma_{01}}{m_0}) < m_1$. Аномальное стационарное состояние с нулевым содержанием в растительности устойчиво в области, описываемой неравенствами: $Q > \frac{m_0m_2}{h_2\gamma_{02}}$, $Q < \frac{m_2}{h_2\gamma_{02}}(m_0 - a_2m_2(a_2h_2-1))$ и $Q(\mu/S+\frac{\gamma_2}{m_2(a_2-1/h_2)}) < m_1+\frac{m_0\gamma_2}{h_2\gamma_{02}(a_2-1/h_2)}$. Полные равновесия отвечают кубическому уравнению относительно N_1, которое имеет лишь одно действительное решение. На линиях седло-узлов и транскритических бифуркаций в пространстве параметров все эти равновесия обмениваются устойчивостью или сливаются. Возможны и бифуркации рождения предельных циклов, при которых фазовые переменные начинают испытывать колебания во времени. Сделана оценка областей устойчивости равновесий моделей (1) и (2) для конкретных арктических экосистем при типичных уровнях аэрозольного загрязнения соединениями железа, алюминия, меди (Костомукшский заповедник) (Виноградова, Иванова, 2011), найдены критические для каждого состояния трофической цепи уровни нагрузки.

Работа поддержана проектом РФФИ № 11-05-00300-а.

Литература

Виноградова А.А., Иванова Ю.А., Антропогенное загрязнение природных сред в районе Костомукшского заповедника (Карелия) при дальнем переносе атмосферных примесей. //Оптика атмосферы и океана, т. 24, № 6, 2011, с. 1-9.

КОЛЕБАНИЯ, ХАОС И СТРУКТУРЫ В МОДЕЛЯХ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ТРОФИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ТИПА «РЕСУРС-ПОТРЕБИТЕЛЬ»

Завалишин Н.Н.

ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия
nickolos@ifaran.ru

Аннотация: трофические цепи типа «ресурс-потребитель», однородные по пространству, могут иметь устойчивые равновесия, периодические и хаотические колебательные режимы. Стационарные состояния в пространственно-неоднородных моделях трофических цепей могут терять устойчивость посредством механизма Тьюринга с образованием диссипативных структур. Исследуются условия возникновения бифуркации Тьюринга в открытых двух- и трехкомпонентных цепях типа «ресурс-потребитель» при изменении скорости притока ресурса извне и структуры и значений промысла на верхнем уровне.

Исследование структуры и динамики трофических цепей стало классической задачей математической экологии, которой посвящено огромное число работ и которая до сих пор далека до окончательного решения. Среди наиболее интересных особенностей биологических сообществ с вертикальной структурой, которые и называются трофическими цепями, если их последовательные компоненты связаны между собой отношениями типа «хищник-жертва» (Свирежев, Логофет, 1978), значительное место занимает детерминированный хаос и условия его практического воплощения в природных популяциях. Особый интерес представляют эксплуатируемые трофические цепи с точки зрения прогноза численности участвующих популяций при вариациях промысла и с позиций оценки изменений структуры и функционирования экосистемы под действием климатических изменений. Существуют два различных модельных представления трофических цепей: одно основано на уравнениях динамики популяций, взаимодействующих по типу хищник-жертва, а второе рассматривает цепь с точки зрения поступающего на вход ресурса, задавая его баланс в системе явно. Такую цепь будем называть трофической цепью типа «ресурс-потребитель». Если плотности составляющих уровней неоднородны по пространству, то возникает задача реакции-диффузии о динамике системы «ресурс-потребитель». В результате потери устойчивости пространственно-однородного решения в трофической цепи «ресурс-потребитель» может появиться устойчивое пространственно-неоднородное равновесие, называемое диссипативной структурой (Свирежев, 1987). В работах последних лет показано, что эффект кросс-диффузии (движение потребителя по градиенту ресурса) играет важную роль в появлении диссипативных структур в системах реакции-диффузии (Ванаг, 2008). В водных экосистемах на динамику трофических цепей сильное воздействие оказывает перенос ресурса и потребителей течениями (адвекция). Целью работы является исследование роли пространственных факторов диффузии, адвекции и кросс-диффузии в формировании пространственно-неоднородных стационарных решений. Для эксплуатируемой трофической цепи Охотского моря бифуркационными параметрами являются интенсивность промысла и скорость притока внешнего ресурса. Численно-аналитические методы теории бифуркаций позволяют построить частичные параметрические портреты систем типа «ресурс-потребитель» с двумя и тремя уровнями в пространстве этих параметров и исследовать динамические режимы, возникающие на границах устойчивости стационарных решений.

Литература

Свирежев Ю.М., Логофет Д.О., Устойчивость биологических сообществ. – М., Наука, 1978.

Свирежев Ю.М., Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. – М., Наука, 1987, 366 с.

Ванаг В.К., Диссипативные структуры в реакционно-диффузионных системах: эксперимент и теория. – “РХД”, Москва-Ижевск, 2008, 300 с.

ДИНАМИКА БИОЛОГИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА В ЭКОСИСТЕМАХ КРИОЛИТОЗОНЫ РОССИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Завалишин Н.Н. [1]

[1] *ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия*
nickolos@ifaran.ru

Аннотация: построены двух- и трехкомпонентные динамические блоковые модели совместного биотического круговорота углерода и азота в тундровых, лесотундровых и лесных экосистемах криолитозоны России. Стационарные точки моделей отражают климаксные состояния сукцессии растительного покрова как основного компонента круговорота. Переход через границы устойчивости этих состояний в пространстве климатозависимых параметров соответствует переходу экосистемы из одного состояния в другое или к колебательному режиму. Исследуется эволюция круговорота в экосистемах криолитозоны России при изменениях климата по двум сценариям протокола CMIP5, отвечающим умеренному и экстремальному потеплению.

Биотический круговорот в наземных экосистемах зоны многолетней мерзлоты имеет особенности, обусловленные процессами протаивания и замораживания многолетнемерзлых грунтов. В ходе этих процессов углерод, скованный в мерзлых слоях почвы, может при оттаивании давать существенную добавку к обычному уровню эмиссии в атмосферу. Замедленность всех биогеохимических процессов в тундровых экосистемах в условиях холодных температур приводит к повышенному риску их исчезновения при экстремальных климатических воздействиях. В связи с этими особенностями представляет интерес моделирование биотического круговорота в экосистемах криолитозоны при вероятных изменениях климата в XXI веке. Характеристики биотического круговорота – запасы и потоки углерода и азота – измеряются на среднегодовом масштабе времени и в совокупности образуют статические схемы, которые служат источниками для построения динамических моделей круговорота. В среднегодовом масштабе усредненный отклик экосистем на вероятные изменения климата можно оценить через моделирование эволюции их биотического круговорота. Для этого построены двух- и трехкомпонентные динамические блоковые модели совместного биотического круговорота углерода и азота в тундровых и лесотундровых экосистемах Кольского полуострова (Манаков, 1970, 1972; Базилевич и Титлянова, 2008), мохово-кустарничковой тундре п-ова Таймыр (Базилевич и др., 1986) (рис. 1), лиственничных лесах северной тайги Восточной Сибири (Лесные экосистемы…, 2002; Ведрова и др., 2002; Прокушкин и др., 2006; Permafrost ecosystems, 2010), основанные на единой блоковой схеме (рис.1), включающей углерод живой фитомассы, мертвое органическое вещество подстилки и напочвенного покрова. Взаимодействие между углеродным и азотным циклами обеспечивается двумя основными биохимическими механизмами: 1) интенсивность опада пропорциональна отношению $C{:}N$ в фитомассе, и при недостатке азота повышается (азотное голодание растений); 2) интенсивность разложения мертвого органического вещества уменьшается при увеличении отношения $C{:}N$ в нем (Alexandrov et al., 1994). Выбор сочетаний потоковых функций, доставляющий устойчивость состоянию модели, соответствующему наблюдаемому состоянию круговорота, производится на основе прямого метода Ляпунова. При этом аппроксимация первичной биологической продуктивности осуществляется по статистическим данным о фитомассе и продукции растительного покрова наземных экосистем криолитозоны Северной Евразии, собранным в (Базилевич и Титлянова, 2008).

Стационарные точки модели отражают климаксные состояния сукцессии, а потеря устойчивости равновесий соответствует переходам между состояниями. Методы теории бифуркаций позволяют определить границы устойчивости стационарных состояний модели в пространстве параметров: интенсивности ассимиляции углерода растительностью из

атмосферы, стока и разложения мертвого органического вещества. Эти параметры зависят от характеристик климата (среднегодовой температуры и суммы осадков) и гидрологического цикла. Перемещение через границы устойчивости равновесий соответствует переходу экосистемы в другое стационарное состояние или к колебательному режиму в зависимости от типа границы. Такое перемещение и порождается изменением коэффициентов модели, зависящих от климатических величин – средней температуры и годовой суммы осадков, сценарий изменения которых предлагается какой-либо климатической моделью. В данной работе используются два сценария RCP-26 и RCP-85 модели IPSL с умеренным и экстремальным потеплением. Для расширения результатов моделирования динамики локальных экосистем на территорию криолитозоны Северной Евразии используется динамическая модель конкуренции лесного и травяного биомов, созданная ранее и позволяющая оценивать динамику распределения растительности при изменениях климата. При экстремально теплом сценарии лесотундра наступает на тундровые сообщества, а лиственничники продвигаются в лесотундру. Однако степень их продвижения сильно лимитирована доступным азотом в почве. При экстремально теплом сценарии оттаивающая мерзлота резко повышает влажность, тундра и лесотундра заболачиваются, что сопровождается ростом эмиссии ранее захороненного в многолетнемерзлых грунтах углерода. Наступления леса на лесотундру практически не происходит в этом случае по причине недостатка доступного азота. Переходные травяные болота могут смениться лесо-травяными при обоих сценариях.

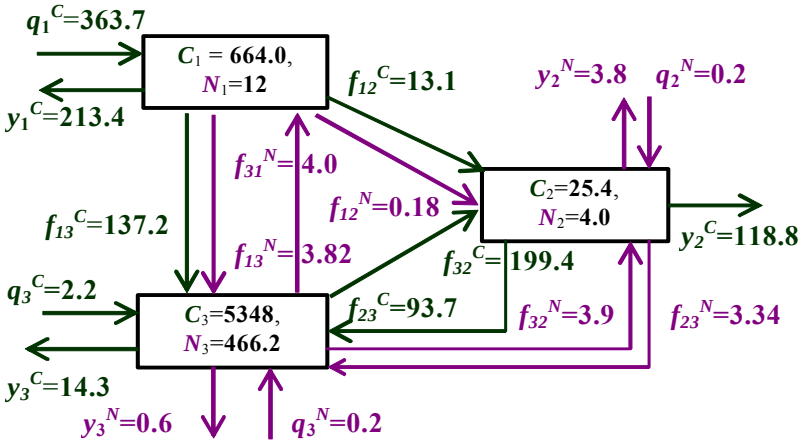


Рисунок 1 - Агрегированная трехкомпонентная схема совместного биотического круговорота углерода и азота в экосистеме мохово-кустарничковой тундры п-ова Таймыр .

Запасы углерода (гC/м^2), азота (гN/м^2): C_1, N_1 - растительность, C_2, N_2 – потребители и деструкторы (животные, бактерии, грибы, микроорганизмы), C_3, N_3 – опад, подстилка, органическое вещество корнеобитаемого слоя почвы. Потоки (гC/м^{2}год для углерода, гN/м^{2}год для азота): $q_1{}^C$ – ассимиляция CO_2 из атмосферы растениями в ходе фотосинтеза, $q_2{}^C$ – миграция потребителей из соседних экосистем, $q_3{}^C$ – привнос мертвого органического вещества (МОВ) из соседних экосистем, $y_1{}^C$ – автотрофное дыхание, $y_2{}^C$ – дыхание деструкторов и потребителей, $y_3{}^C$ –вынос МОВ со стоком, $f_{12}{}^C$ – потребление растительности собственными фитофагами, $f_{13}{}^C$ – опад и отпад, $f_{23}{}^C$ – отмирание животных и микроорганизмов, $f_{32}{}^C$ – разложение МОВ деструкторами.

Работа поддержана Программой № 12 Отделения наук о Земле РАН «Процессы в атмосфере и криосфере как фактор изменений природной среды» и проектом 12-05-01092а РФФИ.

Литература

Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А., Географические особенности структуры и функционирования экосистем. – М., Наука, 1986.

Базилевич Н.И., Титлянова А.А., Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в наземных экосистемах. - Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2008.

Zavalishin N.N., Dynamic compartment approach for modeling regimes of carbon cycle functioning in bog ecosystems. *Ecological Modelling*, 2008, v. 213, p. 16-32.

Лесные экосистемы Енисейского меридиана. // под ред. Ф.И. Плешикова, Изд-во СА РАН, Новосибирск, 2002, 356 с.

Манаков К.Н., Элементы биологического круговорота на Полярном Севере. – Л., «Наука», 1970, 160 с.

Манаков К.Н., Продуктивность и биологический круговорот в тундровых биогеоценозах Кольского полуострова. – Л., «Наука», 1972, 148 с.

Ведрова Э.Ф., Плешиков Ф.И., Каплунов В.Я., Структура органического вещества северотаежных экосистем Средней Сибири. // *Лесоведение*, 2002, №6, с. 3-12.

Прокушкин С.Г., Абаимов А.П., Прокушкин А.С., Масягина О.В., Биомасса напочвенного покрова и подлеска в лиственничных лесах криолитозоны Средней Сибири. // *Сибирский экологический журнал*, 2006, № 2, с. 131-139.

Permafrost ecosystems: Siberian larch forests. // eds. Osawa A., Zyryanova O.A., Matsuura Y., Kajimoto T., Wein R., 2010, Springer Ecological Studies series, v. 209.

АНТРОПОГЕННАЯ И ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНЦЕПЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ: СРАВНЕНИЕ НА ОСНОВЕ ПРОСТОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Замолодчиков Д.Г.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
dzamolod@mail.ru

Аннотация. Преобладающая точка зрения связывает современный рост температуры с антропогенным увеличением концентраций парниковых газов атмосферы. Согласно альтернативным концепциям, потепление вызвано сложением естественных климатических циклов. В работе проведен статистический анализ имеющихся инструментальных данных. Предложена простая модель динамики температуры, комбинирующая логарифмический эффект роста концентрации CO_2 и вклад климатических циклов. Построен прогноз изменения глобальной температуры в XXI веке.

Проблема глобального потепления не имеет равных среди других экологических вопросов современности по степени воздействия на мировую аудиторию, политику и экономику. В 1992 г. была выработана Рамочная конвенция ООН об изменении климата, закрепившая следующие положения: 1) главной причиной потепления является рост концентраций парниковых газов атмосферы; 2) этот рост определяется увеличением антропогенных эмиссий, в первую очередь от сжигания ископаемого топлива. Наиболее последовательно концепция антропогенного потепления рассматривается в докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Выводы МГЭИК считают убедительными далеко не все представители научной общественности. Так, в серии работ группы исследователей из ААНИИ (Гудкович и др., 2012) динамика температуры объясняется наличием двух естественных циклов: 60-летнего и 200-летнего. Внешней причиной цикличности является ритмика солнечной активности. Сложение циклов уже на грани XX и XXI веков привело к смене потепления похолоданием.

Цель работы состоит в сравнительном анализе степени соответствия альтернативных концепций потепления имеющимся сведениям по динамике глобальной температуры. Источниками исходных сведений служили данные по аномалиям глобальной температуры за 1850-2010 гг. (Jones et al., 2012) и мониторингу атмосферной концентрации CO_2 (Tans, Keeling, 2012). Статистическая обработка данных состояла в построении нелинейных регрессионных моделей при помощи пакета Statistica 6.1 (Stat Soft Inc., USA).

Рассмотрение динамики глобальной температуры приземного слоя воздуха за 1850-2010 гг. (рис. 1) позволяет выделить ряд специфических черт: 1) ярко выраженная после 1910 г. тенденция к росту; 2) локальные максимумы, пришедшиеся на 1880-е и 1940-е годы; 3) наличие небольших пиков с периодичностью, близкой к 11 годам. Сформулируем уравнение, способное воспроизвести отмеченные особенности. Учтем, что зависимость температуры от концентрации CO_2 не является линейной. Основная полоса поглощения длинноволнового спектра молекулами CO_2 находится в пределах 4.2-4.3 мкм. Исчерпание этой полосы происходит уже при небольших концентрациях CO_2, при ее увеличении поглощение излучения растет за счет расширения краевых частей полосы. В результате возникает логарифмическая связь между тепличным эффектом и концентрацией CO_2 (Archer, 2011). С учетом данного факта, предложим следующее уравнение:

$$T = -2.46 + 2.82 \ln(CO_2) - 0.101 \sin(15.7 + 0.0914\, Y) + 0.0247 \sin(0.600\, Y), \quad (1)$$
$$R^2=0.866,\ P<0.01,\ n=161.$$

где T – средняя глобальная температура, ºC; CO_2 – концентрация углекислого газа в атмосфере, ppm; Y – номер года нашей эры. Уравнение (1) описывает 86.6% дисперсии

исходных данных, что является очень хорошим показателем. Регрессия в целом и все параметры уравнения (1) статистически значимы при $P \leq 0.02$.

Уравнение (1) воспроизводит все отмеченные выше особенности динамики глобальной температуры (рис. 1). Результаты дополнительного анализа показали, что при наличии среди независимых переменных логарифма концентрации CO_2. не выявляется статистически достоверных вкладов циклов с периодом, превышающим 68.8 года. Следовательно, комбинация связи глобальной температуры с логарифмом концентрации CO_2 и среднесрочных климатических циклов наилучшим образом описывает наблюдаемую динамику глобального климата.

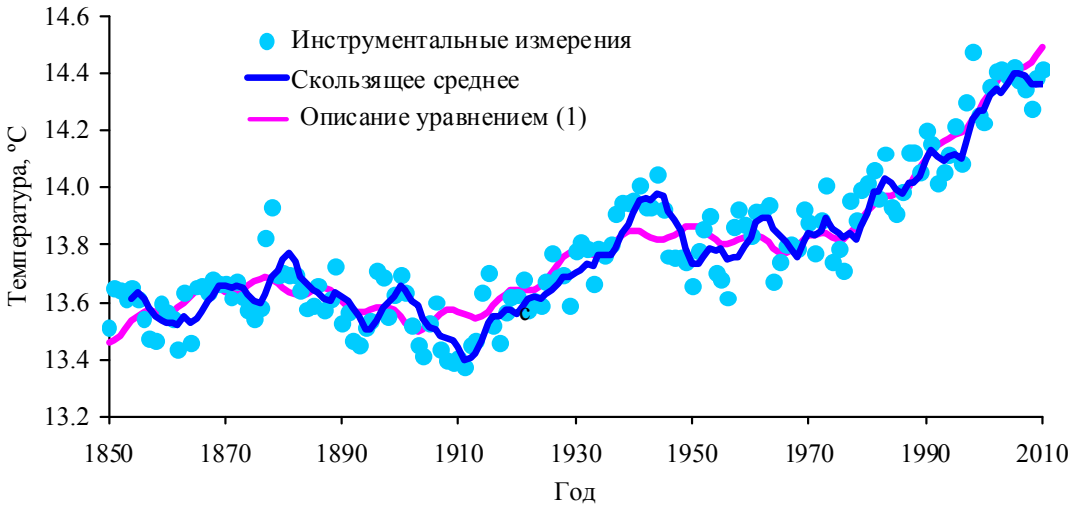


Рисунок 1 – Динамика глобальной температуры и ее описание уравнением (1)

Построим прогноз динамики глобальной температуры в XXI веке по уравнению (1), используя в качестве независимой переменной сценарии изменения концентрации CO_2 (Carbon dioxide, 2011). При реализации наиболее жесткого сценария A2 средняя глобальная температура к 2100 г. достигнет 16.5 ºC. а потепление за XXI век составит 2.2 ºC. Для сценариев A1B и B1 рост температуры за столетие равен 1.8 и 1.0 ºC соответственно. Приведенный в 4-м оценочном докладе МГЭИК (Изменение климата, 2007) прогноз, осуществленный по ансамблю моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), дал для сценариев A2, A1B и B1 следующие средние оценки роста температуры в XXI веке: 3.6, 2.8 и 1.8 ºC соответственно. Эти значения в 1.5-1.6 раза выше, чем полученные по уравнению (1). Наши оценки находятся у нижнего предела разброса прогнозных значений МГЭИК, то есть некоторые из МОЦАО дают результаты, аналогичные полученным по уравнению (1).

Литература

Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. Что происходит с климатом Земли? // Экологический вестник России. - 2012. - № 5. - С. 34-41.

Изменение климата, 2007 г.: Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы по изменению климата. - Женева: МГЭИК, 2007. - 104 с.

Archer D. Global warming: Understanding the forecast. - Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. - 207 p.

Carbon dioxide: Projected emissions and concentrations. - IPCC Data Distribution Center, 2011. - http://www.ipcc-data.org/ddc_co2.html.

Jones P.D., Parker D.E., Osborn T.J., Briffa K.R. Global and hemispheric temperature anomalies - land and marine instrumental records. - Oak Ridge: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2012. - DOI: 10.3334/CDIAC/cli.002.

Tans P., Keeling R. Trends in atmospheric carbon dioxide. - Boulder: Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, NOAA, 2012. - http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/co2_data_mlo.html.

РАСЧЕТ ВДЫХАЕМОЙ ФРАКЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В НИЗКОСКОРОСТНОЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

Гильфанов А.К., Зарипов Ш.Х., Мухаметзанов И.Т.

Казанский федеральный университет, Казань, Россия
shamil.zaripov@ksu.ru

Аннотация: Представлена математическая модель движения дисперсных воздушных загрязнений вокруг манекена человека с учетом дыхания. Проведены параметрические исследования коэффициента аспирации аэрозольных частиц (функции “вдыхаемая фракция”) в зависимости от диаметра частицы и скорости ветра.

Дисперсные воздушные загрязнения, такие как пылевые частицы или биоаэрозоли, в зависимости от концентрации могут оказывать значительное влияние на здоровье человека. Оценка концентрации частиц вдыхаемой пыли в условиях рабочих и жилых помещений является важной экологической проблемой. Наряду с измерениями решению данной проблемы способствует математическое моделирование течения аэрозоля при дыхании человека (Anthony et.al., 2006). Представлена математическая модель и результаты исследований вдыхаемой фракции дисперсных воздушных загрязнений для реальной геометрии манекена человека. Математическая модель включает в себя уравнения Навье–Стокса ламинарного стационарного течения несжимаемого газа для несущей среды и уравнения движения частиц с учетом аэродинамического сопротивления и силы тяжести. Уравнения течения несущей среды решаются методом конечных объемов (Патанкар, 1984) в CFD пакете Fluent. В найденном поле скоростей несущей среды траектории частиц рассчитываются численным интегрированием уравнений движения частиц. Вдали от манекена задается постоянная скорость ветра $\bar{U}_0$, значение которой соответствует скоростям воздушных потоков внутри помещений. Дыхание человека моделируется через задание скорости аспирации U_a в плоскости ротового отверстия эллиптической формы. Рассчитывается коэффициент аспирации A (вдыхаемая фракция), представляющий собой отношение средней концентрации вдыхаемых частиц к концентрации частиц в невозмущенном потоке. В невозмущенной среде аэрозольные частицы двигаются параллельно вдоль направления, задаваемого вектором скорости $\bar{U}_1 = \bar{U}_0 + \bar{V}_s$, где $\bar{V}_s = \tau \bar{g}$ – скорость гравитационного оседания, $\tau = \rho_p d^2 / 18\mu$ – время релаксации сферической частицы, ρ_p – плотность частицы, d – диаметр частицы, μ – коэффициент динамической вязкости воздуха. На основе расчетов траекторий частиц с различными начальными положениями находится трубка предельных траекторий, которая разделяет дисперсную фазу на потоки вдыхаемых частиц и частиц, не попадающих в ротовое отверстие. При известной площади S_p поперечного сечения трубки предельных траекторий вдали от манекена коэффициент аспирации вычисляется по формуле

$$A = \frac{U_1 S_p}{Q} = \frac{S_p \sqrt{U_0^2 + V_s^2}}{S_m U_a},$$

где $Q = S_m U_a$ – расход газа через ротовое отверстие площади S_m.

Примеры траекторий частиц в окрестности головы манекена и областей вдыхаемых частиц вдали от манекена для частиц диаметра d=37 мкм при скорости ветра U_0=0.2м/с и в неподвижной среде U_0=0 приведены на рисунке 1. Видно, что форма и размеры области захвата пылевых частиц заметно меняются в зависимости от величины скорости ветра. Сравнение зависимостей коэффициента аспирации от диаметра частиц для двух указанных

случаев показано на рисунке 2. При аспирации из неподвижного воздуха сила тяжести становится важным фактором, влияющим на коэффициент аспирации. При уменьшении скорости ветра значение A падает в связи с осаждением аэрозольных частиц на поверхности головы манекена. Полученные зависимости коэффициента A от диаметра пылевых частиц для случая подвижной среды удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными из работы (Kennedy et.al., 2002).

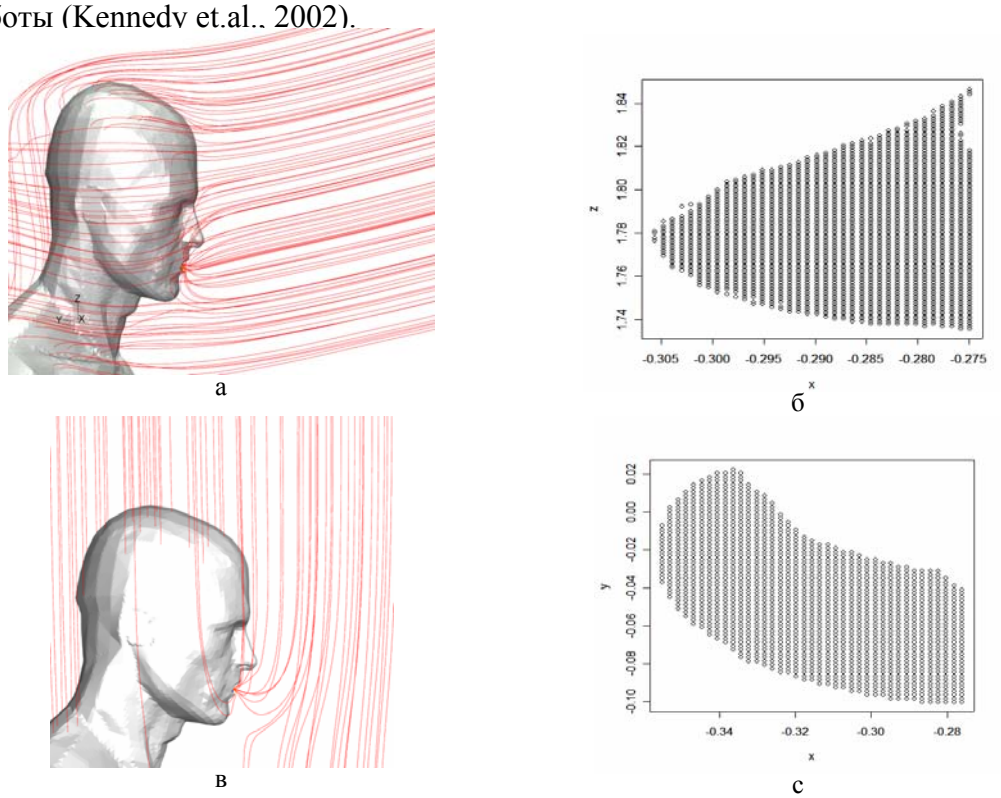


Рисунок 1 - Траектории частиц (а, в) и области аспирируемых частиц вдали от манекена (б, с) для U_0=0.2м/с (а, б) и U_0=0 (в, с)

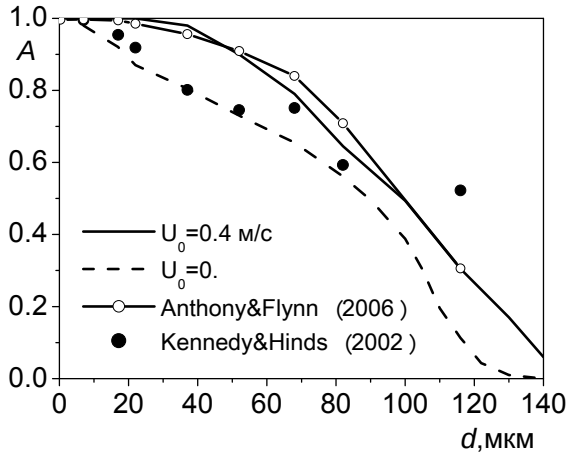


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента аспирации от диаметра частиц

Литература

Anthony T. R., Flynn M. R. Computational fluid dynamics investigation of particle inhalability // J. of Aerosol Sci., 2006. – V.37. – P.750-765.

Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. –152с.

Kennedy N.J., Hinds W.C. Inhalability of large solid particles// J. of Aerosol Sci., 2002. –V. 33. – P. 237-255.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ СИНГУЛЯРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Захарова С.А. [1], Левашова Н.Т.[2]

[1]*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*
sa.zakharova@physics.msu.ru
[2]*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*
natasha@npanalytica.ru

Аннотация: Приводится одномерная модель, описывающая концентрацию углекислого газа на границе лес-открытая местность. Для описания переходного слоя ставится начально-краевая задача для сингулярно возмущенного уравнения типа реакция-диффузия-перенос. Численные эксперименты позволяют исследовать влияние суточных изменений концентрации и ветра на ширину и положение переходной зоны.

1. Введение

Уравнения, содержащие малый параметр при старших производных как правило являются сингулярно возмущенными. При некоторых условиях (Нефедов, Давыдова, 2010) решения краевых задач с этими уравнениями могут содержать внутренний переходный слой. Поэтому они хорошо подходят для описания физических процессов, в которых по определенным причинам происходит переход между различными устойчивыми состояниями в окрестности некоторой внутренней точки отрезка, на котором рассматривается задача.

Описание физических процессов, происходящих в приповерхностных слоях атмосферы является, как известно, важной задачей экологии. Для их математического моделирования используется система уравнений Навье-Стокса и уравнений состояния, при этом большую сложность представляет постановка краевых условий и условий на границах различных типов растительности. Используя внутренние переходные слои, можно описать изменения различных параметров, например, концентрации углекислого газа, вблизи границы различных типов растительности. При этом краевые условия можно выбирать наиболее простым образом, в частности, условия 1 рода.

2. Описание модели

Поставим следующую начально-краевую задачу для функции $u\left(x,t\right)$, описывающую концентрацию углекислого газа на границе лес-открытая местность:

$$\frac{\partial u}{\partial t}-\varepsilon\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}=A\left(t\right)\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{1}{\varepsilon}B\left(u,x,t\right),\ 0\le x\le 1,\ t>0;$$
$$u\left(x,0\right)=u_{init}\left(x\right);\ u\left(0,t\right)=u_1,\quad u\left(1,t\right)=u_3. \tag{1}$$

Здесь ε-малый параметр ($\varepsilon\sim 0.3$).
Поясним физический смысл слагаемых в уравнении:

$\varepsilon\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ -турбулентная диффузия; ε – коэффициент турбулентной диффузии.

$A\left(t\right)\frac{\partial u}{\partial x}$ - адвективное слагаемое, описывающее перенос углекислого газа за счет ветра, скорость которого задается функцией $A\left(t\right)$.

$\frac{1}{\varepsilon}B\left(u,x,t\right)=\frac{1}{\varepsilon}\left(u-u_1\right)\left(u-\varphi_2\left(x,t\right)\right)\left(u-u_3\right)$- функция взаимодействия с растительностью. Она представляет собой кубическую нелинейности; u_1 и u_3 - значения концентрации углекислого газа внутри леса и открытого пространства, соответственно. Множитель $\frac{1}{\varepsilon}$ означает, что это слагаемое вносит основной вклад в формирование решения с внутренним переходным слоем. Назначение функции $\varphi_2\left(x,t\right)$ - задать положение точки в окрестности которой локализован внутренний переходный слой. В настоящей работе эта функция подобрана таким образом, чтобы положение точки локализации переходного слоя не изменялось со временем и было равно 0.5.

3. Результаты

Использование кубической нелинейности в уравнении переноса позволяет смоделировать непрерывное изменение концентрации на границе двух типов растительности. Полученные результаты показывают как влияют суточное изменение концентрации и наличие ветра на ширину и положение переходной зоны.

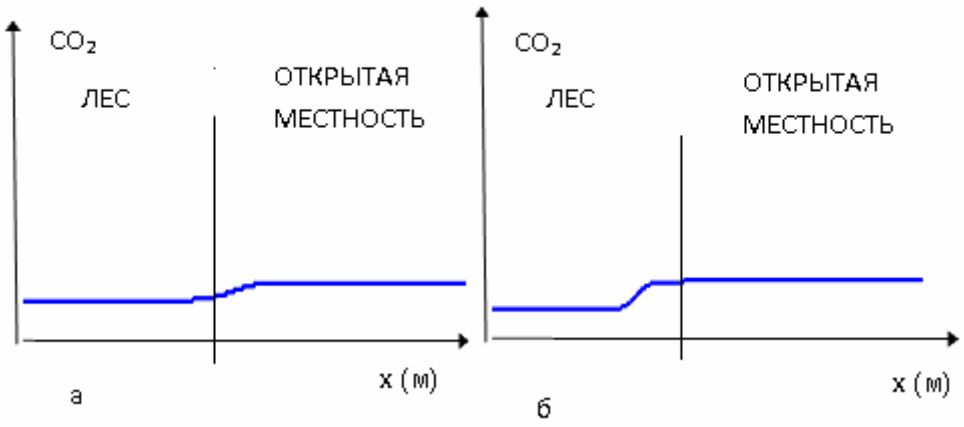


Рисунок 1 - а- ночное время при отсутствии ветра,
б -дневное время, ветер в сторону леса

Литература

Sogachev A, Menzhulin G., Heimann M. and Lloyd J. A Simple Three-Dimentional Canopy-Planetary Boundary Layer Simulation Model for Scalar Concentrations and Fluxes //Tellus 54B ,5 -2002-p.784-819.

Дубов А.С., Быкова Л.П., Маруних С.В., Турбулентность в растительном покрове.-Лен.:Гидрометеоиздат, 1978.-183 с.

Нефедов Н.Н., Давыдова М.А., Периодические контрастные структуры в системах типа реакция-дифуззия-адвекция// Дифф. уравнения, 2010, Т. 46, №9, с. 1300-1312.

СООТНОШЕНИЯ РАСТЕНИЙ С РАЗНЫМИ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ НИШАМИ В СООБЩЕСТВАХ ПРИ ЛЕСНОЙ СУКЦЕССИИ

Зубкова Е.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук, Пущино, Россия

elenazubkova2011@yandex.ru

Аннотация: представлены результаты исследования изменений структуры соотношения лесных растений с разными экологическими нишами в ходе восстановительных послепожарных сукцессий в лесах Европейской России.

Хозяйственная деятельность, приводящая к нарушению экосистем, создала необходимость прогнозирования изменений биологического разнообразия с учетом биологического круговорота элементов в природных экосистемах. Сложность природных процессов, большие массивы данных привели к необходимости применения компьютерных моделей для прогнозирования. Создание таких моделей требует понимания механизмов реакции экосистемы на изменения среды и разработки генерализованных представлений о структуре сообществ и их динамике.

В работе на большом количестве геоботанических описаний, накопленных в базе данных FORUS (Ханина, Глухова, 2000) исследуется динамика распределения видов растений с различными диапазонами интервалов экологической толерантности по почвенным факторам: влажность, богатство почвы и фитоценотическому фактору освещенность в лесных сообществах на территориях с разным почвенным богатством, не подверженных сильному антропогенному воздействию (подробные сведения о материалах и методах приводятся в статьях (Комаров, Зубкова, 2011, 2012). Выбранные лесные сообщества рассматриваются как возможные последовательные стадии послепожарной сукцессии. Эта точка зрения поддерживается авторами (Евстигнеев, 2004; Луговая, 2008; Смирнова и др., 2007; Стародубцева и др., 2004). Интервалы экологической толерантности видов рассматриваются с позиций теории экологических ниш (Хатчинсон, 1959) и оцениваются с помощью экологических интервальных шкал Д.Н. Цыганова (1983). На основании исследования свойств шкал (Зубкова, 2011) предложены критерии выделения стенобионтных и эврибионтных видов. Списки ценопопуляций видов в геоботанических описаниях обработаны по шкалам Д.Н. Цыганова средствами программы EcoScaleWin (Грохлина, Ханина, 2006; Зубкова и др., 2008) с последующим анализом видов стено- и эврибионтов по ряду экологических факторов (Комаров, Зубкова 2012).

Получены следующие результаты:

1. Показано, что при оценке экотопических условий рассмотренных лесных местообитаний Европейской России наиболее полные сведения дают шкалы Д.Н. Цыганова и Г. Элленберга, причем оценки увлажнения, богатства и кислотности почв местообитаний сходны и при сравнении рядов сообществ показывают сходные тенденции;
2. Разработанный метод выделения видов-стенобионтов дает возможность оценивать тенденции сукцессионных изменений структуры сообществ растений;
3. Проверка гипотезы Ю. Одума об увеличении доли стенобионтов при сукцессионном развитии на материале лесных сообществ показала, что изменение их доли зависит от стабильности фактора среды, по которому оцениваются стенобионты. Так, если условия не изменяются (увлажнение почв), то доля стенобионтов в сообществе возрастает. Если показатели по фактору изменяются (богатство почв), то происходит смена стенобионтов прежних условий на стенобионтов типичных для новых условий. В этом случае доля стенобионтов флюктуирует около некоторого значения;

4. Найденные изменения соотношений стенобионтов и эврибионтов по ходу сукцессий сообществ показали сходные тенденции в лесах разных климатических зон (средней тайги, южной тайги, широколиственных лесов);
5. Проведенная верификация по материалам постоянной пробной площади (Воронежский заповедник) подтвердила найденные на массовом материале временных пробных площадей закономерности изменения условий экотопов по влажности и богатству почв, а также подтвердила гипотезу о смене стенобионтов бедных мест обитания стенобионтами богатых мест обитания по мере изменения характеристик экотопов вследствие естественного эндогенного развития сообществ;

Результаты, полученные в работе, указывают на существование устойчивых закономерностей в динамике соотношений растений с разными экологическими нишами в многовидовых лесных сообществах, и могут быть использованы при построении процессных моделей лесных сукцессий.

Выражаю благодарность проф. Л.А. Жуковой и проф. А.С. Комарову
за рекомендации и дискуссии по теме.

Литература

Грохлина Т.И., Ханина Л.Г Автоматизация обработки геоботанических описаний по экологическим шкалам // Принципы и способы сохранения биоразнообразия. Материалы II Всероссийской научной конференции. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т. - 2006. - С. 87-89.

Евстигнеев О.И. Сукцессионные процессы в растительном покрове зандровых местностей //Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность / Отв. ред. О.В. Смирнова. В 2-х книгах. - М.: Наука, 2004. - Книга 2. - С. 245-260.

Зубкова Е.В. О некоторых особенностях диапазонных экологических шкал растений Д.Н.Цыганова // Известия Самарского научного центра РАН, 2011. - Т. 13, № 5. - С. 48-53.

Зубкова Е.В., Ханина Л.Г., Грохлина Т.И., Дорогова Ю.А Компьютерная обработка геоботанических описаний по экологическим шкалам с помощью программы EcoScaleWin: Учебное пособие./ Мар.гос.ун-т, Пущинский гос. ун-т. - Йошкар-Ола: МарГУ, 2008. - 96 с.

Комаров А.С., Зубкова Е.В. Динамика распределения экологических ниш в сообществах лесных растений при сукцессии // Математическая биология и биоинформатика. - Том 7. - Выпуск 1. - 2012. - С. 152-161.

Луговая Д.Л. Роль экотопических и антропогенных факторов в формировании видового и структурного разнообразия южнотаежных лесов (восток костромской области) автореф. на соиск.уч.ст.канд.биол.наук. - М. - 2008. - 26 с.

Смирнова О.В., Бобровский М.В., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э. Биоразнообразие и сукцессионный статус темнохвойных лесов Шежимопечорского и Большепорожного ботанико-географических районов Печоро-Илычского заповедника // Труды Печоро-Илычского заповедника. - Вып. 15. - Сыктывкар, 2007. - С. 28-47.

Стародубцева Е.А., Лихацкий Ю.П., Трегубов О.В. Динамика лесного покрова на песчаных террасах Воронежского биосферного заповедника. В кн.: Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность / Под. ред. О. В. Смирновой. Кн. 2. - М.: Наука, 2004. - С. 200–235.

Ханина Л.Г., Глухова Е.М. 10-летний опыт разработки и использования баз данных в геоботанике // Проблемы создания ботанических баз данных. – Новосибирск, 2000. [Электронный ресурс: http://www-sbras.nsc.ru/ws/show_abstract.dhtml?ru+25+1017].

Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. - М.: Наука. 1983. - 196 с.

Hutchinson G.E. Concluding remarks // Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology. - 1957. - №22. - P. 415-427. Reprinted in 1991: Classics in Theoretical Biology. Bull. of Math. Biol. 53:193-213.

ЧИСТАЯ ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ: МОДЕЛИ, УЧИТЫВАЮЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОДНОГО СОСТАВА

Иванова Ю.Д.[1], Суховольский В.Г.[2]

[1]*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*
lulja@yandex.ru
[2]*Институт леса им.В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия*
soukhovolsky@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены методы оценки первичной продуктивности лесных насаждений разных пород в различных экологических условиях. Предложены методы оценки первичной продуктивности с использованием данных по фитомассам фракций и запасу древесины в насаждении.

Чистая первичная продукция (NPP) является интегральной величиной, характеризующей эффективность усвоения солнечной энергии растительным ценозом в процессе фотосинтеза за определенный период времени (например, месяц, год) и на определенной площади. NPP зависит как от условий среды, в которой существуют растения (температуры, солнечной радиации, влажности, характеристик почвы и др.), так и от их видовых особенностей и типа взаимодействий между ними. Показатели NPP крайне важны для понимания механизмов продукционных процессов в растительных ценозах, мониторинга состояния растительных ценозов и прогноза продукционной динамики в стабильных и изменяющихся условиях природной среды Измерение NPP позволяет сравнивать между собой по продуктивности различные растительные сообщества (например, рассматривать NPP растительных сообществ тундры и тропического леса) и оценивать роль отдельных биомов и сообществ в общем круговороте энергии и вещества на планете.

Наиболее распространенным способом оценки биологической продуктивности лесных насаждений является оценка по приросту фитомассы, опаду и отпаду за определенный период. Простейшее уравнение динамики производства фитомассы древостоя запишем следующим образом:

$$M(T+\Delta T) = M(T) + NPP(\Delta T) - R(\Delta T) \qquad (1)$$

где $M(T)$ и $M(T+\Delta T)$ – фитомассы древостоев в возрасте T и $T+\Delta T$; $NPP(\Delta T)$ и $R(\Delta T)$ – соответственно, NPP и отпад фитомассы в ценозе за период времени ΔT.

Из (1) получим величину $NPP(\Delta T)$:

$$NPP(\Delta T) = M(T+\Delta T) - M(T) + R(\Delta T) \qquad (2)$$

Так как характерная продолжительность жизни составляет годы у фитомассы ML листьев или хвои, десятки и сотни лет – у фитомассы MS ствола с корой, MR корней и MB ветвей, для оценки $NPP(T, T+\Delta T)$ насаждения в возрастном интервале от T до $T+\Delta T$ можно использовать следующее выражение:

$$NPP(T, T+\Delta T) = MQ(T+\Delta T) - MQ(T) + \frac{\Delta T}{2\theta}\left[ML(T) + ML(T+\Delta T)\right], \qquad (3)$$

где $MQ(T) = MS(T) + MB(T) + MR(T)$; θ – характерное время жизни листьев или хвои.

Однако, несмотря на кажущуюся концептуальную простоту такого подхода, NPP древесных ценозов трудно измерить точно. Для оценок NPP нужны данные о динамике фитомасс всех фракций дерева (включая фитомассу корней). Если данные о фитомассе надземной части деревьев достаточно надежны, то данные по фитомассе корневой системы, по отмиранию части корней, ветвей и коры, опаду листьев или хвои крайне неопределенны.

Для надежного расчета NPP необходимо, во-первых, знать, насколько точно измерены величины фитомасс фракций и запаса древесины в насаждении, и, во-вторых, оценить изменчивость оценок NPP в зависимости от использованного метода расчета.

Если известны фитомассы только надземных фракций деревьев или же только запас древесины, то расчеты по (3) и (4) невозможны. Для восстановления недостающих данных в настоящей работе используется теоретическая модель распределения ресурса по фракциям дерева, предложенная ранее (Суховольский, 2004). В этой модели дерево (или древостой) рассматривается как система, состоящая из четырех компонентов – фракций (ствол с корой, корни, ветви, листья), между которыми распределяется поступающий энергетический ресурс.

Будем предполагать, что дерево или насаждение распределяют получаемые энергетические ресурсы так, чтобы полезность такого распределения для их успешного функционирования была максимальной при имеющихся ограничениях на ресурсы. При этих условиях оптимальное распределение фитомассы между фракциями дерева в возрасте T описывается уравнением Ципфа - Парето:

$$M(i,T) = M(1,T) \cdot i^{-b(T)}, \quad (4)$$

где i - ранг фракции дерева в возрасте T (то есть его номер в ряде, начинающемся с фракции ранга 1, сосредоточившего наибольший объем ресурса); $M(i,T)$ – объем ресурса у i-й фракции; $b(T)$ – параметр, характеризующий соотношение распределяемого ресурса деревьев в возрасте T.

С использованием моделей (3) и (4) предложены методы оценки NPP с использованием фитомасс всех древесных фракций в насаждении, с использованием данных о фитомассе надземных фракций деревьев в насаждении, с использованием данных по запасу V древесины в насаждении. Типичный вид кривой $NPP(T)$ приведен на рисунке 1.

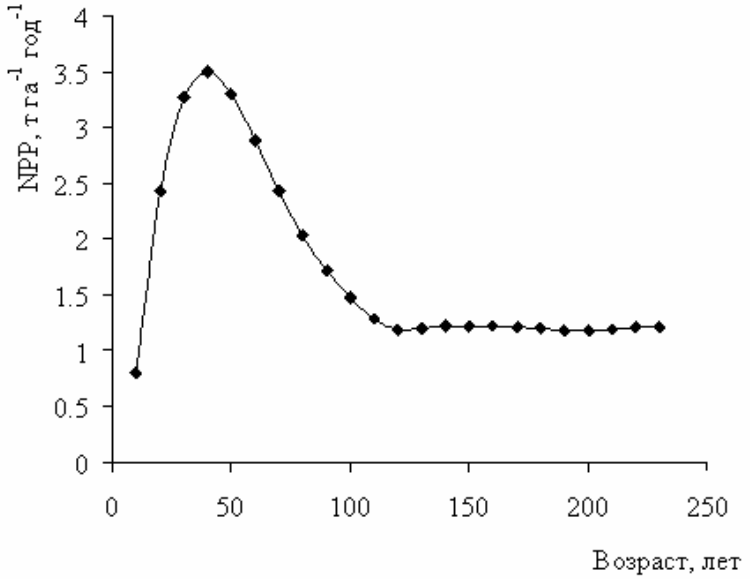


Рисунок 1. Типичная кривая возрастной динамики чистой первичной продукции (ельники-черничники, Вологодская область).

Предлагаемые в настоящей работе подходы позволяют уменьшить объем первичных данных, необходимых для расчетов первичной продукции, и увеличить точность расчетов.

Работа поддержана РФФИ (грант 12-05-00494)

Литература

Суховольский В.Г. Экономика живого. - Новосибирск: Наука, 2004. - 140 с.

МОДЕЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЛОНИЗАЦИИ НОВЫХ МЕСТООБИТАНИЙ ОРГАНИЗМАМИ ОКЕАНИЧЕСКОГО ОБРАСТАНИЯ И РАЗВИТИЯ ИХ БИОЦЕНОЗОВ

Ильин И.Н., Петросян В.Г., Бессонов С.А.
Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия
iniljin2@gmail.com

Аннотация: Представлены результаты моделирования колонизации новых местообитаний организмами океанического обрастания и развития их биоценозов. Предложенная модель учитывает наиболее важные взаимодействия основных организмов обрастания - оседающих циприсовидных личинок Lepadidae, соответствующих обрастателей (конходерма Conchoderma *virgatum*, лепас Lepas *anatifera*, L. *anserifera* и L. *hillii*), и хищников (краб Planes *minutus* и рыбы).

Введение

Вторжения чужеродных видов значительно возросли в последние десятилетия. Так, широко известны катастрофические инвазии в российские воды гидробионтов: моллюсков рапаны *Rapana thomassiana*, дрейссены *Dreissena polymorhfa* и терединиды *Teredo navalis*, краба ритропанопеуса *Rhitrohpanopeus harrisii*, гребневика *Mnemiopsis leidyi* и т. д. (Чухчин, 1961; Резниченко, 1967; Виноградов и др., 1989; Ильин, 1992; Дгебуадзе, 2003 и др.). Соответственно, в России ведутся работы по многим направлениям этой проблемы. Так, разработаны общие принципы и приоритеты исследований (Дгебуадзе, 2003). С помощью простого анализа инвазийных процессов нельзя предсказать воздействие многих факторов, в первую очередь, биотических. Совершенно необходимо и ничем незаменимо моделирование этих процессов.

Методы исследования и анализ результатов

Модельное прогнозирование колонизации новых местообитаний организмами океанического обрастания и развития их биоценозов было реализовано на основе комплексной модели, учитывающей основные составляющие биоценотического взаимодействия оседающих циприсовидных личинок Lepadidae, соответствующих обрастателей (конходерма Conchoderma *virgatum*, лепас L. *anatifera*, L. *anserifera* и L. *hillii*), хищников (краб Planes *minutus* и рыбы) сообществ центральной части Атлантического океана (Ильин, Алещенко, 1992; Ильин, 2008). В вычислительных экспериментах анализируется оседание организмов, скорость роста (прирост капитулумов), смертность (скорость поедания обрастателей хищниками), плотность обрастателей и другие показатели на 1 дм^2. Учитывается положительное влияние («привлекательность») обрастателей лепасов и конходермы для циприсов этих родов. Анализ проводится дифференцировано для разных возрастных групп Lepadidae с длиной капитулума: конходерма –<9 мм, >=9 мм и лепасы – <4 мм, >=4 мм. Нами принято, что обрастатели и крабы субстрат не покидают, а рыбы свободно мигрируют. Таким образом, плотность обрастателей ограничена. Принято также, что крабы поедают всех обрастателей с длиной капитулумов более 4 мм, а рыбы – только конходерм с длиной капитулумов более 9 мм. Разработанная модель представляет собой систему дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}_1 = (a_{1,1} + a_{1,2}x_1 + a_{1,3}x_2 + a_{1,4}x_3 + a_{1,5}x_4)(1 - a_{1,6}x_1 - a_{1,7}x_2 - a_{1,8}x_3 - a_{1,9}x_4) - a_{1,10}x_1;$$

$$\dot{x}_2 = a_{2,2}x_1 - a_{2,3}x_2x_5;$$

$$\dot{x}_3 = (a_{3,1} + a_{3,2}x_1 + a_{3,3}x_2 + a_{3,4}x_3 + a_{3,5}x_4)(1 - a_{3,6}x_1 - a_{3,7}x_2 - a_{3,8}x_3 - a_{3,9}x_4) - a_{3,10}x_3;$$

$$\dot{x}_4 = a_{4,2}x_3 - x_4(a_{4,4}x_5 + a_{4,5}x_6);$$

$$\dot{x}_5 = a_{5,1}(1 - a_{5,2}x_5);$$

$$\dot{x}_6 = a_{6,1} + a_{6,2}x_4 - a_{6,3}x_4x_6;$$

где $x_1(t)$ и $x_2(t)$ – плотность лепасов в момент времени t для первой и второй возрастной группы соответственно; $x_3(t)$ и $x_4(t)$ - плотность конходерм для первой и второй возрастной группы соответственно; $x_5(t)$ - плотность крабов; $x_6(t)$ - плотность рыб. Коэффициенты модели можно разделить на группы по биологическому сходству: привлекательность (коэффициент линейной зависимости плотности оседающих циприсов и рыб от плотности обрастателей) - $a_{1,2}$, $a_{1,3}$, $a_{1,4}$, $a_{1,5}$, $a_{3,2}$, $a_{3,3}$, $a_{3,4}$, $a_{3,5}$, $a_{6,2;}$ поступление в биоценоз организмов - $a_{1,1}$, $a_{3,1}$, $a_{5,1}$, $a_{6,1}$; площадь прикрепления обрастателей – $a_{1,6}$, $a_{1,7}$, $a_{1,8}$, $a_{1,9}$, $a_{3,6}$, $a_{3,7}$, $a_{3,8}$, $a_{3,9;}$ скорость поедания их крабами и рыбами - $a_{1,11}$, $a_{3,11}$, $a_{2,3}$, $a_{4,4}$, $a_{4,5}$; скорость перехода из одной возрастной группы в другую - $a_{1,10}$, $a_{2,2}$, $a_{3,10}$, $a_{4,2}$.

Проведенные модельные исследования сообществ океанического обрастания показали приемлемое соответствие показателей разработанных нами моделей взаимодействия хищников и жертв количественным закономерностям организационно-функциональной структуры изученных биоценозов, наблюдаемым в природе.

Разработанная модель показала, что крабы и особенно рыбы - сильнейшие модификаторы биоценозов океанического обрастания, в значительной мере сдерживают рост количества обрастателей. При "исключении" рыб наблюдаемая в вычислительных экспериментах картина заметно другая. Количество конходерм резко увеличивается и становится близким по величине к количеству лепасов.

Использование математических моделей для описания динамики численности рассматриваемых видов является важной составляющей прогностических оценок инвазии обрастателей и дальнейшего развития их биоценозов. Эти оценки могут быть использованы для управления возникновением и развитием рассматриваемых сообществ. Полученные результаты могут быть также применены для анализа инвазийных процессов иных видов и в других условиях обитания.

Аналогичные модели могут быть разработаны на данных по другим сообществам и для иных целей: анализа теоретических построений, исследований частных и общеэкологических закономерностей, мониторинга, биоиндикации вод, обучения методологии моделирования и др. Например, весьма перспективна разработка модельной системы для биологической индикации глобального потепления климата с помощью данных об инвазиях морских гидробионтов. Так, один из важных регионов для проведения подобных исследований – Баренцево море, где уникальным биоиндикатором температуры воды являются инвазии древоточца *Psiloteredo megotara* (Mollusca, Teredinidae) [Ильин, 1992]. Необходимо отметить также, что данные о предполагаемых изменениях условий среды (в первую очередь, температуры и солености воды) могут быть применены в моделях, подобных нашим, для прогнозирования инвазий гидробионтов в водоемы России.

Литература

Виноградов М.Е., Шушкина Э.А., Мусаева Э.И., Сорокин П.Ю. Новый вселенец в Черное море – гребневик *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz) (Ctenophora, Lobata) // Океанология. Т. 29, № 2. 1989. С. 293-299.

Дгебуадзе Ю.Ю. Национальная стратегия, состояние, тенденции, исследования, управление и приоритеты в отношении инвазий чужеродных видов на территории России // Инвазии чужеродных видов в Голарктике. Материалы российско-американского симпозиума по инвазийным видам. Борок, 2003. С. 26-34.

Ильин И.Н. Морские древоточцы и меры борьбы с ними // Обрастание и биоповреждения. Экологические проблемы. Наука: М., 1992. С. 21-56.

Ильин И.Н. Экология океанического обрастания в пелагиали. Товарищество научных изданий КПМ: М., 2008. 242 с.

Ильин И.Н., Алещенко Г.М. Первая версия модели биоценоза пелагического обрастания в тропиках // Обрастание и биоповреждения. Экологические проблемы. Наука: М., 1992. С. 192-196.

Резниченко О.Г. Трансокеаническая аутоакклиматизация ритропанопеуса (Rhithropanopeus harrisii tridentatus: Crustacea, Brachyura) // Труды ИОАН. Т. 85. 1967. С. 136-177.

Чухчин В.Д. Рапана (Rapana bezoar) на Гадаутской устричной банке // Труды СБС. Т. 14. 1961. С. 180-189.

ОЦЕНКА БИОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ МЕТОДОМ ВЫДЕЛЕНИЯ СТРУКТУР

Инишева Л.И.[1], Катаев С.Г. [2], Дубровская Л.И.[3]

[1]*Томский государственный педагогический университет, г. Томск, РФ*
inisheva@mail.ru
[2]*Томский государственный педагогический университет, г. Томск, РФ*
kataev@tomsk.ru
[3]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, РФ*
dubrli@sibmail.com

Аннотация: Проведён анализ закономерностей распределения отдельных групп микроорганизмов в олиготрофных торфяных болотах Западной Сибири с применением кластерно-аналитического метода. Выявлены связи между свойствами, режимами олиготрофных торфяных болот и активностью биохимических процессов.

Введение. Известно, что торфяные почвы на 50–98 % состоят из растений торфообразователей. Под влиянием биохимических процессов происходит изменение исходного состава органического вещества, одним из результатов которого является также высвобождение углерода в виде метана и диоксида углерода. Задача оценки биохимической деструкции органического вещества торфяных почв составляет важное направление проблемы круговорота углерода в биосфере. В связи с этим исследование биохимических процессов в торфяных почвах и оценка потоков между составляющими компонентами биогеоценоза, а также с внешней средой – очень важная фундаментальная и практическая задача.

В литературе, посвященной микрофлоре торфяных почв практически отсутствуют исследования по всему почвенному профилю. Однако запасы микробной биомассы в той или иной степени равномерно распределены по всему почвенному профилю до подстилающей породы, а различная активность биохимических процессов на разных глубинах приводит к различной эмиссии CO_2 и CH_4.

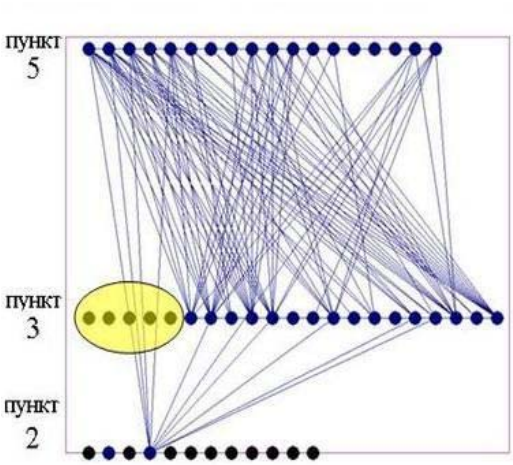
Цель данной работы заключалась в полнопрофильных исследованиях закономерностей распределения отдельных групп микроорганизмов в олиготрофных торфяных почвах по вегетационным периодам 3-х лет с применением кластерно-аналитического метода и изучении его возможностей в исследовании динамики микробиологических процессов. Основной задачей работы являлся анализ связей между свойствами, режимами олиготрофных торфяных почв и активностью биохимических процессов.

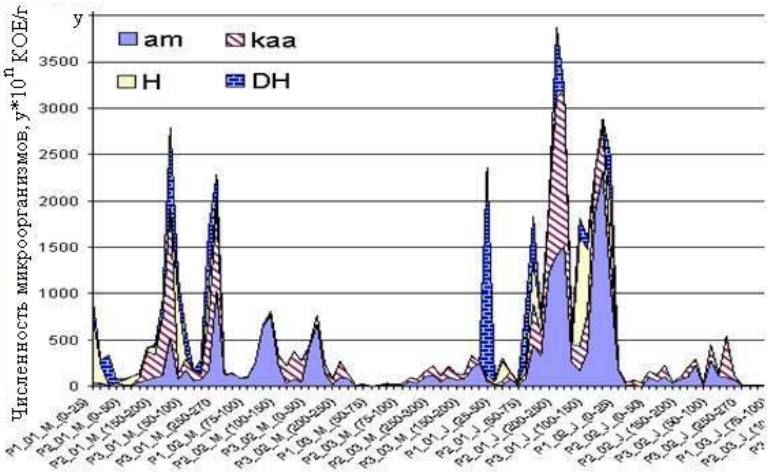
Объекты и методы. Исследования проводились на ландшафтном профиле стационара «Васюганье» (Бакчарский район, Томская область) на следующих основных видах болотных фитоценозов: высокий рям (пункт 2), низкий рям (пункт 3) и осоково-сфагновая топь (пункт 5) (Васюганское болото …, 2000). Численность микроорганизмов определяли в соответствии с методиками института микробиологии РАН. Обработка экспериментальных данных была произведена методом выделения структур (МВС) по программе одного из авторов (Катаев, Кусков, 1998). МВС фактически является набором процедур, используя которые можно провести разложение данных на структуры. Описание теоретических основ варианта метода, реализованного в программном продукте, опущено в силу ограниченности объема сообщения.

Результаты и выводы. В данной работе в качестве объектов выбиралась триада: пункт наблюдения – год – глубина, а в качестве признаков – результаты измерений изучаемых параметров (аммонификаторы; микроорганизмы, развивающиеся на КАА; нитрификаторы; денитрификаторы; гумусоразрушающие; аэробные и анаэробные целлюлозоразрушающие микроорганизмы) в мае, июле и сентябре. Таким образом, была сформирована таблица типа

«объект–свойство», содержащая 51 объект, а поскольку исследования проводились как для каждого отдельного параметра, так и для всего набора, то количество признаков варьировалось от 3 до 24. При таком выборе объектов становится возможным сравнивать характер динамики либо отдельно взятого параметра, либо всех сразу на различных площадках.

Иллюстрация связности для всех признаков приведена на рисунке 1. Видно, что при данном пороге только один объект 2-го пункта (2001 год, измерение на глубине 75–100 см) связан с объектами 3 и 5 пунктов. Плохая связь и между показаниями (выделено желтым цветом) 3-го пункта за 2001 год и всеми остальными, т.е. по генезису торфяная залежь пунктов 5 и 3 практически идентична, что и предполагалось ранее. Таким образом, было получено подтверждение *одновременности протекания торфообразовательного процесса в олиготрофных почвах низкого ряма и осоково-сфагновой топи***.** Фрагмент графика сравнения





физиологических групп микрофлоры слоев торфяных почв разного генезиса за вегетационный период приведен на рисунке 2.

Рисунок 1 – Схема связей между отдельными группами микроорганизмов. Кружки – объекты, линии – связи между ними

Рисунок 2 – Динамика численности микроорганизмов за отдельные месяцы вегетационного периода (2001–2002 гг.): am – аммонификаторы, n=5; kaa – микроорганизмы, развивающиеся на КАА, n=5; H – нитрификаторы; DH – денитрификаторы , n=-3. P1, P2, P3 – пункты 1, 2, 3; M – май, J – июль, S – сентябрь; 01 – 2001 г., 02 – 2002 г. В скобках указаны глубины отбора образцов

За все годы исследований выделяется активностью микрофлоры май. Если гидротермический коэффициент (ГТК) по Селянинову в мае был равен 0,04, то с июня по сентябрь он принимал значения соответственно 1,55, 1,47, 2,18 и 1,2. Таким образом, засушливые условия в мае обеспечили сохранение активности микрофлоры на протяжении всего вегетационного периода. Представляет интерес рассмотреть активность микрофлоры за отдельные месяцы. Торфяная залежь практически всегда находится в переувлажнённом состоянии, и на эти условия хорошо отзываются аммонификаторы и микроорганизмы, растущие на КАА, а также аэробные целлюлозоразрушающие микроорганизмы. В июле такая закономерность отмечена только для аммонификаторов и микроорганизмов, произрастающих на КАА. И только в сентябре отмеченная закономерность частично нарушена нитрификаторами, которые в отдельные годы (2001 г.) проявили активность, сопоставимую с активностью выделяющихся аммонификаторов и микроорганизмов, растущих на КАА. Таким образом, расчеты, проведенные с применением кластерного анализа, позволили отметить закономерности распределения в торфяных почвах микрофлоры в обобщенном виде без выделения глубин и отдельных лет.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (13-5-41116- РГО-а).

Литература

Васюганское болото (природные условия, структура и функционирование) / Под ред. Л.И. Инишевой. – Томск: ЦНТИ, 2000. – 136 с.

Катаев С.Г., Кусков А.И. Исследование озоновых полей над территорией России и сопредельных государств. II. Классификация составляющих полей озона // Вестник ТГПУ. Сер. «Естественные и точные науки». – 1998.– Вып. 5. – С. 10–17.

МЕТАПОПУЛЯЦИОННАЯ ДИНАМИКА С УЧЕТОМ МЕЖВИДОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Кириллов А.Н.

Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН, Петрозаводск, Российская Федерация
kirillov@krc.karelia.ru

Аннотация: предлагается модель хищник-жертва с миграцией, построенная на основе метода динамической декомпозиции. В процессе функционирования системы изменяется ее структура и размерность, что позволяет моделировать динамику ареала, соответствующую изменению его состояний. Исследуется качественное поведение системы, в частности, получены условия периодичности ее режимов.

1. Введение

В работе (Кириллов, 1991) был предложен и в дальнейшем развит (Кириллов, 1999, 2009, 2011) метод динамической декомпозиции, упрощающий аналитическое исследование динамики систем с переменным составом, структурой и размерностью и основанный на введении в динамическую систему дополнительных переменных, регулирующих структурные изменения и выполняющих функцию эволюционного времени. В результате система на отдельных промежутках функционирования заменяется на более простые подсистемы, более доступные аналитическому или качественному исследованию.

В докладе представлены результаты применения метода динамической декомпозиции к моделированию состояния ареала обитания жертвы. В зависимости от обеспеченности хищника кормом, происходит его миграция из ареала или возвращение в него. Смена состояний ареала зависит от значения эволюционного времени ареала – фазовой переменной, характеризующей кормовую благоприятность ареала для хищника. Сама идея присутствия в системе времени как одной из фазовых переменных принадлежит Ю.М. Свирежеву (Свирежев, 1983).

2. Описание базовой модели

Рассматривается базовая модель динамики популяций

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1,x_2), \quad \dot{x}_2 = f_2(x_1,x_2) \quad \dot{y} = g(x_1,x_2),$$

где $x = (x_1,x_2)$, $x_1,x_2 -$ плотности популяций хищника и жертвы, соответственно, $y -$эволюционное время. Пространство R^3_+ представляется в виде дизъюнктного объединения областей, $R^3_+ = \cup_{l=1}^5 \Omega_l$, векторное поле $v = (f_1,f_2,g)$ зависит от области Ω_l, $v = v^l$ при $(x_1,x_2,y) \in \Omega_l$:

$$\Omega_1 = \{(x_1,x_2,y) \in R^3_+ : y > \Lambda\}, \qquad \Omega_2 = \{(x_1,x_2,y) \in R^3_+ : y \leq \Lambda,\ x_2 > \varepsilon(x_1)\},$$

$$\Omega_3 = \{(x_1,x_2,y) \in R^3_+ : y \leq \Lambda),\ 0 < x_2 \leq \varepsilon(x_1)\}, \quad \Omega_4 = \{(x_1,x_2,y) \in R^3_+ : y < \Lambda,\ x_2 = 0\},$$

$$\Omega_5 = \{(x_1,x_2,y) \in R^3_+ : y = \Lambda,\ x_2 \leq \varepsilon(x_1)\},$$

$$v^1 = \{x_1(a - bx_2),\ x_2(kbx_1 - m), x_1 - \lambda x_2\}, \quad v^2 = \{ax_1,\ -mx_2,\ x_1 - \lambda x_2\},$$

$$v^3 = \{0, -c,\ 0\}, \quad v^4 = \{\{ax_1,\ 0,\ x_1 - \lambda x_2\}, \quad v^5 = \{0,\ c,\ 0\},$$

где $a, b, k, m, c, \lambda, \Lambda -$ положительные постоянные, $\varepsilon(\cdot) -$ непрерывная ограниченная пороговая функция, $\varepsilon(0) = 0,\ \varepsilon(x_1) > 0$ при $x_1 > 0.$ Рассматривается также модель с самолимитированием жертвы в отсутствие хищника в ареале ее обитания. При этом первая компонента векторных полей $v^2,$ [illegible]^4 имеет вид $x_1(a - dx_1)$. Экологический смысл эволюционного времени: y - интегральный показатель обеспеченности хищников кормом в ареале обитания жертвы. В докладе дается обоснование предложенной интерпретации y.

3. Основные результаты

Предлагаемая базовая модель ареала имеет пять состояний P_i, которым соответствуют пять динамических систем v^i. Таким образом динамика ареала описывается символической динамической системой S, траекториями которой являются последовательности символов P_i: $\{P_{j_1},\ P_{j_2}, \ldots\},\ j_s = 1, \ldots, 5,\ s \in N.$ В докладе дается экологическая интерпретация состояний P_i.

В результате качественного исследования (найдены инвариантные множества, периодические траектории), получены условия существования различных траекторий системы S. Так, например, при $\lambda < m/ak$ в S, начиная с некоторого момента времени, устанавливается режим (символическая траектория) $\{P_1\}$, т.е. прекращается миграция хищника из ареала. При $\lambda = m/ak$, в зависимости от некоторых условий, устанавливается периодический режим $\{P_1P_2\}$, т.е. режим взаимодействия чередуется с неполной миграцией, или постоянный режим $\{P_1\}$. Для системы с самолимитированием жертвы при условии $\Lambda > m/ak$ возможна периодическая последовательность $\{P_1P_2P_4\}$. Рассмотрены и другие условия существования различных режимов в системе S.

Таким образом, построенная система демонстрирует довольно большое разнообразие режимов, соответствующих различным состояниям ареала.

4. Заключение

Предлагаемый подход позволяет моделировать динамику ареалов, с помощью достаточно простых динамических систем, соответствующих различным его состояниям. При этом можно рассматривать вопросы, связанные с выживаемостью, исчезновением популяций из ареала, миграционные процессы, т.е. задачи метапопуляционной динамики. В качестве эволюционного времени, регулирующего смену этих состояний, может быть использована не только рассмотренная в докладе, но и, например, переменные, характеризующие климатические или антропогенные воздействия на ареал.

Литература

Кириллов А.Н. Системы с переменным фазовым пространством в моделировании процессов биологической очистки // Всероссийская школа-коллоквиум “Математические проблемы экологии”. Тезисы докладов. - Душанбе, 1991. - С.44.

Кириллов А.Н. Экологические системы с переменной размерностью//Обозрение прикладной и промышленной математики. - 1999. - Т.6. Вып.2. - С.318-336.

Кириллов А.Н. Метод динамической декомпозиции в моделировании систем со структурными изменениями // Информационно – управляющие системы. - 2009. - №1. - С.20-24.

Кириллов А.Н. Моделирование динамики структур гибридных систем//Информационно-управляющие системы.- 2011. - № 4. С. 42-46.

Свирежев Ю.М. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. - М.: Наука, 1983. - 368 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СМЕШАННЫХ ДРЕВЕСНЫХ СООБЩЕСТВ В СЛУЧАЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

Колобов А.Н.

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия
alex_0201@mail.ru

Аннотация: Рассмотрены результаты построения индивидуально-ориентированной модели, описывающей пространственно-временную динамику древесных сообществ. Показаны результаты вычислительных экспериментов по развитию смешанных древостоев представленных основными лесообразующими породами Дальнего Востока, в случае воздействия внешних факторов.

1. Описание модели

В работе приводятся результаты построения и исследования индивидуально-ориентированной модели динамики смешанных древесных сообществ. Особое внимание при ее построении уделяется описанию и изучению механизмов внутривидовой и межвидовой конкуренции, которая является определяющим фактором, формирующим характерные сообщества деревьев. При этом учитывается пространственная структура древостоя как основного фактора, влияющего на напряженность конкурентных отношений. Используемый при построении модели индивидуально-ориентированный подход позволяет рассматривать динамику древостоя, как результат роста и взаимодействия множества отдельных деревьев в зависимости от их позиции на участке и локально доступных ресурсов. Это позволяет имитировать различные виды воздействий на лесные экосистемы (рубки, ветровалы, фитофаги, поедание побегов копытными животными) и обеспечивает точность при описании основных таксационных показателей древостоя.

Рост каждого дерева описывается с помощью уравнений энергетического баланса, содержащих небольшое количество ведущих параметров имеющих прямое эколого-физиологическое толкование (Колобов, Фрисман, 2013). Это позволяет проводить качественное и количественное исследование модели, ограничиваясь стандартными данными таксации леса. Лимитирование роста дерева определяется конкуренцией за свет, который является основным системообразующим фактором формирования и развития лесных экосистем на территориях с умеренным климатом (Чумаченко, 2006). Отмирание деревьев происходит в результате старения и конкуренции за световые ресурсы, что позволяет моделировать и исследовать процессы формирования видового состава биоценозов. Воспроизводство осуществляется с помощью вероятностных процессов прорастания семян в зависимости от количества генеративных особей и наличия благоприятных условий. Это дает возможность генерировать пространственное распределение и количество подроста на участке в соответствии с фактическими данными.

2. Результаты вычислительных экспериментов

На основе предложенной модели были построены различные модельные сценарии пространственно-временной динамики смешанных древесных сообществ, произрастающих на территории Дальнего Востока. В качестве исследуемых видов, рассматривались: ель, пихта, кедр и береза. Размер моделируемого участка был взят равным 40×40 м. При такой площади участка динамика запаса древесины выходит на квазистационарный уровень, при этом увеличение его размеров приводит к значительному замедлению скорости работы программы.

Проводились вычислительные эксперименты по моделированию пространственно-временной динамики многовидовых древесных сообществ в случае воздействия внешних факторов влияния. Анализ сценариев динамики подтвердил базовое положение о том, что в

долговременной перспективе при отсутствии внешних воздействий теневыносливые виды полностью вытесняет светолюбивые (рис. 1 а). Вместе с тем изъятие части темнохвойных деревьев приводит к возможности сосуществования видов неограниченно долго. На рисунке 1 б, в представлены сценарии развития двувидового сообщества при изъятии 4% и 9% деревьев темнохвойного вида от его общего объема древесины, начиная с максимального диаметра. Долю изъятия подбирали таким образом, чтобы она составляла минимальное значение необходимое для возобновления березы, и максимальное значение для возобновления ели. В первом случае доминирует теневыносливый вид, во втором наблюдаем преобладание светолюбивой березы (рис. 1 б, в). Такие режимы динамики возникают при выпадении крупных деревьев в результате ветровала, а также повреждения стволов фитифагами и характерными болезнями. Затем строились сценарии развития сообщества при ежегодном удалении части теневыносливого подроста. В случае изъятия 0.0001% деревьев темнохвойного вида от его общего объема древесины, начиная с нулевого диаметра, в системе наблюдаются длиннопериодические колебания, в которых численное преобладание светолюбивых видов сменяется преобладанием теневыносливых и наоборот (рис. 1 г). Такие режимы могут возникать, в частности, при поедании части молодых побегов копытными животными или гибели растений, вызванной вспышками фитофагов.

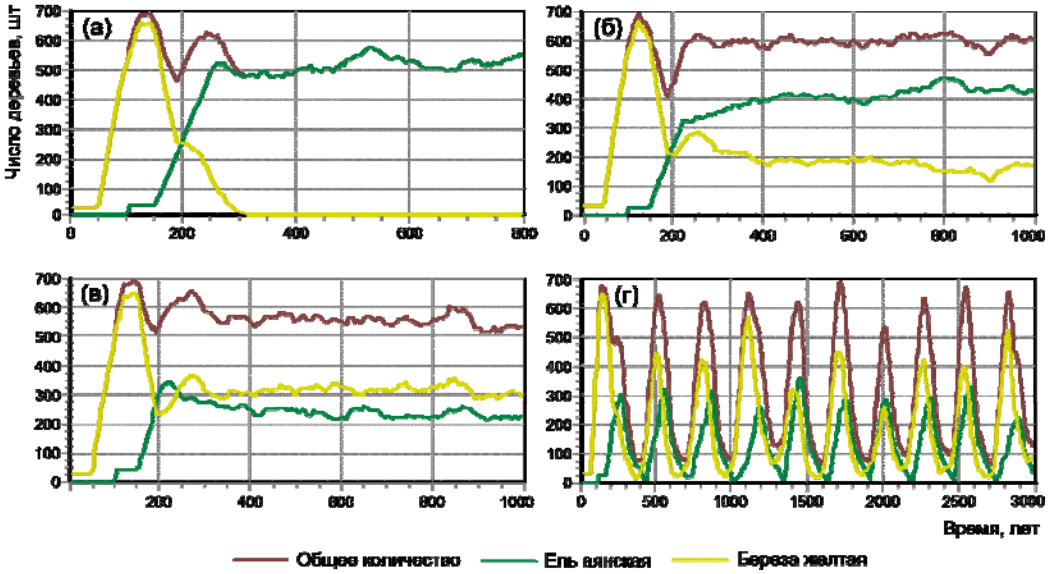


Рисунок 1 - Модельные сценарии динамики двувидового сообщества в случае изъятия доли деревьев одного из видов: а) естественное развитие сообщества без влияния внешних факторов; б) развитие сообщества, при изъятии 4% деревьев от общего объема древесины начиная с максимального диаметра; в) развитие сообщества, при изъятии 9% деревьев от общего объема древесины начиная с максимального диаметра; г) развитие сообщества, при изъятии 0.0001% деревьев от общего объема древесины начиная с нулевого диаметра.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-01-98512-р_восток_а, № 12-01-31119), ДВО РАН (проект № 12-III-А-09-195).

Литература

Чумаченко С.И. Имитационное моделирование многовидовых разновозрастных лесных насаждений: Дис. ...д-ра биол. наук. - М., 2006. - 287 с.

Колобов А.Н., Фрисман Е.Я. Моделирование процесса конкуренции за свет в одновозрастных древостоях // Известия РАН. Серия биологическая. - 2013. - № 4. - С. 463–473.

МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА В ЛЕСНЫХ ПЛАНТАЦИЯХ С ГЕННО-МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ДЕРЕВЬЯМИ ОСИНЫ

Комаров А.С.[1], Быховец С.С.[1], Ларионова А.А.[1], Шанин В.Н.[1], Лебедев В.Г.[2], Шестибратов К.А.[2]

[1] *ИФХиБПП РАН, Пущино, Россия*
as_komarov@rambler.ru
[2] *ФИБХ РАН, Пущино, Россия*
schestibratov@fibkh.serpukhov.su

Аннотация: Разработаны подходы к модельной оценке возможного влияния опада генно-модифицированных деревьев при их выращивании в лесных плантациях на динамику органического вещества почв, и выполнена такая оценка для двух экспериментальных линий осины на примере почвенно-климатических условий Северо-Запада Ленинградской области.

Потребности в древесине в мире неуклонно возрастают, в то время как площадь лесов сокращается. Возникает вопрос о возможности компенсации этих потерь за счет промышленных лесных плантаций, заложенных на основе быстрорастущих древесных видов. Одно из возможных решений – использование генетически модифицированных растений с улучшенными ростовыми характеристиками, а по возможности, и с улучшенными соотношениями лигнина, целлюлозы и других ассимилятов, входящих в состав древесины. Но такие возможные изменения вызывают закономерные вопросы о влиянии новых свойств видов на окружающую среду. Это делает актуальным использования математических моделей при анализе продуктивности плантаций быстрорастущих деревьев и их влияния на круговорот углерода (Almeida et al., 2004; Perez-Cruzado et al., 2012 и др.). Но пока такие исследования обычно ограничивались балансом углерода, а круговорот азота не рассматривался. Для условий же Северной Евразии подобный модельный анализ изменения круговоротов азота и углерода при внедрении трансгенных деревьев не проводился вообще.

Целью настоящей работы было выполнить такой анализ для модифицированных растений осины (*Populus tremula*) полученных в ФИБХ РАН (Shestibratov et.al., 2011). Для этого была использована модель динамики органического вещества лесных почв ROMUL (Chertov et al., 2001; Комаров и др. 2012). Моделировалось влияние выращивания деревьев с модифицированным геном ксилоглюканазы Xeg (изменяющим содержание гемицеллюлозы, которая в отличие от целлюлозы, является более легко разлагаемым субстратом) и геном 4-кумарат-коА-лигазы 4CL (снижающим содержания лигнина в тканях и изменяющим его состав) в сравнении с немодифицированными деревьями осины. Модельные сценарии предполагали выращивание плантаций осины с 30- и 60-летними оборотами рубок в почвенно-климатических условиях северо-запада Ленинградской области, для целей использования в целлюлозно-бумажной промышленности.

Использование модели ROMUL для поставленной задачи потребовало некоторой ее модификации. Для уточнения оценки коэффициентов модели ROMUL для скоростей преобразования опада исследуемых растений были поставлены эксперименты по разложению растительных тканей трансгенных и контрольных растений осины. Скорость разложения различных органов растения определялась по эмиссии CO_2, при различных значениях температуры и влажности субстрата. По кривым кумулятивной эмиссии CO_2, были оценены коэффициенты минерализации и гумификации опада. Полученные значения для модифицированных и контрольных растений несколько различаются, причем эти различия согласуются с различиями в их химическом составе.

В модельных сценариях опадов были также учтены различия в скорости роста различных линий осины. В частности, деревья осины с геном Xeg1b отличаются повышенной продуктивностью и скоростью роста, у деревьев с 4CL2c – они несколько

понижены. У обеих экспериментальных форм осины несколько изменено распределение фитомассы по органам. В частности, модифицированный ген 4CL приводит к большей доле прироста листвы за счет уменьшения прироста корней, в то время как растения с геном Xeg демонстрируют обратную картину.

Результаты моделирования. Запас лесной подстилки, накапливающийся к моменту очередной рубки при 60-летнем обороте рубок примерно в 4 раза больше, чем при 30-летнем. Запасы подстилки в контроле и варианте 4CL практически не различаются на протяжении всего модельного эксперимента, а в варианте Xeg – как правило, они примерно в полтора раза больше. В минеральной почве, наоборот, к контролю близок запас органического вещества в варианте Xeg, а в варианте 4CL – он несколько ниже. Причем, при обороте рубок 60 лет со временем (от цикла к циклу) наблюдается слабая тенденция к росту запаса органического вещества почвы во всех трех вариантах, но при этом увеличиваются различия между контролем и Xeg с одной стороны, и 4CL – с другой. Причем, в двух первых вариантах к третьему циклу запас гумуса восстанавливается до первоначального значения, а к концу модельного периода даже превосходит его. В случае 30-летнего интервала суммарное поступление опада существенно ниже, и не успевает компенсировать потери органического вещества почвы (хотя и отчуждение фитомассы в этом случае ниже). В результате запасы органического вещества почвы, уменьшаясь от цикла к циклу, за весь модельный период снижаются более чем в 2 раза (при сходном соотношении между вариантами). Из результатов моделирования динамики азота в органическом веществе почвы видно, что почвы под трансгенными растениями с геном Xeg накапливают азот несколько быстрее, чем с геном 4CL, но медленнее, чем в контроле. Однако, указанные различия достаточно невелики.

При сделанных предположениях результаты математического моделирования показывают, что введение трансгенных деревьев в плантационное хозяйство не приводит к необратимым изменениям в биологическом круговороте углерода и азота в соответствующих лесных почвах, ведущим к возможному разрушению лесных экосистем. Изменения в пулах углерода и азота находятся в пределах 5-7%, что не превышает реального влияния лесохозяйственных операций, в частности, режима рубок.

Более глубокий и всесторонний анализ поставленной проблемы возможен с использованием полной системы моделей лесной экосистемы, для чего, в первую очередь, необходимо уточнение параметров роста исследуемых деревьев, что требует более длительных экспериментов по их выращиванию.

Работа выполнена при поддержке Государственного контракта от «20» июня 2012 г. № 1.519.11.6043 по теме: «Трансгенные растения осины и березы с заданными характеристиками как биологические модели для прогнозирования изменений круговоротов азота и углерода в искусственных лесных экосистемах»

Литература

Комаров А.С., Хораськина Ю.С., Быховец С.С., Безрукова М.Г., Чертов О.Г. Моделирование динамики органического вещества и элементов почвенного питания в минеральной почве и лесной подстилке // Математическая биология и биоинформатика.- 2012.- Т. 7.- № 1.- С. 162–176.

Almeida A.C., Landsberg J.J., Sands P.J., Ambrogi M.S., Fonseca S., Barddal S.M., Bertolucci F.L. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in Eucalyptus plantations // Forest Ecology and Management.- 2004.- Vol. 193.- No. 1-2.- P. 167-177.

Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // Ecological Modelling.- 2001.- Vol. 138.- P. 289-308.

Perez-Cruzado C., Mohren G.M.J., Merino A., Rodriguez-Soalleiro R. Carbon balance for different management practices for fast growing tree species planted on former pastureland in southern Europe: A case study using the CO 2Fix model // Eur. Journal of Forest Research.- 2012.- Vol. 131.- No. 6.- P. 1695-1716.

Schestibratov K., Lebedev V., Podrezov A., Salmova M. Transgenic aspen and birch trees for Russian plantation forests // BMC Proceedings.- 2011.- Vol. 5 (Suppl. 7).- P. 124.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗЛИВА НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Костерина Е.А.

Казанский федеральный университет, Казань, Россия
Ekaterina.Kosterina@kpfu.ru

Аннотация: рассмотрена задача о растекании пятна загрязнения из продольной трещины трубопровода на поверхности земли, построен и реализован численный метод решения этой задачи со свободной границей, представлены результаты вычислительных экспериментов.

1. Исходная постановка задачи

Предположим, что по линии примыкания трубопровода к земле образовалась узкая продольная трещина. Форма пятна загрязнения в сечении, перпендикулярном к направлению трубы, изображена на рисунке 1.

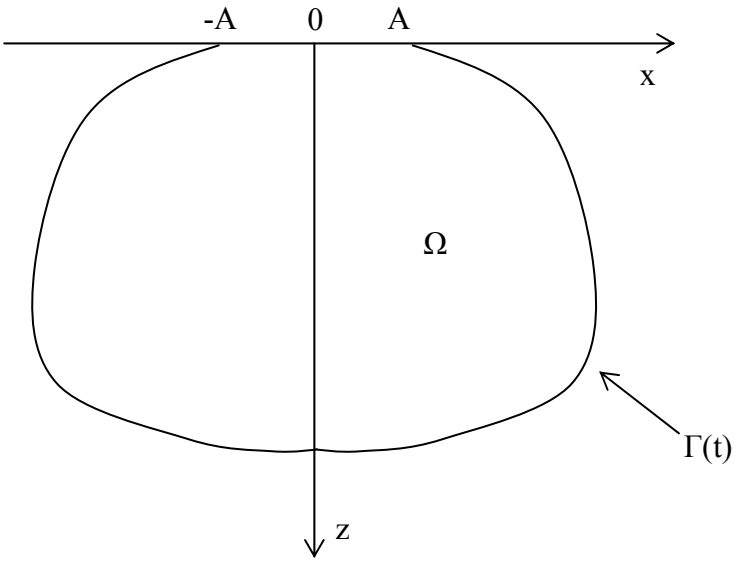


Рисунок 1 – Форма пятна загрязнения в некоторый момент времени

Поскольку пятно симметрично, будем искать границу $\Gamma(t)$ только для $x > 0$, понимая под Ω часть загрязненной области, расположенную справа от оси z. Будем считать, что насыщенность $S = 1$ в Ω, пренебрегая расположенной вдоль $\Gamma(t)$ узкой областью, где $0 < S < 1$. Основу математической модели составляют уравнение неразрывности и два условия на неизвестной подвижной границе: равенство давления жидкости нулю и условие материальности границы. Исходная постановка задачи имеет вид:

$$div\,\vec{V} = 0, \qquad (x,z) \in \Omega,\ t > 0;$$

$$V_x = -\frac{k_1^0 a(z)}{\mu}\frac{\partial p(x,z,t)}{\partial x},$$

$$V_z = -\frac{k_2^0 b(z)}{\mu}\left(\frac{\partial p(x,z,t)}{\partial z} - \rho g\right);$$

$$p = p_0 \qquad x \in [0,A], z = 0, t > 0;$$

$$\begin{cases} p = 0, \\ u = \dfrac{V_n}{m}, \end{cases} \qquad (x,z) \in \Gamma(t),\ t > 0;$$

$$V_x = 0, \qquad x = 0, z > 0, t > 0;$$
$$p \geq 0, \qquad (x, z) \in \bar{\Omega}, t > 0;$$
$$p = 0, \qquad (x, z) \in \bar{\Omega}, t = 0.$$

Здесь p – давление, $\bar{V} = \overline{(V_x, V_z)}$ – скорость фильтрации согласно закону Дарси, k_1^0 и k_2^0 – абсолютная проницаемость грунта в направлении x и z соответственно, $a(z)$ и $b(z)$ – закон изменения проницаемости грунта с глубиной в направлении x и z соответственно. Искомыми являются функции $p(x, z, t)$ и $\Gamma(x, z, t)$.

2. Численное решение задачи

Задача была обезразмерена и записана в фиксированной области с использованием идей работы (Костерина, 1995). Для более точного определения положения границы Г были развиты идеи работы (Костерина, 2010).

На рисунке 2 представлено изменение размеров пятна загрязнения на первых пяти временных слоях при сеточных шагах по времени и пространству равных 0.01. Ширина щели в трубе составляет 20 сеточных шагов. Безразмерное значение $p_0 = 0.15$.

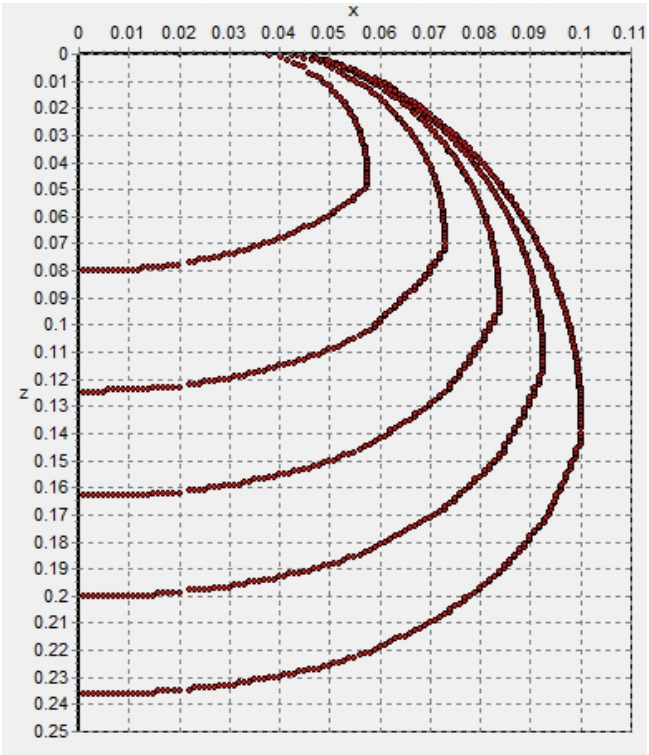


Рисунок 2 – Изменение формы пятна загрязнения по результатам расчетов

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-01-00368).

Литература

Костерина Е.А. Численное определение границы пятна углеводородного загрязнения при утечке его из трубопровода // Сеточные методы для краевых задач и приложения: материалы VIII Всероссийской конференции, посвященной 80-летию со дня рождения А.Д. Ляшко / сост. В.В. Бандеров, отв.ред. И.Б. Бадриев. – Казань: Казан. ун-т, 2010. – С.303-306.

Костерина Е.А., Лапин А.В. Решение задачи о насыщенно-ненасыщенной фильтрации жидкости в грунте с отслеживанием фронта насыщенности // Изв. вузов. Математика. – 1995. – № 6. – С.42-50.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОПУЛЯЦИЙ

Кулаков М.П. [1]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт комплексного анализа региональных проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКАРП ДВО РАН), г. Биробиджан, Россия*
k_matvey@mail.ru

Аннотация: Рассмотрена математическая модель простейшей структурированной популяции - популяции с возрастной структурой и миграцией старшей возрастной группы. Показано наличие мультистабильного характера динамических режимов, возникающих в таких моделях, а введение миграции сужает область устойчивости.

1. Построение модели

В математической популяционной биологии хорошо изучена динамика локальных популяций, описываемых моделями с непрерывным и дискретным временем. Возникающие колебания численности в них объясняются внутрипопуляционными процессами, связанными с плотностно-зависимым лимитированием роста численности, периодическим характером действия внешних факторов, межвидовыми взаимодействиям, сложным половозрастным составом. Реальные биологические популяции, обычно, пространственно распределены по своему ареалу и представлены взаимодействующими локальными группами особей, обменивающихся мигрантами, и образуют, так называемые, метапопуляции. Механизмы формирования периодической и нерегулярной динамики, в этом случае, оказываются существенно сложнее, чем отдельной изолированной популяции, и в большей степени определяются географической структурой ареала и миграционным взаимодействием.

Для количественного описания динамики подобным образом устроенных популяций удобно пользоваться богатым аппаратом нелинейной динамики и математического моделирования. В качестве одной из моделей пространственной динамики таких популяций выступают системы связанных отображений. В случае если локальная популяция представляет собой популяцию с простой структурой или популяцию с непересекающимися поколениями, особи которых совершают сезонные миграции на сопредельные территории, то пространственная динамика такой метапопуляции может быть описана системой связанных логистических отображений (Кулаков, 2010). Если локальная популяция имеет сложное внутреннее устройство, например, состоит из нескольких возрастных классов (Фрисман, 2010), из одного из которых происходит сезонная эмиграция особей, то динамику всей такой метапопуляции можно описать системой связанных систем отображений.

Рассматривается простейший случай, когда метапопуляция состоит из двух идентичных миграционно-связанных двухвозрастных популяций с плотностной регуляцией рождаемости, а миграция наблюдается между старшими возрастными классами. При стадийном характере развития особей и миграции один раз в сезон, происходящей в промежутках между процессами воспроизводства, уравнения пространственной динамики можно записать в виде:

$$\begin{cases} x_{n+1} = a y_n \exp\left(-\alpha x_n - \beta y_n\right) \\ y_{n+1} = s x_n + \nu y_n \left(1-m\right) + \nu w_n m \\ z_{n+1} = a w_n \exp\left(-\alpha z_n - \beta w_n\right) \\ w_{n+1} = s z_n + \nu w_n \left(1-m\right) + \nu y_n m \end{cases}, \qquad (1)$$

где x_n и y_n, z_n и w_n – численность младшего возрастного класса и репродуктивной части популяции в первой и второй части метапопуляции в n-й сезон, a – максимальный

коэффициент рождаемости. Коэффициенты α и β характеризуют воздействие соответствующего возрастного класса на плотностное лимитирование рождаемости. Коэффициенты s и ν выражают выживаемость младшего и старшего возрастного класса, m – коэффициент миграции репродуктивной части популяции.

2. Результаты

Система (1) помимо единственного нетривиального состояния равновесия имеет устойчивый цикл длины 3, который появляется в результате касательной бифуркации. Причем область его существования пересекается с областью устойчивости состояния равновесия (рисунок 1), что указывает на мультистабильный характер динамики системы (1).

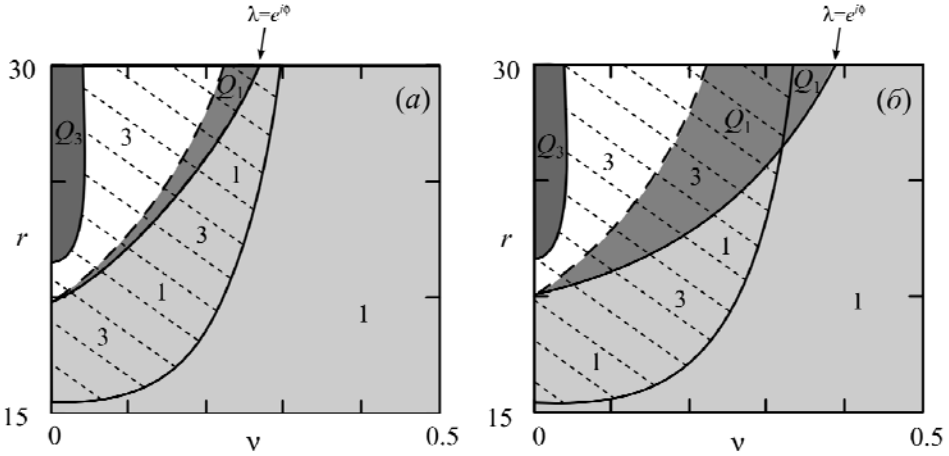


Рисунок 1 – Карты динамических режимов (*а*) синхронных и (*б*) несинхронных режимов системы (1) при $s = 0.5$, $m = 0.2$, $b = \dfrac{\alpha}{\beta s} = 0.5$, $r = \dfrac{a}{s}$

На рисунке 1 *а* изображена карта динамических режимов полностью синхронной динамики, когда $x_n = z_n$, $y_n = w_n$ при $n \to \infty$. В этом случаи система (1) эквивалента двум идентичным не связанным системам рекуррентных уравнений (Фрисман, 2010) при $m = 0$. Цифрами на рисунке 1 показаны длины устойчивых циклов, возникающие в этих областях, а буквами Q_1 и Q_3 предельные циклы образующиеся вокруг 1- или 3-цикла. Не синхронные режимы в системе (1) возможны в более широкой параметрической области (рисунок 1 *б*). На рисунке 1 левая граница устойчивости цикла Q_1 показана пунктирной линией, так как размер бассейна притяжения этого режима становится очень маленьким и данная граница показана условно.

Таким образом, можно заметить, что в зависимости от начальных плотностей популяций возможны различные динамические режимы. В частности отмечаются циклы разной длины в динамики численности на сопредельных территориях (в областях пересечения рисунков 1 *а* и *б*) вне зависимости от симметричной миграции и идентичных популяционных параметров.

Исследование поддержано ДВО РАН (конкурсные проекты 12-I-П28-02, 12-II-СО-06-019, 12-II-СУ-06-007) и РФФИ (региональный проект 11-01-98512-р_восток_а).

Литература

Кулаков М.П., Фрисман Е.Я.. Синхронизация 2-циклов в системе симметрично связанных популяций, запас–пополнение в которых описывается функцией Рикера // Изв. вузов «ПНД», 2010, Т. 18, № 6. С. 25-41.

Фрисман Е.Я., Неверова Г.П., Ревуцкая О.Л., Кулаков М.П. Режимы динамики модели двухвозрастной популяции // Изв. вузов «ПНД», 2010, т. 18, № 2. С. 111-130.

ЭНЕРГО-И МАССОБМЕН ТРОПИЧЕСКОГО ЛЕСА: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Курбатова Ю.А. [1], Авилов В.К.[1,2,3], Дещеревская О.А.[1,2], Ольчев А.В[1]

[1]*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*
kurbatova.j@gmail.com
[2]*Совместный Российско-Вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр, Ханой, Вьетнам*
[3]*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*

Аннотация: В докладе представлены результаты измерений и численного моделирования потоков тепла, влаги и углекислого газа в сезонно-влажном тропическом лесу на юге Вьетнама (национальный парк Кат Тьен). Экспериментальный материал получен на основе метода турбулентных пульсаций (eddy covariance). Одномерная процесс-ориентированная математическая модель MixFor-SVAT была адаптирована для описания процессов энерго-массобмена тропического леса.

Энерго-и массобмен тропического региона в последние годы находится в фокусе приоритетных экологических исследований, в связи с ключевой ролью тропических лесов в поддержании глобальных циклов воды и углерода, а также в связи с проблемой высоких темпов обезлесивания, характерных для стран Юго-Восточной Азии.

В ноябре 2011 г. на территории южного Вьетнама в национальном парке (НП) Кат Тьен в рамках плановых исследований, осуществляемых Совместным Российско-Вьетнамским тропическим научно-исследовательским и технологическим центром, начал работу автоматический комплекс наблюдений за потоками тепла, влаги и углекислого газа, а также широким спектром гидрометеорологических параметров атмосферы и гидротермических характеристик почвы. НП Кат Тьен находится в 150 км к северо-востоку от Хошимина. Вся территория Вьетнама по общеупотребительной российской классификации климатов Б.П. Алисова (классификация по режиму циркуляции воздушных масс) относится к субэкваториальному климату (климат экваториальных муссонов). Сухой сезон длится с октября по апрель, влажный – с мая по сентябрь. Годовое количество осадков на юге Вьетнама превышает 2500мм. Лесной полог характерен для древостоев тропического муссонного долинного высокоствольного леса. Лесные древостои НП имеют сложную структуру. В вертикальном строении прослеживается от трех до пяти ярусов.

Наблюдения за потоками тепла и CO_2 осуществляются на основе метода пульсационных наблюдений (eddy covariance). Инструментальная база измерительного комплекса в целом соответствует измерительной аппаратуре, используемой в сети FLUXNET(http://fluxnet.ornl.gov). Газоанализатор (LiCor 7500, LiCor Inc., USA) и ультразвуковой анемометр (CSAT3, Campbell Sci., USA), комплекс метеорологических датчиков расположены на вершине металлической вышки высотой 50 м. Высота древостоя под вышкой 35-37м. Потоки тепла, воды и CO_2 регистрируются в непрерывном режиме с частотой 10 Гц. Все данные в процессе дальнейшей обработки усредняются до получасовых значений. К настоящему времени получены оценки суточной, сезонной и межгодовой изменчивости нетто-экосистемного обмена, экосистемного дыхания общей первичной продукции, оценки основных составляющих теплового баланса. Полный год наблюдений (2012) показал, что исследуемый древостой является стоком CO_2, поглощая 318 гС $м^{-2}$ $год^{-1}$.

Для описания процесса взаимодействия лесной полога тропического леса и атмосферы в условиях изменяющегося климата была использована одномерная процесс-ориентированная математическая модель MixFor-SVAT (Ольчев с соавт. 2008, Oltchev et al 2002, 2009). Модель адаптирована для описания процессов H_2O и CO_2 обмена как в травянистых растительных сообществах, так и в сложных древостоях с различной видовой структурой, и

использует сопряженное описание физических и биологических процессов, протекающих на различных иерархических уровнях растительного сообщества от уровня отдельного листа до уровня отдельного растения, и всей экосистемы в целом. Основным преимуществом MixFor-SVAT модели является ее способность не только описать сезонную и суточную динамику интегральных потоков H_2O и CO_2 между земной поверхностью и атмосферой, но также и оценить вклад почвы, лесной подстилки и деревьев разных пород в древесном ярусе в суммарные потоки с учетом их фенологических различий, индивидуального отклика на изменения условий внешней среды, а также различий в структуре и биофизических свойствах. Модель состоит из тесно взаимосвязанных блоков, описывающих перенос солнечной коротковолновой и длинноволновой радиации, турбулентный режим, транспирацию, испарение перехваченных растительностью атмосферных осадков, испарение с поверхности почвы; фотосинтез, гетеротрофное и автотрофное дыхание растений и почвы, перенос тепла и влаги в почве. Применение подхода Фаркхара (Farquhar et al 1980) позволяет проводить расчеты скорости ассимиляции CO_2 и дыхания растений с учетом возможных изменений запасов минеральных веществ в растениях и почве, а также содержания CO_2 в воздухе.

В докладе представлены результаты сравнения экспериментальных данных и модельных расчетов, а также первые оценки энерго-и массобмена муссонного тропического леса при прогнозируемых климатических изменениях в регионе Юго-Восточной Азии.

Литература

Ольчев А.В., Курбатова Ю.А., Варлагин А.В., Выгодская Н.Н. Модельный подход для описания переноса CO2 между лесными экосистемами и атмосферой // Лесоведение. 2008. № 3. С. 3–13.

Farquhar G.D., von Caemmere S., Berry J.A. A biochemical model of photosynthetic CO2 assimilation in leaves of C3 species // Planta, 1980, V. 149, P. 78–90

Oltchev A., Cermak J., Nadezhdina N., Tatarinov F., Tishenko A., Ibrom A., Gravenhorst G. Transpiration of a mixed forest stand: field measurements and simulation using SVAT models // Bor. Env. Res. 2002. V.7(4). P. 389-397

Olchev A., Ibrom A., Ross T., Falk U., Rakkibu G., Radler K., Grote S., Kreilein H., Gravenhorst G. A modelling approach for simulation of water and carbon dioxide exchange between multi-species tropical rain forest and the atmosphere // Ecological Modelling 2008. V.212. P. 122–130

ДИНАМИКА ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ ПРИ СМЕНЕ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД

Курганова И.Н.[1], Архангельская Т.А.[2], Ермолаев А.М.[1], Ларионова А.А.[1]

[1]*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия;* ikurg@mail.ru

[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия* arhangelskaia@gmail.com

Аннотация: Изменения в запасах углерода в процессе зарастания пашни луговой растительностью в зависимости от режима использования луга были оценены при помощи модели Century. Для всех вариантов модель предсказывает рост запасов углерода в верхней 20-см толще почвы. Наиболее точно модель описывала динамику ОВ на неудобренном, некосимом варианте.

1. Введение

Динамика органического вещества (ОВ) почвы определяется процессами его трансформации и является одним из главных макропроцессов формирования и функционирования почвенной системы (Чертов и др., 2007). Изменение землепользования, как правило, существенным образом меняет ход естественной динамики ОВ и поэтому представляет особый интерес как для экспериментального изучения, так и для применения модельного подхода, позволяющего не только численно охарактеризовать изменения ОВ в ходе новых сукцессий, но строить прогнозы на будущее с использованием различных климатических или иных сценариев. Применение динамических моделей подразумевает два основных этапа – параметризацию модели с целью улучшения качества расчетов и ее верификацию (проверку), которая базируется на сравнении имеющихся экспериментальных данных с расчетными (Bortolon et al., 2011). Наблюдения за динамикой ОВ почв в ходе длительных полевых опытов часто служат объектом для применения отдельных динамических моделей или для сравнения нескольких моделей между собой (Palosulo et al., 2012). Цель настоящей работы состояла в параметризации и последующей верификации модели CENTURY для описания изменений в запасах углерода в процессе зарастания пашни луговой растительностью в зависимости от режима использования луга.

2. Объекты и методы исследования

Объект исследования. Наблюдения за динамикой ОВ в почве проводили в рамках многолетнего полевого опыта по искусственному залужению пахотной серой лесной почвы, заложенном в 1979 г. на Опытно-полевой станции ИФХиБПП РАН (г. Пущино, Московская обл., 54°50’ N, 37°35’ E). Экспериментальный участок общей площадью 8 га был разделен на 4 варианта: некосимый неудобряемый (НН), некосимый удобряемый (НУ), косимый неудобряемый (КН) и косимый удобряемый (КУ). Внесение удобрений ($N_{60}P_{60}K_{60}$) проводилось ежегодно в начале весны с 1982 по 2000 г., косили участки, как правило, в начале июля в момент максимального развития травостоя с 1982 по 2003 г. В течение первых 18 лет эксперимента в течение вегетационного периода ежемесячно проводили определение надземной и подземной фитомассы, и затем по уравнениям баланса (Методы…, 1978) рассчитывали продуктивность травостоя и другие характеристики продукционного процесса (Ермолаев Ширшова, 2000). Запасы органического углерода ($C_{орг}$) в слое 0-20 см были определены в 1999, 2004 и 2009 гг. Климатические данные за 1979-2011 были предоставлены сотрудниками Станции Фонового мониторинга (п. Данки, Московская обл.), расположенной в 7.5 км от экспериментального участка.

Описание модели. Для расчета динамики ОВ в почве использовалась CENTURY Model (version 4.0, NREL., 2009). Расчеты проводились для периода 1982-2011 гг.; начальное

содержание органического углерода в верхних 20 см почвы задавалось равным 2180 г/м^2 в соответствии с (Larionova et al., 2003). Соотношение фракций sand/silt/clay составляло 28/51/21. Для каждого месяца в течение расчетного периода задавалась минимальная и максимальная температура воздуха, а также количество осадков. Для растительного блока использовались параметры, характерные для высокотравной прерии. Настройка модели производилась подбором максимальной продуктивности экосистемы, так чтобы прирост надземной фитомассы в 1983 и 1984 гг. в модели соответствовал экспериментально измеренному. При этом предполагалось, что параметры функционирования растительного сообщества не меняются в течение расчетного периода. Внесение удобрений моделировалось с помощью встроенного в модель CENTURY модуля N5, соответствующего внесению 5 г азота на 1 м^2; укосы – с помощью модуля Hay, соответствующего отчуждению 80 % надземной биомассы с одновременной гибелью 10 % подземных корней.

3. Результаты и обсуждение

Модель CENTURY предсказывает рост запасов $C_{орг}$ в верхней 20-см толще почвы в ходе залужения пахотной серой лесной почвы (Рис.). К 2011 г. расчетные запасы углерода составили около 4500 г/м^2 для некосимых площадок и около 4000 г/м^2 – для косимых. Внесение азота несколько повышало скорость роста запасов углерода и в косимом, и в некосимом вариантах. Среднеквадратичные ошибки расчетов запасов углерода, полученные сопоставлением расчетных величин с экспериментальными данными 1999, 2004 и 2009 гг., составили 301 (НН), 619 (НУ), 993 (КН) и 670 г/м^2 (КУ). Наиболее точное совпадение экспериментальных и расчетных данных обнаружено на неудобренном, некосимом варианте.

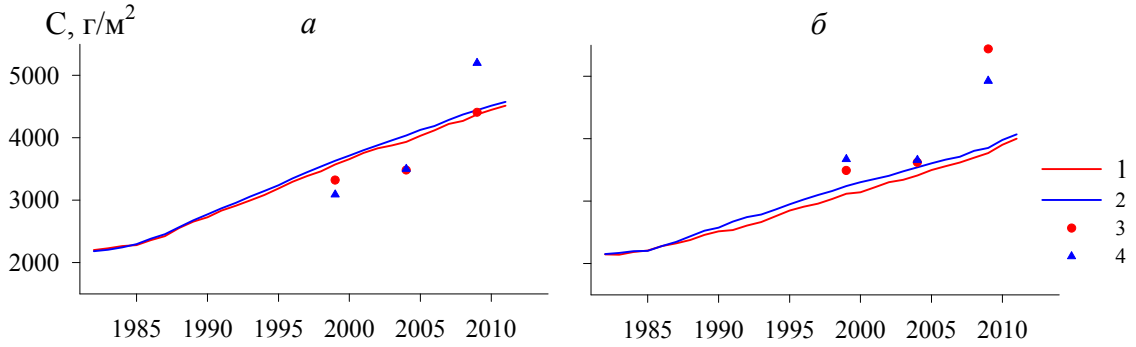


Рисунок. Динамика содержания органического углерода в верхнем 20-сантиметровом слое почвы С, г/м^2, для некосимых (*а*) и косимых (*б*) площадок: результаты моделирования (1, 2) и экспериментальные данные (3, 4) для неудобряемого (1, 3) и удобряемого вариантов (2, 4).

Литература

Ермолаев А.М., Ширшова Л.Т. Влияние погодных условий и режима использования сеяного луга на продуктивность травостоя и свойства серых лесных почв // Почвоведение. 2000. № 12. С.1501-1508.

Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. М.: Мысль, 1978. 183 с.

Чертов О.Г., Комаров А.С., Надпорожская М.А.Модели динамики органического вещества почв // Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. М.: Наука, 2007. С.19-33.

Bortolon E.S.O., Mielniczuk J., Tornquist C.G. et al. Validation of the Century model to estimate the impact of agriculture on soil organic carbon in Southern Brazil // Geoderma. 2011. Vol. 167-168. P. 156-166.

Larionova A., Rozanova L., Yevdokimov I. et al. Land-use change and management effects on carbon sequestration in soils of Russia's South Taiga zone // Tellus B. 2003. Vol. 55. P. 331-337.

NREL Natural Reouese Ecology Laboratory. CENTURY 4. (Available at http://www.nrel.colostate.edu/projects/century/)

Palosulo T., Foereid B., Svensson M. et al. A multi-model comparison of soil carbon assessment of coniferous forest stand // Environmental Modeling and Software. 2012. Vol. 35. P.38-49.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ДВУХ МИГРАЦИОННО-СВЯЗАННЫХ СООБЩЕСТВ ТИПА «РЕСУРС-ПОТРЕБИТЕЛЬ»

Курилова Е.В., Кулаков М.П.[1]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт комплексного анализа региональных проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКАРП ДВО РАН), г. Биробиджан, Россия*
katkurilova@mail.ru, k_matvey@mail.ru

Аннотация: Для изучения закономерностей развития миграционно-связанных сообществ, заселяющих соседние регионы, разработана и исследована модификация математической модели динамики численности двух сообществ типа «ресурс-потребитель», связанных миграциями потребителя. Определены условия синхронизации колебаний рассматриваемых сообществ, изучено влияние миграционного взаимодействия между сообществами на динамику каждой популяции.

1. Введение

В связи с усилившимся воздействием человека на природу проблемы экологии приобретают особое значение. Для решения экологических проблем необходимы специальные методы построения и исследования математических моделей экологических процессов. Наиболее глубоко математические методы проникли в исследование вопросов динамики численности биологических популяций, занимающих центральное место в задачах экологии и популяционной генетики. Для описания динамики таких популяций традиционно используют нелинейные модели, учитывающие основные факторы их развития (рождаемость, смертность, межвидовые взаимодействия, миграция) (Ризниченко, 2003).

К настоящему времени в разных странах и в разных изданиях опубликовано большое количество работ, авторы которых рассматривают те или иные конкретные задачи теории биологических популяций и решают их различными методами. Наибольшее распространение получили методы, основанные на теории дифференциальных и разностных уравнений. Особый интерес представляет выявление условий синхронизации изменений численностей двух или многих взаимосвязанных сообществ.

2. Модель миграционно-связанных сообществ

Нами разработана модификация математической модели динамики численности двух сообществ типа «ресурс-потребитель», связанных миграциями потребителя. Особое внимание уделено определению условий синхронизации колебаний численности таких сообществ и изучению влияния миграционного взаимодействия между сообществами на динамику каждой популяции. Исследование основывается на модели Базыкина (Базыкин, 1985), являющейся одним из развитий модели Вольтера (Вольтера, 1976). Так же вводятся новые по отношению к исходной модели факторы: нелинейный характер размножения популяции жертвы, насыщение хищника, внутривидовая конкуренция в популяции жертвы, вызываемая ограниченностью ресурсов, и миграция хищника. Таким образом, уравнения динамики численности двух миграционно-связанных сообществ имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = ax_1 \dfrac{K - x_1}{K} - \dfrac{bx_1 y_1}{1 + Ax_1} \\ \dot{y}_1 = -cy_1 + \dfrac{dx_1 y_1}{1 + Ax_1} + my_2 - my_1 \\ \dot{x}_2 = ax_2 \dfrac{K - x_2}{K} - \dfrac{bx_2 y_2}{1 + Ax_2} \\ \dot{y}_2 = -cy_2 + \dfrac{dx_2 y_2}{1 + Ax_2} + my_1 - my_2 \end{cases} \quad (1)$$

где a – скорость размножения популяции жертвы в отсутствии хищника, $f = a/K$ – коэффициент внутривидовой конкуренции жертв (самолимитирование), b – удельная скорость потребления популяцией хищника популяции жертвы при единичной плотности обеих популяций, c – естественная смертность хищника, d/b – коэффициент переработки потребленной хищником биомассы жертвы в собственную биомассу, A – коэффициент насыщения хищника, m – коэффициент миграции хищника.

Система (1) состоит из двух подсистем идентичных модели Базыкина (Базыкин, 1985), связанных между собой миграцией хищника. Аналитическое исследование показало наличие у системы (1) от двух до шести особых точек. При $m = 0$ каждая из подсистем по переменным x_1, y_1 или x_2, y_2 обладает устойчивыми периодическими режимами динамики (предельный цикл). В связи с этим в работе изучаются условий синхронизации колебаний численности связанных сообществ при миграции хищника, т.е. $m > 0$.

3. Выводы

В результате исследования показано, что введение коэффициента миграции, который является параметром связи между двумя подобными соседними сообществами, в классическую модель типа «ресурс-потребитель», приводит к синхронизации колебаний рассматриваемых систем. При этом происходит как захват периода колебаний, так амплитуды и фазы. От величины данного коэффициента зависит скорость синхронизации этих систем. Показано, что при малой интенсивности миграций для достижения полной синхронизации каждому сообществу может потребоваться разное число популяционных циклов, что связано с первоначальным различием в длинах периодов колебаний изолированных систем. Найдено максимальное значение относительной доли миграции, соответствующее наиболее быстрой синхронизации колебаний рассматриваемых сообществ, при переходе через которое время достижения полной синхронизации увеличивается.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ДВО РАН (конкурсные проекты 12-I-П28-02, 12-II-СУ-06-007) и РФФИ (региональный проект 11-01-98512-р_восток_а).

Литература

Базыкин А.Д.. Математическая биофизика взаимодействующих популяций. М., Наука, 1985.- 181с.

Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование / пер-д с фран. О.Н. Бондаренко/ под ред. Ю.М. Свирежева. М.: Наука, 1976. 288 с.

Ризниченко Г.Ю. Математические модели в биофизике и экологии. Москва-Ижевск, ИКИ, 2003, -184 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ТОКСИЧНЫМ КОМПОНЕНТОМ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА – НЕСИММЕТРИЧНЫМ ДИМЕТИЛГИДРАЗИНОМ

Курочкина Г.Н.

ФГБУН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, г. Пущино Московской области, Россия
colloid41@rambler.ru

Аннотация: В модельном эксперименте с помощью метода ЭПР - спектроскопии установлено влияние токсичного компонента ракетного топлива - несимметричного диметилгидразина (НДМГ) на парамагнит-ную активность гумуса почв Убсу-Нурской котловины и серой лесной почвы. Проведен математический анализ указанного влияния, и смоделирована функциональная зависимость интенсивности спектра ЭПР от концентрации компонента ракетного топлива. Полученные данные показали, что построенная регрессионная модель зависимости интенсивности спектра ЭПР от дозы НДМГ в изученном интервале концентраций лучше согласуется с экспериментом, чем стандартная полиномиальная модель, что представляет практический интерес.

Введение

Обеспечение экологической безопасности при эксплуатации ракетного топлива связано с оценкой реакции природных систем на скоротечные воздействия его компонентов. Прежде всего это относится к почве как основному накопителю, преобразователю и хранителю загрязняющих веществ. Главной экологической функцией почвы в биосфере является функция катаболизма – окислительно-восстановительный процесс трансформации сложных органических веществ. К числу таких веществ относится основной и наиболее токсичный компонент ракетного топлива - несимметричный диметилгидразин (НДМГ), относящийся к классу органических аминов и обладающий сильными восстановительными свойствами.

Цель работы - изучение влияния концентрации загрязнителя – несимметричного диметилгидразина (НДМГ) на парамагнитную активность различных типов почв Убсу-Нурской котловины, отличающихся содержанием и составом гумуса и серой лесной почвы и построение математической модели этого влияния.

Объекты и методы

Для работы использовали модельные объекты – почвы вертикального зонального ряда Убсу-Нурской котловины, сформировавшихся в условиях резко континентального климата при своеобразии факторов почвообразования, осложненных котловинным эффектом. Изучены 16 образцов почв различной типовой принадлежности, которые различались химическими и физическими свойствами, в том числе, гумусным состоянием (Курочкина и др., 2006). При загрязнении почв НДМГ были выбраны 7 образцов этих почв из трех групп с сильным, средним и слабым влиянием содержания и состава гумуса на их парамагнитную активность (Курочкина, Гайдалович, 2010). Использовали также серую лесную почву Московской области Верхнеокского района пахотный горизонт (0-20 см). Серая лесная почва характеризовалась следующими физико-химическими характеристиками: содержание гумуса, %: 2,3 ± 0.05; pH солевой - 5,5 ± 0,07; гидролитическая кислотность, мг-экв./100 г: 2,4 ±0,09; сумма обменных оснований, мг-экв./100 г: 17,8 ± 0,52; физическая глина, %: 37,4 ± 0,31; физический песок, %: 62,6 ± 0,31; частицы менее 0,001 мм,%: 14,3 ±0,28.

Загрязняющее вещество - токсичный компонент ракетного топлива – несимметричный диметилгидразин относится к ряду органических аминов и обладает восстановительными свойствами. Основность его ниже чем аммиака. Для НДМГ pKά при 100C = 7,12. ПДК в почве=0,1 мг/кг. Дозы НДМГ составляли, мг/кг почвы: 0; 0,05; 0,10; 0,20; 0,40; 1,0; 3,0; 10,0; для них рассчитаны соответствующие величины интенсивности спектра ЭПР, они составляли: 31,25; 50,21; 63,43; 38,60; 30,62; 22,54; 16,45; 15,66. Спектры ЭПР

снимали на радиоспектрометре типа РЭ-1306. Парамагнитная активность исходных и загрязненных почв оценивалась методом ЭПР по трем параметрам: g-фактору, ширине, форме спектра и по его интенсивности.

Результаты и обсуждение

Разработана математическая модель зависимости интенсивности спектра ЭПР почв Убсу-Нурской котловины от концентрации компонента ракетного топлива (НДМГ). Использованы различные способы обработки результатов с помощью компьютерной системы «MAPLE» и «Mathcad»:

1) сплайнами третьей степени, f(x)

2) аппроксимацией многочленами 4-й степени методом наименьших квадратов (полином) P4(x),

3) функциональной аппроксимацией методом наименьших квадратов, при этом функцию

$$h(x) = a_0 e^{-b_0 x} + a_1 e^{-b_1 x} + \frac{a_2}{1+x} + \frac{a_3}{1+100(x-c)^2} \qquad (1)$$

подбирали по характеру изменения интенсивности спектра ЭПР при увеличении дозы НДМГ. Как видно, установленная функция h(x) состоит из показательных, гиперболического слагаемых и локона Аньези.

Эффективность методов полинома p(x) п. 2) и функции h(x) п.3) оценивалась с помощью величины:

$$\Delta_H = \sum_{i=1}^{6} \left(H\left(x_i\right) - z_i\right)^2 \qquad (2)$$

равной сумме квадратов уклонений данных от теоретических, где xi - доза НДМГ, H(xi) – значение аппроксимирующей функции, zi – соответствующее значение интенсивности спектра ЭПР, c – значение концентрации, при которой достигается максимум интенсивности спектра ЭПР для 4-го слагаемого функции. Статистический анализ полученной модели показал следующее: 1.Индекс корреляции для всех видов почв находился в пределах 0,97-0,99, что свидетельствует о достаточно тесной связи между признаками. 2. Средняя ошибка аппроксимации колеблется для разных видов почв в пределах 0.2-11.8%. 3. Оценка значимости найденной модели по критерию Фишера неизменно превышает критические значения распределения Фишера-Снедекора со степенями свободы к1 = s-1 (s –число оцениваемых параметров, в нашем случае s=4), к2 = n – s (n – число наблюдений), что говорит о надежности модели. Установлено, что внесение НДМГ в небольших количествах повышает интенсивность спектра ЭПР для большинства почв Убсу-Нурской котловины, также как и для серой лесной почвы, инициирует реакцию образования свободных радикалов и повышает химическую активность почв. С целью проверки полученной математической модели влияния доз НДМГ на интенсивность спектра континентальной почвы была опробована указанная модель на серой лесной почве. Полученные результаты на серой лесной почве - объекте, не относящегося к Убсу-Нурским образцам, подтвердили эффективность модели, разработанной на материале Убсу-Нурских почв. Так, вышеприведённые вычисления показали, что уклонение модельной интенсивности от экспериментальной, измеряемой средней дисперсией, почти в 6 раз меньше уклонения при стандартной полиномиальной регрессии, что имеет практическое значение для использования разработанной модели для других почв России, загрязненных НДМГ или его аналогами.

Таким образом показано, что построенная регрессионная модель зависимости интенсивности спектра ЭПР от дозы НДМГ в изученном интервале концентраций лучше согласуется с экспериментом, чем стандартная полиномиальная модель, что представляет практический интерес.

Математические расчеты выполнены к.ф-м.н. В.Г. Гайдаловичем†
(Серпуховской Военный Институт ракетных войск).

Литература

Курочкина Г.Н., Гайдалович В.Г., Хакимов Ф.И. Парамагнитная активность органического вещества почв Убсу-Нурской котловины. // Почвоведение, 2006. №7.С. 812-823.
Курочкина Г.Н., Гайдалович В.Г. Анализ влияния концентрации НДМГ на почвы Убсу-Нурской котловины. // Агрохимия, 2010. №5. С. 59-71.

ДИНАМИКА АКТИВНОСТИ ПРИРОДНОГО ОЧАГА ХАНТАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ: АВТОНОМНЫЕ И/ИЛИ ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ?

Кшнясев И.А.[1], Бернштейн А.Д.[2]

[1]*ИЭРиЖ УрО РАН, Екатеринбург, РФ*
kia@ipae.uran.ru
[2]*ИПиВЭ им. М.П. Чумакова, РАМН, Москва, РФ*
centrglps@rambler.ru

Аннотация. Данные о плотности Пуумала антиген-позитивных рыжих полевок использованы для создания модели, имитирующей динамику активности очага хантавирусной инфекции. Показано, что без учета «интервенций» внешней квазипериодической силы («делеций или инсерций» лет с высоким/низким обилием зимних кормов), синхронизирующих раннее/обычное начало размножения рыжей полевки и ХВ «вспышку» – прогноз активности очага «теряет фазу».

Понимание механизмов колебаний активности природных очагов и предсказание вспышек хантавирусных (ХВ) эпидемий у человека – актуальная проблема эпидемиологии и медицинской териологии (Кшнясев и др, 2012; Zhigalskii et al. 2013). Эпизоотологический мониторинг рыжей полевки (РП, *Myodes glareolus*) – резервуарного хозяина ХВ Пуумала проведен в активном очаге ГЛПС в окрестностях города Ижевск (56°50′СШ 53°11′ ВД) в 1981-1995 гг. (15 лет) четыре раза в год (рисунок 1), а 25 лет (август, 1981-2005) – лишь один раз в год (рисунок 2); ХВ-антиген (AG^+) в лёгких РП выявлен иммуноферментным методом (Бернштейн и др., 2010).

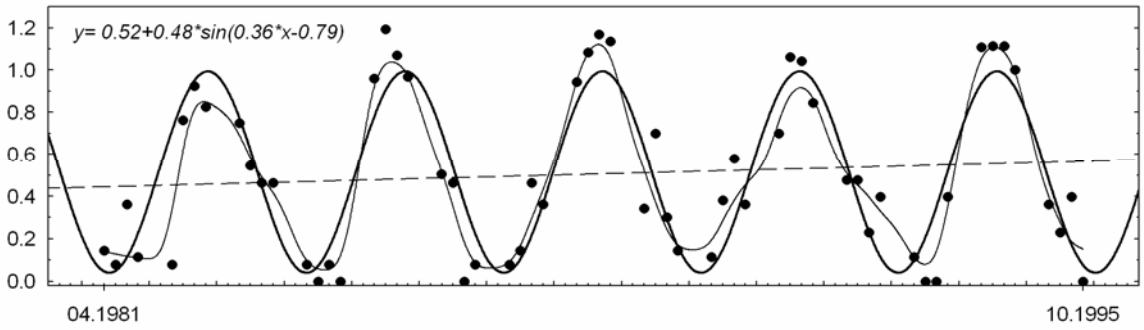


Рисунок 1 - Динамика ХВ активности природного очага как логарифма плотности (*lg(N+1), N* - особей/100 ловушко-суток) Пуумала антиген-позитивных рыжих полевок. Абсцисса – номер отсчета (апрель 1981 г., *x=0*, 6 отсчетов = 1 год). Ижевск, апрель-октябрь, 1981-1995 гг. *Точки – данные; штрих – линейный тренд; тонкая линия – скользящее среднее (4253H фильтр) удаляет сезонную компоненту и «ВЧ шумы»; жирная линия – гармоническое колебание, R^2=0.79, T= (2π/ω)/6 = 2.9 (95% ДИ: 2.85–3.0) года.*

Моделирование позволило описать (R^2=0.79) первую часть ряда наблюдений (рисунок 1) как колебание, близкое к гармоническому – с периодом ≈3 года, а данные однократных наблюдений удачно воспроизводятся моделью нелинейного плотностно-зависимого роста (рисунок 2). Однако, прогноз активности «теряет фазу» (и соответственно свою ценность!) наблюдаемого колебания, если осуществляется (рисунок 2) без учета «интервенций» квазипериодической внешней силы – предшествующих «тучных лет» с высоким обилием зимних кормов, которые синхронизируют ХВ вспышку через раннее начало размножения РП и связанного с ним скачком риска инфицирования неиммунных особей. Фиксация «зимнего» размножения (репродуктивного отклика полевок на обильный урожай плодов липы (*Tilia cordata*) в предшествующем году) является наиболее точным (с упреждением 0.5 года) предиктором вспышки как активности ХВ очага, так и эпидемии

ГЛПС у человека (γ=0.78), мониторинг же только урожая плодов липы обеспечивает более ранний, но менее точный прогноз (γ=0.60). Таким образом, динамика активности исследованного природного ХВ очага может быть сравнима с (возможно, автономным) колебанием, синхронизируемым импульсами внешней квазипериодической силы, а эпизоотические вспышки (по контрасту с другими частями ареала резервуарного хозяина) сопоставлены явлению резонанса.

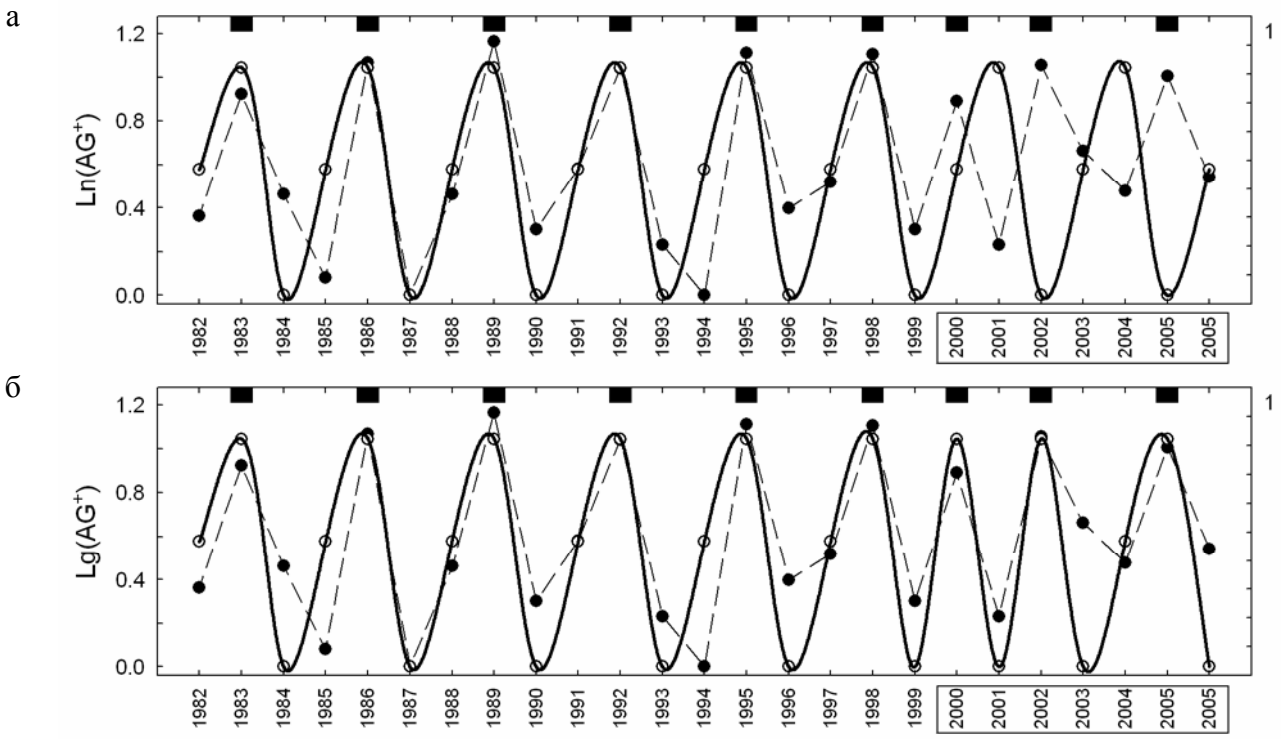


Рисунок 2 - Наблюдаемая (*lg(N+1), N* - особей/100 ловушко-суток) плотность Пуумала антиген-позитивных (AG^+) рыжих полевок (точки и штриховая линия) в августе 1982-2005 гг. и динамика (кружки и жирная линия), порождаемая детерминированной моделью нелинейного плотностно-зависимого роста – разностным уравнением $N(t+1)=1 + 2.8N(t)\{1 + [N(t)/4.3]^{24.9}\}^{-1}$, параметры оценены по фрагменту 1982-1999 гг., годы в рамке использованы только для верификации прогноза. *Столбики сверху – зимнее размножение РП. Корреляция предсказанных и наблюдаемых значений для 1982-1999 гг. –* $R_{1982-1999} = 0.92$, $t = 9.44$; *для всего ряда* $R_{1982-2005} = 0.56$, $t = 3.23$ *(А), но если учесть сдвиг, сопоставленный эффекту «внешней вынуждающей силы» (Б) то,* $R_{1982-1999} = 0.91$, $t = 10.83$.

Литература

Бернштейн А.Д., Гавриловская И.Н., Апекина Н.С. Особенности природной очаговости хантавирусных зоонозов // Эпидемиология и вакцинопрофилактика, 2010, №2, С. 5-13.

Кшнясев И.А., Жигальский О.А., Бернштейн А.Д., Апекина Н.С., Останина М.Г. Статистическое моделирование активности очага Пуумала хантавирусной инфекции // Современные проблемы природопользования, охотоведения и звероводства. Киров 2012. С. 356-357.

Zhigalskii O. A., Bernshtein A. D., Kshnyasev I. A., Apekina N. S. Ecological mechanisms of HFRS activity in European foci: Prognosis of incidence // Russian Journal of Ecology, 2013, Vol. 44, No. 3, pp. 267–270.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА И СВЕРХДИСПЕРСИЯ: СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШАНСОВ ИНВАЗИИ И СРЕДНЕЙ ИНВАЗИРОВАННОСТИ ХОЗЯЕВ КРОВОСОСУЩЕЙ МУХОЙ *PENICILLIDIA MONOCEROS* SPEISER, 1900

Кшнясев И.А., Орлова М.В., Орлов О.Л.

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия
kia@ipae.uran.ru

Аннотация: Оценены шансы и средняя инвазированность эктопаразитом *P. monoceros* хозяина – прудовой ночницы, в зависимости от пола хозяина и времени с начала зимовки. Двухкомпонентная «барьерная» модель (hurdle model) – комбинация двух распределений: биномиального для вероятности инвазии, и Гамма для численности (и двух уравнений регрессии соответственно), дает унифицированный и гибкий инструмент статистического моделирования счетных данных даже в условиях их сверхдисперсии (overdispersion).

Стандартным статистическим инструментом для моделирования счетных данных (целые, ≥0) является регрессия Пуассона – один из вариантов унифицированного аппарата GLM – теории *обобщенных линейных моделей* (McCullagh, Nelder, 1989). Однако, достаточно часто реальные данные характеризуются существенными отклонениями от теоретического распределения Пуассона. Например, эксцессом нулевых значений (ZIP – Zero Inflated Poisson) и/или нарушениями предположения о параметре дисперсии Var(Y)≠E(Y). Инфляция параметра дисперсии (overdispersion) может быть следствием игнорирования какого-либо важного фактора изменчивости. Например, в приведенном ниже сюжете невозможен учет эффекта возраста хозяина.

Задача исследования – оценка шансов и средней инвазированности прудовой ночницы (*Myotis dasycneme* Boie, 1825) эктопаразитом *Penicillidia monoceros* в зависимости от пола хозяина и времени с начала зимовки. Методы сбора данных опубликованы ранее (Orlova et al., 2012).

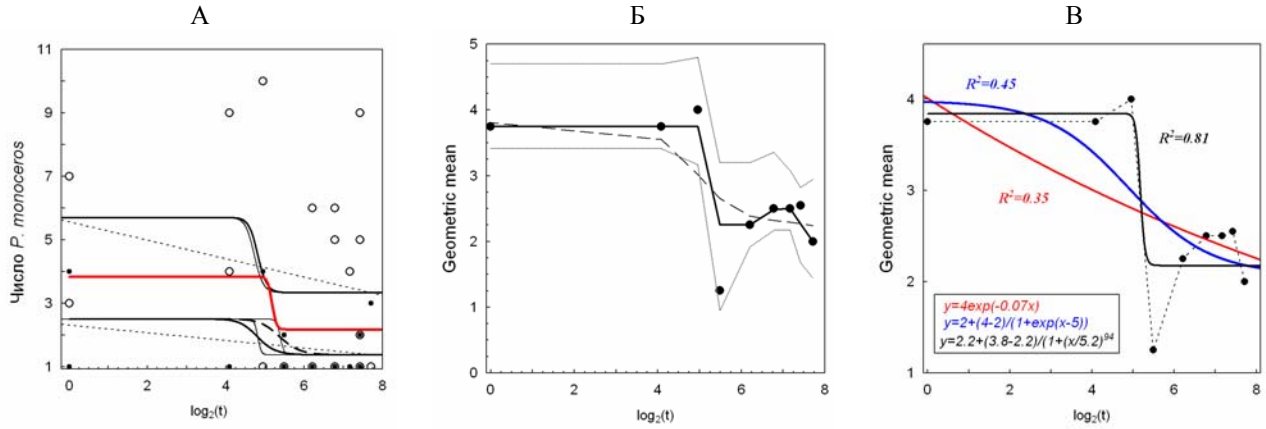


Рисунок 1. Инвазированность (y_i>0) хозяина (прудовой ночницы) мухой кровосоской *P. monoceros* во время (t) зимовки: А) наблюдаемое число особей эктопаразита: кружки – самки хозяина, точки – самцы, кривые подогнаны по средним геометрическим значениям; Б) и В) средние геометрические для сроков наблюдений: Б) непараметрическое сглаживание – LOESS и бутстрепный 95% ДИ; В) параметрическое сглаживание.

«Наивный» статистический анализ был способен выявить лишь наиболее сильный эффект – половую специфику зараженности, но для обнаружения эффекта времени в условиях нелинейной динамики и сверхдисперсии подобный аппарат не обладает достаточной чувствительностью/мощностью. Так, ни регрессия Пуассона (ZIP), ни отрицательная биномиальная (ZINB) регрессия (Jackman, 2006), ни бутстрепинг оказались не способны признать «статистически значимым» эффект времени (не приведены). Более

мощным инструментом показал себя аппарат обобщенных аддитивных моделей – GAM (Junger, Ponce de Leon, 2007), использующий сплайн функции (SF): так, уровень инвазированности для самцов прудовой ночницы оценивается в среднем на 1-2 эктопаразита меньше, а «смертность» *P. monoceros* – порядка одной особи в месяц (таблица 1). Паллиативное решение – осреднение численности эктопаразита (независимо от пола хозяина) по срокам наблюдений позволяет «избавиться» от изменчивости численности эктопаразита между особями хозяина, далее возможно использовать как ресемплинг, так и МНК для явно-параметризованных функций (рисунок 1, Б или В, соответственно). Однако, высокая цена такой «жертвы» – невозможность оценки эффекта «пол хозяина» служит весомым доводом предпочесть GAM и/или двухкомпонентную «барьерную» модель, так же, как и удобство интерпретации параметров последней (таблица 1).

Таблица 1. Оценки параметров обобщенной аддитивной модели (GAM) и двухкомпонентной модели (hurdle model) для инвазированности прудовых ночниц (n=84) кровососущей мухой P. monoceros во время зимовки (сутки от ее начала или до/после спаривания хозяина).

Предикторы	b_i	s.e.(b_i)	p<	exp(b_i)	-95%ДИ	+95%ДИ
Обобщенная аддитивная модель(GAM), R, pgam package						
b_0	**0.61**	**0.075**	**0.001**		**0.46**	**0.76**
Пол (самцы)	**-1.39**	**0.254**	**0.001**		**-1.90**	**-0.88**
SF(Время, сут.)	**-0.03**	**0.012**	**0.015**		**-0.054**	**-0.006**
Бинарный отклик - шансы инвазии *P. monoceros*, $n(y_i \geq 1) = 36$, $n(y_i = 0) = 48$; Логит регрессия: $Logit(y) = b_0 + \Sigma b_i X_i + \varepsilon$						
b_0	0.30	0.459	0.51			
Пол (самцы)	**-1.23**	**0.465**	**0.01**	**3.4^{-1}**	**8.3^{-1}**	**1.4^{-1}**
Часть зимовки (2-я)	0.17	0.488	0.74	1.18	0.45	3.07
Среднее число *P. monoceros* у инвазированных хозяев $y_i>0$: $n_1 = 36$, GLM-регрессия для $y > 0$: $y_i = 1, 2 \ldots k$, $g(y_i) = b_0 + \Sigma b_i X_i + \varepsilon$, $\varepsilon \sim$ Гамма, AIC = 138.9, $\Delta = 0$, w = 0.999; LR(2) = 13.59						
b_0	**1.62**	**0.218**	**0.001**	**5.08**	**3.3**	**7.8**
Пол (самцы)	**-0.86**	**0.229**	**0.001**	**2.4^{-1}**	**3.7^{-1}**	**1.5^{-1}**
Часть зимовки (2-я)	-0.42	0.239	0.079	1.5^{-1}	2.4^{-1}	1.0^{-1}
scale	***2.18***	***0.480***	***0.001***			

Инвазированность прудовой ночницы эктопаразитом *P. monoceros* не соответствует теоретическому распределению Пуассона (даже после цензурирования нулей) X^2/rdf = 51.5/33 = 1.56. Самки хозяина характеризуются: как в 3.4 (95% ДИ; 1.4-8.3) раза более высокими шансами инвазии, так и в 2.4 (1.5-3.7) раза более высокой средней численностью эктопаразита. Снижение численности эктопаразита в течение зимовки может быть описана s-образной функцией, а временная локализация ее «ступеньки» – сопоставлена со сроками спаривания хозяина (декабрь).

Литература

Orlova M.V., Orlov O.L., Kshnyasev I.A. Changes in the abundance of parasitic gamasid mite *Macronyssus corethroproctus* (Oudemans, 1902) during the overwintering period of its host, the pond bat *Myotis dasycneme* (Boie, 1825) // Russian Journal of Ecology. - 2012. - Vol. 43. - № 4. - P. 328-332.

McCullagh P., Nelder J.A. Generalized Linear Models. Chapman & Hall, London, 2 ed. - 1989.

Jackman S. 2006. The pscl package. http://cran.r-project.org/doc/packages/pscl.pdf

Junger W.L., Ponce de Leon A. 2007. Package: pgam V. 0.4.7. http://cran.r-project.org/web/packages/pgam/pgam.pdf

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕЩЕРНЫХ ИЗОЛЯТОВ В ЗАЩИТЕ РАСТЕНИЙ В ВИДЕ СМЕШАННЫХ КУЛЬТУР

Ланкина Е.П., Хижняк С.В.

ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет», Красноярск, Россия
lenochka_lan@mail.ru

Аннотация: при помощи лабораторных испытаний и компьютерного моделирования продемонстрирована целесообразность использования в защите растений комбинированных биопрепаратов, составленных из смеси штаммов с разными температурными оптимумами роста.

В результате длительного применения химических средств защиты растений, произошло возрастание интенсивности загрязнения окружающей среды. Данная проблема способствовала внедрению биологического метода в практику защиты растений во всех странах мира (Harris, 2000; Монастырский, 2009). Ранее авторами было показано, что холодные карстовые пещеры могут служить источником штаммов для биологической защиты растений от фитопатогенных грибов (Ланкина, 2009). В силу малоинтенсивного притока субстрата в подобных сообществах наблюдается высокая субстратная конкуренция. В этой связи в пещерных микробных сообществах высока доля штаммов, обладающих антибиотической активностью в отношении представителей наземной микробиоты.

Цель настоящей работы состояла в проверке эффективности психрофильных и психротолерантных бактерий, выделенных из пещерных микробных сообществ в защите растений от болезней.

Объекты и методы

Источником пещерных бактерий служили образцы грунта из карстовых известняковых пещер Водораздельная и Женевская (Красноярский край). Выделение бактерий проводили на ПД-агаре. После проверки температурных пределов роста для дальнейшей работы отбирали психрофильные (верхний температурный предел роста до +26ºС) и психротолерантные (верхний температурный предел роста до +35ºС) изоляты.

Скорость роста изолятов при разных температурах определяли методом микрокультур на агаровых слайдах путём подсчёта клеток в микроколониях после нескольких часов культивирования. Для построения функций зависимости скорости роста от температуры использовали типовую модель (Ratkowsky, 1983):

$$\mu = \left(b \cdot \left(T - T_{\min}\right) \cdot \left\{1 - \exp\left[c \cdot \left(T - T\max\right)\right]\right\}\right)^2 \qquad (1)$$

где Tmin и Tmax – соответственно минимальная и максимальная температуры роста, μ – удельная скорость роста, равная числу генераций в час, b и c – константы.

Для экспериментов по совместному росту изолятов в смешанной культуре подбирали изоляты, различающиеся по температурным диапазонам роста, являющиеся антагонистами в отношении фитопатогенных грибов р. *Bipolaris*.

Результаты и их обсуждение

Ряд пещерных изолятов, являющихся антагонистами в отношении *Bipolaris*, проявили способность к росту в совместной культуре. Динамика роста бактерий в таком случае при условии постоянного притока субстрата может быть описана системой уравнений:

$$\frac{dS}{dt} = S_0 - \left(\frac{1}{Y_m} \cdot \mu_{\max m}(T) \cdot \frac{S}{K_{S_m} + S} \cdot X_m + \frac{1}{Y_p} \cdot \mu_{\max p}(T) \cdot \frac{S}{K_{S_p} + S} \cdot X_p \right)$$

$$\frac{dX_m}{dt} = \mu_{\max m}(T) \cdot \frac{S}{K_{S_m} + S} \cdot X_m - \varepsilon_m \cdot X_m$$

$$\frac{dX_p}{dt} = \mu_{\max p}(T) \cdot \frac{S}{K_{S_p} + S} \cdot X_p - \varepsilon_p \cdot X_p$$

где S – количество субстрата, S_0 – приток субстрата, Xm и Xp – биомассы первого и второго штаммов, T – температура, $\mu_{\max m}(T)$ и $\mu_{\max p}(T)$ – максимально возможные при данной температуре скорости размножения первого и второго штаммов, K_{Sm} и K_{Sp} – константы Михаэлиса, εm и εp – удельные скорости гибели первого и второго штаммов, Ym и Yp – экономические коэффициенты соответственно психротолерантного и психрофильного изолятов.

Компьютерный анализ модели с использованием экспериментально полученных зависимостей скоростей роста пещерных изолятов от температуры (1) показал, что в условиях постепенного роста температуры почвы в период вегетации с +5ºС до +25..+30ºС смешанный препарат будет иметь преимущество перед препаратами, составленными из чистых культур. Это достигается за счёт преимущественного роста сначала психрофильного, а затем – психротолерантного изолята (рисунок 1).

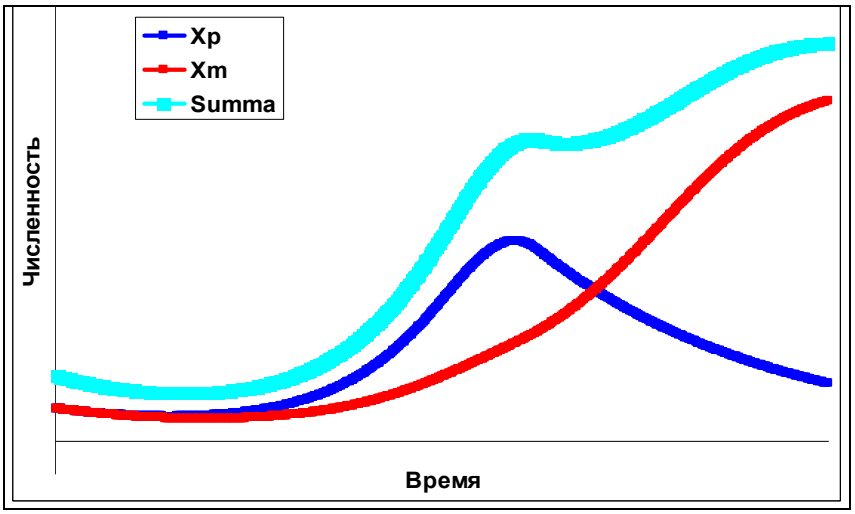


Рисунок 1 – Динамика численности психрофильного (Xp), психротолерантного (Xm) изолятов и их суммарной численности (Summa) в условиях постоянного притока субстрата и роста температуры в течение вегетации от +5 до +30ºС

Как видно из результатов анализа, одновременное присутствие в биопрепарате психрофильного и психротолерантного изолятов обеспечивает высокую суммарную численность бактерий в течение всей вегетации в широких температурных пределах. Это открывает возможность создания комбинированных биопрепаратов из психрофильных и психротолерантных изолятов, которые будут эффективны в широком диапазоне температур.

Выводы

Предложена модель, описывающая динамику роста психрофильного и психротолерантного изолятов в совместной культуре в условиях меняющихся температур.

Одновременное присутствие в биопрепарате психрофильного и психротолерантного изолятов обеспечивает высокую суммарную численность бактерий, и, как следствие – эффективную защиту растений в течение всей вегетации.

Литература

Harris I., Dent D. Priorities in biopesticide research and development in developing countries. – UK : CABI Biocsience Centre, Ascot. CABI Publishing. – 2000. – 70 pp.

Ratkowsky D.A., Lowry R.K. Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature range // Bacteriol. – 1983. – №154. – P. 1222-1226.

Ланкина, Е.П., Хижняк С.В., Кимм А.А. Перспективы использования пещеры Маячная в качестве источника психрофильных и психротолерантных бактерий // Вестник КГАУ. – 2009. – № 8. – С. 69-71.

Монастырский О.А. Современные проблемы и решения создания биопрепаратов для защиты сельскохозяйственных культур от возбудителей болезней // АгроXXI. – 2009. – № 7. – С. 3–5.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ТРЕНДЫ ЧИСТОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Ларько А.А. [1], Шевырногов А.П.[1], Иванова Ю.Д. [1]

[1]*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*
lantar@inbox.ru
ap_42@mail.ru
lulja@yandex.ru

Аннотация: Работа посвящена изучению различных методов получения пространственного распределения нелинейных трендов растительности с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Регионом изучения был выбран юг Красноярского края. Для декомпозиции временных рядов использовались методы STL и SSA. Выявлены сильные и слабые стороны методов, применительно к данным ДЗЗ.

Существует достаточно большое количество исследований, посвященных изучению трендов растительности (Нttich et. al. 2006; Soja et. al., 2007; Lopatin et. al. 2006). Однако большинство работ сосредоточено на достаточно коротких промежутках времени. Т.е. или 1982-2000 гг., или начиная с 2000 г. Кроме того, даже на достаточно больших промежутках времени (1982-2008) обычно рассматриваются линейные точечные тренды (без распределения по пространству), которые не дают объективной картины изменений (Berner et. al. 2011; Lopatin et. al. 2006). Полученные результаты, при их верификации наземными данными, зачастую очень неоднозначны. Это говорит о том, что точечные наземные измерения не показывают картины в целом. Также стоит учесть многообразие методов получения трендов со своими сильными и слабыми особенностями применительно к данным ДЗЗ.

В данной работе оценивались нелинейные тренды чистой первичной продукции (ЧПП) растительности с 2000 по 2012 гг. Данные ЧПП были получены на основе продукта сканера MODIS (MOD17). Исследования проводились на примере участка, расположенного на территории Ермаковского района, а также бассейна Красноярского водохранилища, где представлены такие природные зоны, как степи и лесостепи равнинных территорий и природные зоны горных районов.

Для декомпозиции временных рядов была использована нелинейная процедура Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess (STL) – процедура сезонно-трендовой декомпозиции, основанная на Лессе. STL является процедурой фильтрации для разложения сезонных временных рядов на три компоненты: сезонную, трендовую и остаточную (шум). Сущность метода состоит в ряде применений Loess-сглаживаний (Loess smoother) (R. B. Cleveland et al 1990).

Другим современным нелинейным методом декомпозиции временных рядов является сингулярный спектральный анализ (SSA, «Гусеница»). Метод основан на анализе главных компонент и позволяет исследовать стационарные и нестационарные временные ряды (Главные компоненты… 1997).

Проведенный анализ полученного пространственного распределения нелинейных трендов позволил выявить достоинства и недостатки этих методов применительно к наземным экосистемам.

Метод STL имеет более гибкую настройку фильтрации шумов, что позволяет выявлять краткосрочные циклы развития трендов. Однако при изменении длины временного ряда на концах полученных кривых заметны расхождения значений, величина которых зависит от степени сглаживания.

Недостаток метода SSA состоит в том, что для получения нелинейного тренда требуется выбор окна, равного половине временного отрезка и кратного периоду, что

приводит к требованию четности по периоду для временного ряда. Так же SSA улавливает только медленные изменения, сглаживая краткосрочные циклы.

Общая же картина поведения трендов во времени и пространстве, показанная этими методами, не имеет принципиальных различий «рисунок 1».

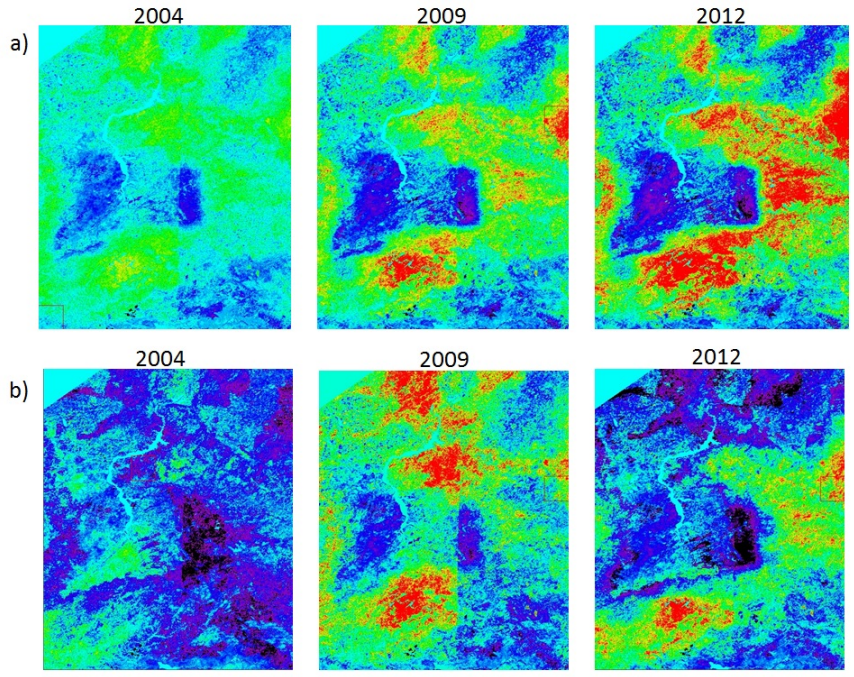


Рисунок 1 – Пространственное распределение значений трендов ЧПП относительно начальных значений (2000 год) a) рассчитанных методом SSA; b) рассчитанных методом STL

При более глубоком анализе пространственного распределения нелинейных трендов ЧПП, а именно построении дисперсии полученных трендов внутри типов растительности, различия между данными, полученными этими методами, также не имеют принципиальных различий.

Проведенный анализ показал, что для декомпозиции временных рядов данных ДЗЗ и последующего анализа причин изменений полученных трендов больше подходит метод STL, имеющий более гибкую настройку и выявляющий краткосрочные циклы развития наземных экосистем.

Литература

Hüttich C., Herold M., Schmullius C., Egorov V. and Bartalev S. A., SPOT-VGT NDVI and NDWI trends 1998-2005 as indicators of recent land cover change processes in northern Eurasia. Proceedings of the 2nd Workshop of the EARSeL SIG on Land Use and Land Cover, 2006, c. 336-344.

Soja A. J., Tchebakova N. M., French Nancy H.F., Flannigan M. D., Shugart H. H., Stocks B. J., Sukhinin A. I., Parfenova E.I., F. Stuart Chapin III and Paul W. Stackhouse, Jr. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations. Global and Planetary Change. Volume 56, Issues 3-4, 2007, Pages 274-296.

Lopatin, E., Kolström, T. & Spiecker, H. 2006: Determination of forest growth trends in Komi Republic (northwestern Russia): combination of tree-ring analysis and remote sensing data.Boreal Env. Res. 11: 341–353.

Berner, L. T., P. S. A. Beck, A. G. Bunn, A. H. Lloyd, and S. J. Goetz (2011), High-latitude tree growth and satellite vegetation indices: Correlations and trends in Russia and Canada (1982–2008), J. Geophys. Res., 116

R. B. Cleveland, W. S. Cleveland, J.E. McRae, and I. Terpenning (1990) STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess. *Journal of Official Statistics*, 6, 3–73

Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Под ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского. СПб.: Пресском, 1997. 308с.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ НА ГОРНЫЕ ЛЕСА ЗАПАДНОГО САЯНА (MODIS)

Ларько А.А.[1], Иванова Ю.Д.[1], Кукоба Н.А.[2]

[1]*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*
lantar@inbox.ru
lulja@yandex.ru
[2]*Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Россия*
kukoba.nik@yandex.ru

Аннотация. Целью работы являлся поиск зависимости изменения спектральных характеристик (MODIS/Terra) горных лесов от высоты над уровнем моря. Объектом исследования являлся участок горной территории Западного Саяна (южная часть Сибири), где имеет место четкое изменение типов лесных экосистем с высотой.

В данной работе исследовалось влияние высоты над уровнем моря на изменение спектральных характеристик горных лесов Западного Саяна по спутниковым данным (MODIS/Terra). Данные MODIS по всей поверхности Земли поступают со спутника Terra каждые 2 дня в 36 спектральных зонах (в диапазоне 0.405-14.385 мкм) с разрешением 250-1000м (500м – вегетационные индексы). Исследовалось влияния высотной зональности, географические и экологические особенности исследуемой территории, на значения вегетационных индексов EVI и NDVI за период 2000-2012гг.

Для получения значений вегетационных индексов применялись стандартные методы с использованием продукта MODIS: MOD13. Объект исследования - территория Западного Саяна. Эта территория характеризуется выраженной высотной зональностью растительности, другими словами, с ростом высоты меняется видовой состав и структура горных лесов. Качественные и количественные характеристики горных лесов зависят от теплообеспеченности почвы, температуры воздуха и других природно-климатическим факторов, изменяющихся по высотному профилю.

Для анализа был выбран участок размером 10х10км. На данной территории наблюдается разность высот 650-1500м. Здесь наблюдаются три высотных пояса, которые отличаются периодом вегетации и произрастающими видами растительности:

- черневой пихтово-кедровый пояс (до 900м), период вегетации 145-155 дней;
- горно-таежный (900-1300м), период вегетации 120-145 дней;
- субальпийский (1300м и более), период вегетации 100-120 дней.

На «рисунке 1» представлены среднемесячные значения вегетационного индекса NDVI для трех высотных поясов в течение времени с 2000г до 2012г. Доверительный интервал характеризует изменение среднемесячных значений за рассмотренный период. Отчетливо различается значения вегетационного индекса в субальпийском поясе, которое является наименьшим на протяжении всего вегетационного периода. Это связано с особенностями самой экосистемы (низкие температуры, небольшое количество деревьев, преобладание травянистого покрова) и меньшим вегетационным периодом. Значения NDVI в Горно-таежном и Черневом поясах, по космическим данным практически неразличимы, хотя горные леса, произрастающие в каждой из этих зон, значительно отличаются по видовому составу и продуктивности, согласно наземным данным. Например, в Черневом поясе имеется много лиственных видов деревьев, а в Горно-таежном поясе преимущественно наблюдаются хвойные. Можно сделать вывод, что используя только вегетационные индексы невозможно провести районирование по природным высотным зонам на данной территории.

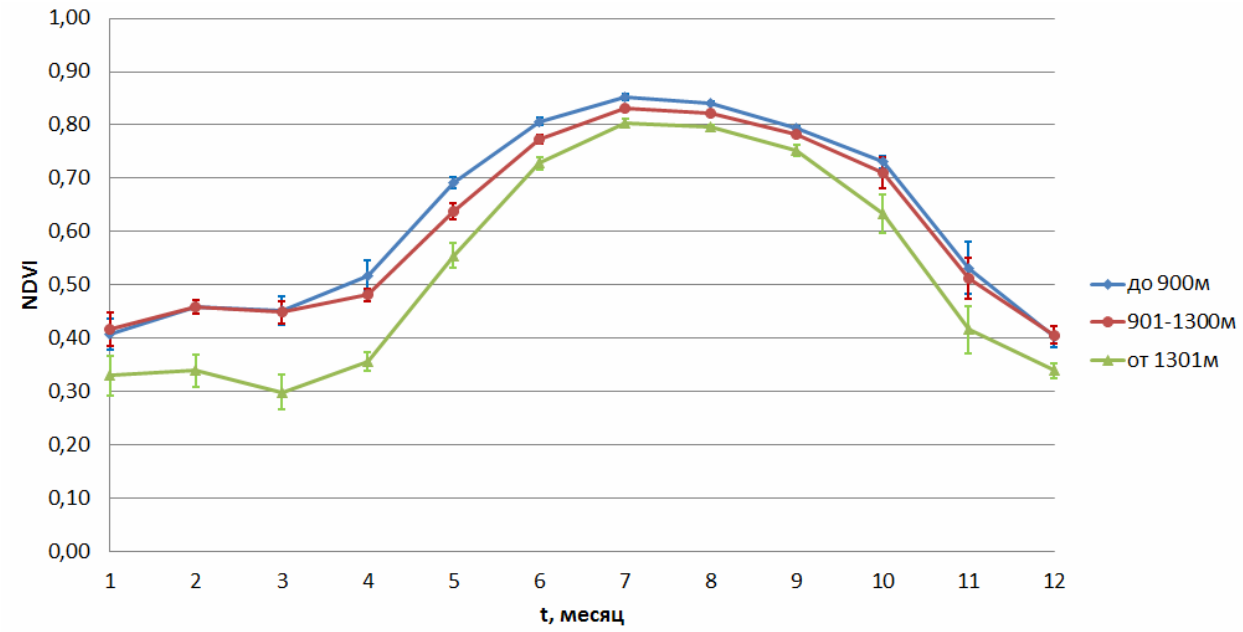


Рисунок 1 – среднемесячные значения NDVI за период 2000-2012 гг

На рисунке 2 рассмотрены среднемесячные значения улучшенного вегетационного индекса EVI для трех высотных поясов в течение времени с 2000г до 2012г.

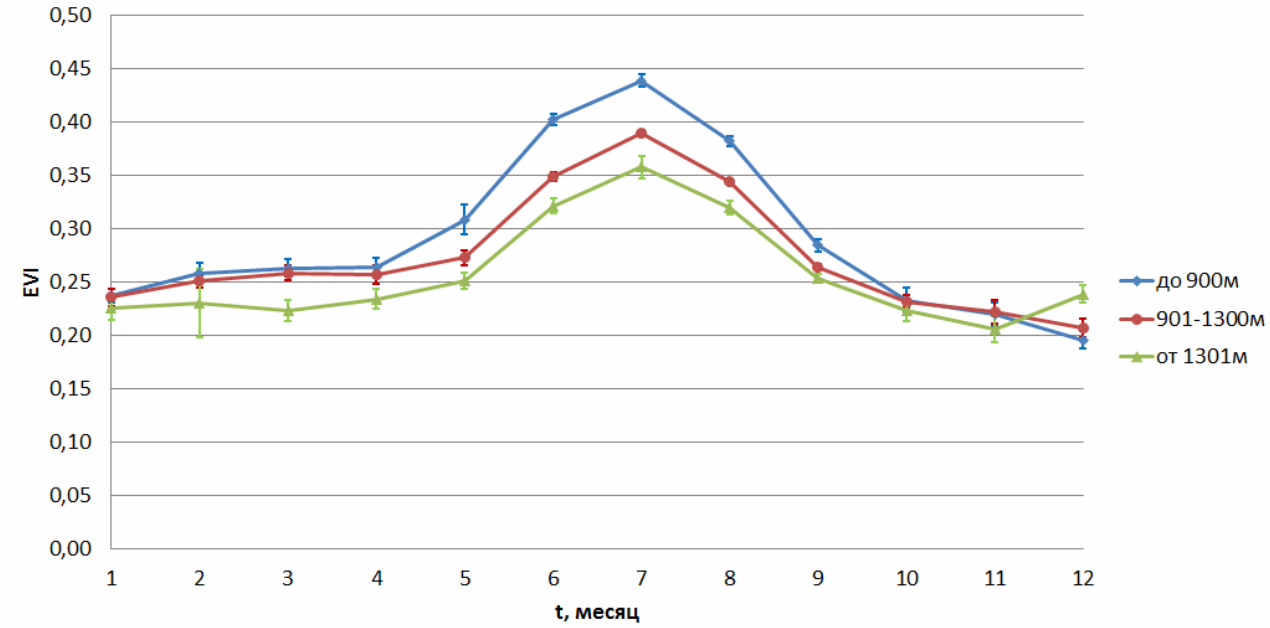


Рисунок 2 – среднемесячные значения EVI за период 2000-2012 гг.

На рисунке видно, что значения вегетационного индекса EVI зависят от высотной зональности, особенно это видно в период вегетации, где значения EVI для каждого пояса различны и их доверительные интервалы не пересекаются. Следовательно, для анализа высотной зональности территории горных лесов Западного Саяна на основе вегетационных индексов лучше использовать индекс EVI, который, в отличии NDVI, более адекватно отражает качественные изменение растительного покрова с высотой.

Работа поддержана РФФИ (грант 12-05-00494).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ КОНТРАСТНЫХ СТРУКТУР

Левашова Н.Т.[1], Мухартова Ю.В. [2], Ольчев А.В.[3]

[1]*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*
natasha@npanalytica.ru
[2] *МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*
muhartova@yandex.ru
[3]*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской Академии Наук, Москва, Россия*
aoltche@yandex.ru

Аннотация: Процессы турбулентного обмена на границе леса и открытого пространства смоделированы с помощью двумерной модели, основанной на теории контрастных структур. С помощью численных экспериментов были получены данные о режиме скорости ветра и коэффициентов турбулентности на границе раздела. Рассмотрен вариант применения модели для оценки поглощения растительностью газовых примесей на границе автомобильная дорога с интенсивным движением - лес.

1. Введение

Адекватное описание процессов переноса между пространственно-неоднородной растительностью и атмосферой требует достоверной параметризации процессов турбулентного обмена в приземном слое атмосферы на границе раздела, а также описания процессов обмена внутри растительного покрова. В рамках исследования для решения данной задачи нами была разработана математическая модель турбулентного обмена, основанная на теории контрастных структур.

Контрастными структурами (КС) называются решения краевых задач, имеющие внутренние переходные слои. С помощью КС можно описывать физические системы, в которых по определенным причинам происходит переход между различными устойчивыми состояниями в окрестности некоторой гладкой кривой, расположенной внутри рассматриваемой области. В настоящей работе КС применяется для моделирования скорости ветра на границе двух типов растительности.

В качестве варианта возможного применения модели рассмотрена задача описания турбулентного режима и оценки ослабления и поглощения растительностью газовых примесей на границе автомобильная дорога с интенсивным движением - лес.

2. Описание модели

Будем считать, что рассматриваемая система описывается при помощи двух пространственных переменных – горизонтальной x и вертикальной z. Скорость ветра вблизи границы леса и открытого пространства описывается системой уравнений движения и неразрывности:

$$K_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\partial u}{\partial t} = u\frac{\partial u}{\partial x} + w\frac{\partial u}{\partial z} + F_x, \quad K_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{\partial w}{\partial t} = u\frac{\partial w}{\partial x} + w\frac{\partial w}{\partial z} + F_z,$$

$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial w}{\partial z}$ в прямоугольнике $0 \le x \le 1000m$, $0 \le z \le 100m$ за промежуток времени $0 \le t \le T$.

На границах прямоугольника задаются следующие краевые условия:

$$\left.\frac{\partial u}{\partial x}\right|_{\substack{x=0\\x=1000}} = \left.\frac{\partial u}{\partial z}\right|_{z=100} = \left.\frac{\partial w}{\partial x}\right|_{\substack{x=0\\x=1000}} = \left.\frac{\partial w}{\partial z}\right|_{z=100} = 0 \; ; \; u\big|_{z=0} = u_{init}\left(x\right), \quad w\big|_{z=0} = w_{init}\left(x\right) .$$

Здесь u и w, соответственно, горизонтальная и вертикальная компоненты скорости ветра, K_x и K_z - турбулентные коэффициенты, функции F_x и F_z -нелинейные функции, включающие градиент давления, изменение плотности воздуха в зоне турбулентности и динамическое взаимодействие воздуха с элементами растительности. В настоящей работе мы будем задавать их как непрерывные функции координат и компонент скорости таким образом, чтобы решения уравнений движения имели внутренние переходные слои в окрестности плоскости $x = 500m$ (Нефедов Давыдова, 2010).

Концентрация примеси (SO_2) описывается уравнением

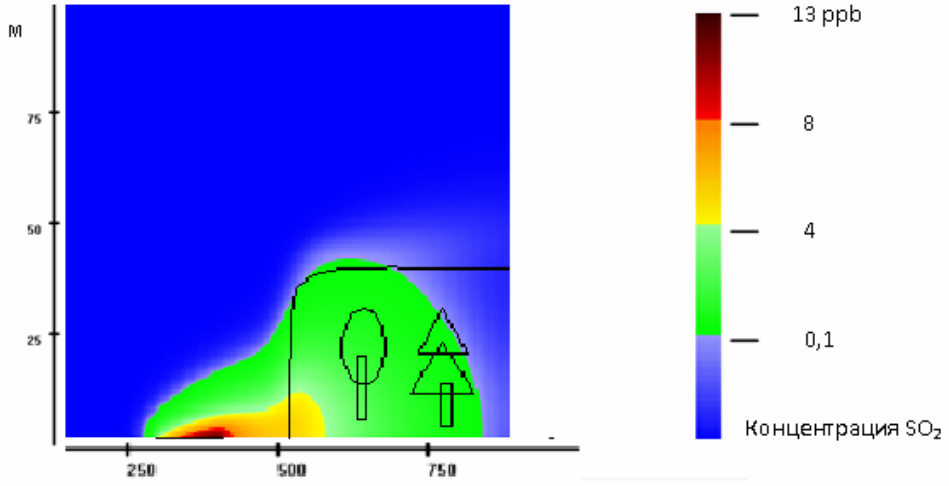
$$K_{xD}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_{zD}\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C}{\partial t} = u\frac{\partial C}{\partial x} + w\frac{\partial C}{\partial z} + \text{sink}$$

с краевыми условиями $\left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{\substack{x=0\\x=1000}} = 0; \; \left.\frac{\partial C}{\partial z}\right|_{z=100} = 0; \; K_{zD}\left.\frac{\partial C}{\partial z}\right|_{z=0} = -Q\left(x\right)$.

Функция $Q\left(x\right)$ задает поток примеси на границе $z = 0$ в месте расположения дороги.

Численный расчет проводился для потока величиной $0{,}1\frac{\mu mol}{m^2 s}$.

3. Результаты численных экспериментов



Результаты экспериментов показали, что плотный растительный покров позволяет практически полностью задержать перенос загрязняющих газовых примесей на расстоянии 500 м от дороги при условии нейтральной атмосферной стратификации.

Литература

Sogachev A, Menzhulin G., Heimann M. and Lloyd J. A Simple Three-Dimentional Canopy-Planetary Boundary Layer Simulation Model for Scalar Concentrations and Fluxes //Tellus 54B ,5 -2002-p.784-819.

Дубов А.С., Быкова Л.П., Марунич С.В., Турбулентность в растительном покрове.-Лен.:Гидрометеоиздат, 1978.-183 с.

Нефедов Н.Н., Давыдова М.А., Периодические контрастные структуры в системах типа реакция-дифуззия-адвекция// Дифф. уравнения, 2010, Т. 46, №9, с. 1300-1312.

ПОЛИВАРИАНТНЫЙ ОНТОГЕНЕЗ: ПОПУЛЯЦИОННАЯ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Логофет Д.О. [1], Уланова Н.Г.[2]

[1]*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Российская Федерация*
daniLaL@postman.ru
[2]*Биологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация*
NUlanova@mail.ru

Аннотация: Чтобы из наблюдений локальной популяции с многовариантным жизненным циклом получить оценку меры ее адаптации, нужно построить соответствующую матричную модель, откалибровать ее согласно данным и вычислить доминантное собственное число полученной матрицы. Методические, математические и практические аспекты этой задачи рассматриваются на примере популяции вейника наземного *Calamagrostis epigeios*, растущего на вырубке.

Поливариантность онтогенеза выражена в графе жизненного цикла (ГЖЦ) особей данного вида как многообразие путей развития растения среди множества его состояний, различимых по стадии онтогенеза и хронологическому возрасту (в годах). Подобная поливариантность признаётся в теории как основной механизм *адаптации* у ценопопуляций злаков к условиям среды обитания (Жукова, Комаров, 1990), а на практике возникает задача оценить количественно меру этой адаптации для проведения сравнительных исследований в разных условиях.

Традиционно задача решается через построение матричной модели динамики популяции с дискретной структурой $\boldsymbol{x}(t)$: $\boldsymbol{x}(t+1) = \boldsymbol{L}\,\boldsymbol{x}(t)$, где строение *проекционной матрицы* $\boldsymbol{L}$ демографических параметров соответствует ГЖЦ (Рисунок 1) и оказывается более сложным, чем у классических матриц Лесли или Лефковича. Но и в этом случае доминантное собственное число $\lambda_1(\boldsymbol{L}) > 0$ показывает потенциал роста популяции там и тогда, где и когда получены данные, которые использованы для калибровки матрицы $\boldsymbol{L}$ (Logofet, 2013). Поэтому число $\lambda_1(\boldsymbol{L})$ – несмотря на его известный асимптотический смысл (Свирежев, Логофет, 1978) – служит мерой адаптации локальной популяции к своей среде.

Однако такой подход сталкивается с типичным для злаков препятствием: если параметры онтогенетических переходов и старения определяются из полевых данных главным образом по морфологии надземной части растения, то коэффициенты вегетативного размножения можно объективно определить, лишь раскопав подземную систему корневищ и разрушив тем самым пробную площадку («репродуктивная неопределённость»). Поэтому прежние (*неразрушающие*) калибровки матричных моделей были в известной мере субъективны, порождая и субъективные оценки $\lambda_1(\boldsymbol{L})$ (Logofet, 2008).

Мы предлагаем новый метод преодоления «репродуктивной неопределённости», который основан на *гипотезе максимальности*: пусть неопределённые параметры таковы, что $\lambda_1(\boldsymbol{L})$ принимает максимально возможное значение в заданных условиях. Этот принцип действительно устраняет неопределённость, поскольку доказана математическая теорема существования и единственности решения соответствующей нелинейной задачи максимизации с ограничениями, вытекающими из экспертного знания, полевых данных и, в частности, из наблюдаемого баланса пополнения популяции (Логофет, 2012).

Экспериментальная проверка гипотезы максимальности для модельного вида – вейника наземного *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, – размножающегося вегетативно, сводится к раскопке площадок с сохранением всей системы парциальных кустов с корневищами и к определению материнского растения для каждого куста из пополнения текущего года, после чего статус-специфические коэффициенты размножения вычисляются непосредственно и достоверно. Разумеется, трудно ожидать, что экспериментальный

результат в точности совпадет с теоретическим, но даже когда эксперимент не подтверждает гипотезу максимальности, неразрушающий метод калибровки (т.е. решение соответствующих задач максимизации/минимизации) определяет верхнюю и нижнюю границы интервала, т.е. диапазон, значений $\lambda_1(\boldsymbol{L})$ в условиях репродуктивной неопределённости.

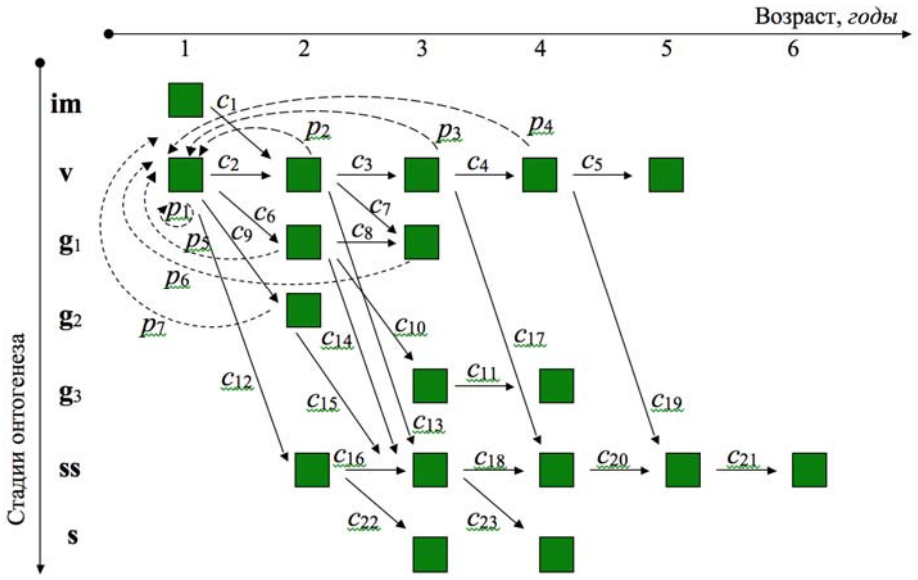


Рисунок 1 – ГЖЦ вейника наземного *Calamagrostis epigeios*. Узлы решетки соответствуют наблюдаемым стадийно-возрастным состояниям, сплошные стрелки – онтогенетическим переходам и старению (параметры с обозначают частоты соответствующих переходов), пунктирные стрелки – вегетативному размножению (параметр p обозначает среднее, на одно родительское растение, число потомков, доживших до состояния v1) (Уланова и др., 2008).

Замотивированные результатом анализа подземной части, дальнейшие экспертные гипотезы об ограниченности или/и соотношении вкладов разных репродуктивных групп в пополнение индуцируют дополнительные ограничения в задачах максимизации/ минимизации, сужая тем самым диапазон неопределённости в оценке меры адаптации без трудоёмкого «подземного» анализа. По уровню адаптации мы проведём сравнение ценопопуляций вейника наземного на участках молодой вырубки и пашни. Чтобы методика могла применяться и в более общем случае поливариантного ГЖЦ, соответствующие математические результаты для матричных моделей нужны на более высоком уровне общности, чем у ГЖЦ вейника наземного.

Литература

Жукова Л.А., Комаров А.С. Поливариантность онтогенеза и динамика ценопопуляции растений // Журнал общей биологии. - 1990. – Т. 51. - № 4. - С. 450–461.

Логофет Д.О. Ещё раз о проекционных матрицах: индикатор потенциального роста и польза индикации // Фундаментальная и прикладная математика. - 2011/2012. - Т. 17. - № 6. - С. 41-63.

Свирежев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ.- М.: Наука, 1978. – 365с.

Уланова Н.Г., Белова И.Н., Логофет Д.О. О конкуренции среди популяций с дискретной структурой: динамика популяций вейника и березы, растущих совместно // Журнал общей биологии, 2008. Т. 69. - С. 478-494.

Logofet, D.O. Convexity in projection matrices: projection to a calibration problem // Ecological Modelling. - 2008. -V. 216. - № 2. - P. 217-228.

Logofet, D.O. Projection matrices in variable environments: λ_1 in theory and practice // Ecological Modelling. - 2013. - V. 251. - P. 307-311.

Logofet, D.O. Calamagrostis model revisited: Matrix calibration as a constraint maximization problem // Ecological Modelling. - 2013. - V. 254. - P. 71-79.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Минкина Т.М.[1], Бакоев С.Ю.[2]

[1]*Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*
tminkina@mail.ru
[2]*Донской государственный аграрный университет, п. Персиановский, Россия*
Siroj1@yandex.ru

Аннотация: В работе представлена математическая модель на основе нелинейных дифференциальных уравнений, позволяющая проводить исследования устойчивости почв к загрязнению тяжелыми металлами. В качестве основного критерия устойчивости системы предложен индекс устойчивости почв. Проведенный анализ почв, прилегающих к Новочеркасская ГРЭС, показал снижение показателя устойчивости по мере приближения к источнику загрязнения.

1. Оформление текста

Изучение устойчивости почв к загрязнению ТМ является чрезвычайно актуальной задачей, в связи с чем, необходима разработка методов, раскрывающих механизмы проникновения токсикантов и способность почвы регулировать данный процесс, выступая в качестве своеобразного фильтра техногенных воздействий.

Целью данной работы является разработка подходов к оценки устойчивости почв к загрязнению ТМ на основе использования методов теории нелинейных динамических систем.

Материалы и методы исследования. Для оценки устойчивости почв к загрязнению тяжелыми металлами были использованы результаты многолетнего почвенно-экологического мониторинга, проводимого на территории зоны влияния Новочеркасской ГРЭС. ОАО «Новочеркасская ГРЭС» расположена в 7 км на ЮЗ от г. Новочеркасска. Выбросы предприятия составляют 1% от общего объема в РФ и 58% от объема выбросов в Ростовской области, из которых на Новочеркасск приходится 99% (Экология Новочеркасска, 2001). Ежегодно, начиная с 2000 г, на мониторинговых площадках проводился отбор почвенных (с глубины 0-20 см) и растительных образцов.

Для решения поставленных задач были использованы следующие методы: метод математического моделирования и методы теории нелинейных динамических систем. Данные о физических и химических свойствах почв получены по общепринятым в почвоведении методам (Агрохимические методы исследования почв, 1975).

При разработке математической модели процесс поглощения металлов в почве был условно определен как «загрязненность», где в качестве параметров приняты максимальная адсорбция и показатель сродства ТМ твердыми фазами почв. Учитывая, что нелинейные структурные связи являются неотъемлемым компонентом сложных динамических систем, при разработке модели в качестве нелинейной отрицательной обратной связи, обеспечивающей ограничение распространения загрязняющего вещества, предложено использовать следующую функцию:

$$z(Y_1) = \frac{\alpha_{01} \cdot S \cdot k \cdot Y_1}{1 + k \cdot Y_1} \qquad (1)$$

где z - показатель потенциальной загрязненности почвы, S – максимальная адсорбция ТМ почвой, k – показатель сродства ТМ с поверхностью почвенных частиц.

При взаимодействии ТМ с органо-минеральной составляющей почвы происходят определённые преобразования, которые формируют отклик (обратная отрицательная связь), обеспечивающий ограничение распространения загрязняющего вещества. В исследуемых почвах более устойчивому состоянию соответствует такое соотношение различных соединений металлов, при котором доминируют прочно связанные формы.

В этом случае показателем обратной положительной связи является изменение соотношения прочно и непрочно связанных соединений ТМ в почве при увеличении уровня загрязнения

$$h(Y_1) = \frac{c}{1 + b \cdot Y_1} \tag{2}$$

где b, c – параметры, c - доля непрочно связанных соединений ТМ в почве, b - доля прочно связанных соединений ТМ в почве.

Аналитическая структура упрощенной модели поглощения и трансформации может быть представлена системой двух обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dY_0}{dt} = \dfrac{\alpha_{01} \cdot S \cdot k \cdot Y_1}{1 + k \cdot Y_1} - \dfrac{c}{1 + b \cdot Y_1} \cdot Y_0 \\ \dfrac{dY_1}{dt} = \dfrac{c}{1 + b \cdot Y_1} \cdot Y_0 - d \cdot Y_1 \end{cases} \tag{3}$$

Полученные критические значения параметров модели позволяют ввести индекс устойчивости, характеризующий удаленность системы от критического состояния. Индекс устойчивости – это количественная мера, характеризующая различные системы по запасу их прочности. Система устойчиво функционирует только тогда, когда индекс устойчивости больше единицы. При увеличении индекса устойчивости запас прочности системы увеличивается. Влияние изменения одних параметров может значительно отличаться от влияния других, поэтому расчет индекса устойчивости позволяет определить те параметры системы, которые для нее наиболее опасные.

В качестве основного критерия устойчивости системы предложен индекс устойчивости почв. Возрастание значения индекса устойчивости характеризует отдаленность системы от критического состояния. Система устойчиво функционирует только тогда, когда индекс устойчивости больше единицы.

Проведенный анализ почв, прилегающих к НчГРЭС, показал снижение индекса устойчивости по мере приближения к источнику загрязнения, особенно, по линии преобладающего направления розы ветров. При этом индекс устойчивости для Cu уменьшился в 3 раза, для Pb в 2 раза, а для Zn примерно в 5 раз. В условиях одинаковой техногенной нагрузки индекс устойчивости лугово-черноземной легкоглинистой почвы выше, чем в аллювиально-луговой песчаной почве. По степени экологической устойчивости к загрязнению ТМ исследуемые почвы располагаются в следующий ряд: лугово-черноземная почва > чернозем обыкновенный > аллювиально-луговая почва.

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ДРЕВОСТОЕВ В КОНТЕКСТЕ СУКЦЕССИИ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ЛИТЕРАТУРНЫМ ДАННЫМ

Мироненко Л.М.

ИФХиБПП РАН, г. Пущино, Россия
lmir2006@yandex.ru

Аннотация: по литературным данным установлено, что динамика фитомассы некоторых лесообразующих пород удовлетворяет уравнениям авторской модели экологической сукцессии с коррекцией последних на влияние опада листвы (хвои), различия в величинах условных единиц времени и степень угнетения нижних ярусов.

Предложенные в литературе модели лесных сукцессий описывают процесс с разной степенью детализации структуры древостоев (Porte A., Bartelink H.H., 2002; Shugart H.H., 1998). В настоящей работе представлены результаты исследования биопродуктивности древостоев с использованием наиболее общей математической модели экологической сукцессии (ММЭС) (Мироненко, 1999, 2012). Материалом послужили литературные данные (Усольцев, 2001, 2007) по возрастным трендам фитомассы (ВТФ), надземной + подземной, основного и нижнего ярусов еловых, лиственничных, дубовых и березовых древостоев в различных лесохозяйственных провинциях и зонах.

Уравнения ММЭС (см. рисунок 1):

$X=(x_A, x_1, x_2, \ldots, x_{n-1}),\ Y=(y_1, y_2, \ldots, y_{n-1}, y_n);\quad dX/dt=bY-aX,\quad dY/dt=aX-bY,$ (1)

где n – число рассматриваемых сукцессионных сообществ (СС) в цепи сукцессии. Начальные условия $X(0) = (A, 0, 0, \ldots, 0)$, $Y(0) = (0, 0, \ldots, 0)$. Время t измеряется в условных единицах времени (*уев)*. Константы a и b определены ранее при моделировании процессов в микроэкосистемах (Мироненко, 2012) и равны 0.0382/*уев* и 0.00618/*уев*, соответственно. Константы A и *уев* определяются из исследуемых данных.

Рисунок 1 - Концептуальная схема ММЭС. Пояснения в тексте.

Согласно уравнениям (1) и рисунку 1 моделируемый сукцессионный процесс реализуется следующим образом. Исходный запас питательных веществ A:

$x_A(0)=A,\ dx_A/dt = - ax_A,$ (2)

начинает расходоваться на построение биомассы 1-го СС y_1, откуда с отмиранием биомассы вещества поступают в пул запаса 2-го СС x_1, и оборот веществ повторяется n раз. Исключение составляет пул x_A, в который не поступает ничего (уравнения 2), он только истощается.

Применение уравнений ММЭС к анализу ВТФ показало, что (1) *уев* для разных пород и для разных ярусов различны; (2) на исследуемых отрезках времени (от 145 до 300 лет) в древостоях имеют место, по крайней мере, три последовательных СС; (3) существует сильная зависимость хода ВТФ первого яруса древостоев (и 1-го СС) от величины опада листвы/хвои (ЛХ), а, следовательно, существует необходимость формализации процесса

поступления соответствующих веществ в исходный пул x_A; (4) нижние ярусы, а именно, второе и третье СС в них, сильно угнетаются.

В связи с этим для настоящего исследования уравнения ММЭС (1) были модифицированы следующим образом:

$X=(x_F, x_A, x_1, x_2);\ \ Y=(y_F, y_1, y_2, y_3);$

$dX/dt=(\ T_F(k_F b y_F - a x_F),\ \ T_A(k_A b y_F - a x_A),\ \ T_S(b y_1 - a x_1),\ \ T_S((b y_2 - a x_2)\ );$

(3)

$dY/dt=(\ T_F(a x_F - b_F),\ \ T_A(\ a x_A - b y_1),\ \ T_S(k_S\, a x_1 - b y_2),\ \ T_S(\ a x_2 - b y_3)\ );$

$X(0) = (A_F, A, 0, \ldots, 0),\ \ Y(0) = (0,\ 0, \ldots, 0),$

где x_F, y_F – пулы запаса веществ и фитомассы ЛХ, соответственно. Константы, а именно: T_F, T_A и T_S корректируют *уев* для ЛХ, 1-го и последующих СС, соответственно; k_F и k_A регулируют потоки веществ, поступающих в пулы x_F и x_A, соответственно, вследствие опада ЛХ; величина k_S имеет обратную зависимость со степенью угнетения первым СС последующих СС. Остальное – в пояснениях к уравнениям ММЭС (1).

Все переменные выражены в углероде (С), тС/га. Все константы, за исключением a, b, A_F и A, безразмерны и, также как и константы A_F и A (запасы углерода, необходимые для осуществления жизненного цикла ЛХ и всей экосистемы, соответственно, тС/га), определялись подбором по ВТФ.

Уравнения для ЛХ составлены по принципу описания динамики 1-го СС. Однако ЛХ таким СС не предполагается. Уравнения для ЛХ введены лишь для учета влияния опада на темпы роста ВТФ. То обстоятельство, что фитомасса ЛХ удовлетворяет уравнениям ММЭС, является предметом отдельного рассмотрения.

С использованием уравнений (3) была рассчитана динамика фитомассы 1-го и нижнего ярусов и первичной продукции еловых, лиственничных, дубовых и березовых древостоев в различных лесохозяйственных провинциях и зонах при практически полном совпадении с соответствующими ВТФ (Усольцев, 2001, 2007). Выявлено, что нижние ярусы распадаются на растительность, развивающуюся совместно с первым ярусом, и на 2-е и 3-е СС. Значения констант a=0.0382/*уев* и b=0.00618/*уев* оказались одинаковыми для древостоев всех изучаемых пород. В пределах одной породы константы T_F, T_A, T_S, k_F и k_A также сохраняли свои значения, которые не зависели от места произрастания древостоя, но для другой породы их значения менялись. При разных породах и местобитаниях древостоев изменяли свои значения только константы A_F, A и k_S, и чем больше были значения первых двух, тем меньше – значения третьей константы.

В целом, можно заключить, что через динамику фитомассы древостоев проявляется, по-видимому, сукцессионный процесс, характеризующийся в настоящей работе уравнениями (1) и константами a и b. Реализуясь в древостоях, он приобретает индивидуальность для каждой породы (константы T_F, T_A, T_S, k_F и k_A, уравнения (3)). При этом чем большую фитомассу способно создать 1-е СС в определенных условиях (провинциальных зонах), тем больше угнетаются второе и третье СС в нижнем ярусе. Последние по какой-то причине (затенение?) не могут в полной мере использовать поступающий к ним от 1-го СС пищевой ресурс.

Следует заметить, что уравнения сукцессии (3) работают только для естественных или близких к ним древостоев.

Литература

Мироненко Л.М. Математическая модель экологической сукцессии // Сб. Математика. Компьютер. Образование. –1999-Вып. 6. Ч. 2.-С. 516-525.

.Мироненко Л.М.. Два подхода к математическому моделированию процессов в лабораторных микроэкосистемах: взгляд извне и изнутри. Математическая биология и биоинформатика.- 2012. Т 7. № 1. С.182–196.

Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии. База данных и география. Екатеринбург: УрО РАН, 2001.- 708с.

Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии.Методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007.-638с.

Porte A.,Bartelink H.H. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management // Ecol. Model-. 2002-V. 150 – N1-P. 141-188.

Shugart H.H. Terrestial Ecosystems in Changing Environments. Cambridge: Cambridge University Press,- 1988-537 p.

ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД НА ГАЗООБМЕН СФАГНУМА

Молчанов А.Г.[1], Татаринов Ф.А.[2]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лесоведения Российской академии наук. Успенское, Московская обл. Россия.*
a.georgievich@gmail.com
[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лесоведения Российской академии наук. Успенское, Одинцовский р-он, Московская обл. Россия.*

Аннотация: На основе полученных в естественных условиях данных определили зависимость газообмена CO_2 сфагнума от солнечной радиации, температуры и влажности воздуха и уровня поверхностных грунтовых вод (УГВ). Получили, что УГВ влияет на газообмен сфагнума больше всех факторов, затем температура воздуха. Падение УГВ ниже 20 см приводит к смене поглощения CO_2 с поверхности сфагнума на эмиссию CO_2 и значительному снижению влияния, как солнечной радиации, так и температуры воздуха, а при УГВ 33 см влияние солнечной радиации динамику CO_2 уже не наблюдается

Исследования проводили в южной тайге в заболоченном пушицево-сфагновом сосняке с сомкнутостью крон 0.3 на торфянисто-глеевой почве. Моховой покров сплошной, с доминированием Sphagnum fuscum, наличием Sph. medium и Sph. Rubellum. Измерение эмиссии CO_2 с поверхности сфагнума проводили по открытой схеме по методу Edwards и Sollins (1973) с помощью инфракрасного газоанализатора “LICOR- 820” (Li-Cor, США). Газообмен CO_2 сфагнума (F) измеряли несколько раз за вегетационный период, когда УГВ был на разных глубинах: в мае 2009 г. - 4см, в июне 2009 г. - 7см, в июле 2009 г. - 33см, в августе 2009 г. - 21см и в августе 2011гг. - 43см. Параллельно измерялись температура (T) и влажность (RH) воздуха и солнечная радиация (Q).

Таким образом, была исследована зависимость газообмена CO_2 с поверхности ненарушенного покрова сфагнума от различных параметров окружающей среды: температуры и влажности воздуха, солнечной радиации и уровня поверхностных почвенно-грунтовых вод (УГВ). Получили, что при УГВ = 4 см наблюдается поглощение CO_2 подушкой сфагнума в зависимости от солнечной радиации и температуры воздуха. Максимальное поглощение было около 0.5 мкмоль $CO_2/(м^2с)$. При УГВ = 7 см интенсивность положительного газообмена значительно увеличилась и составила около 2.0 мкмоль $CO_2/(м^2с)$. Газообмен насыщается при радиации около 150 $Вт/м^2$ и при температуре 15-25^oC. Когда УГВ опустился на глубину 21 см, газообмен подушки сфагнума становится отрицательным, т.е. наблюдается эмиссия CO_2 при всех значениях солнечной радиации и температуры воздуха. Тем не менее, при высокой солнечной радиации (250-700 $Вт/м^2$) и оптимальной температуре воздуха (15-25 ^oC) эмиссия CO_2 снижается с 2.0 до 0.5 мкмоль $CO_2/(м^2с)$ т.е. влияние солнечной радиации еще наблюдается. С последующим опусканием УГВ до 33 см эмиссия CO_2 увеличивается и в среднем устанавливается около 5 мкмоль $CO_2/(м^2с)$. В этих условиях газообмен подушки сфагнума практически не реагирует на изменение солнечной радиации. Увеличение температуры воздуха стало действовать в противоположном направлении, т.е. с увеличением температуры эмиссия CO_2 с поверхности сфагнума увеличивается, тогда как при УГВ = 21 см с увеличением температуры она уменьшалась. При опускании УГВ до 43 см газообмен сфагнума также не зависит от солнечной радиации. Температура воздуха также стала меньше влиять на эмиссию CO_2. Эмиссия CO_2 снизилась: если при УГВ 33 см она была около 5 мкмоль $CO_2/(м^2с)$, то при УГВ 43 см стала 1.5 мкмоль $CO_2/(м^2с)$.

Корреляционный анализ показал значимую корреляцию газообмена сфагнума (*F*, мкмоль $CO_2/(м^2с)$) с влажностью воздуха и уровнем грунтовых вод (*SWL,* с*м*) (0.17, 0.28 и

0.75 соответственно), причем, если зависимости от T и RH (в %) возрастающими, зависимость SWL была параболической, с максимумом около 30-35 см. Поэтому была рассчитана нелинейная регрессия F от этих переменных по следующей формуле:

$$F = a \cdot (b_1 - SWL) \cdot (SWL - b_2) \cdot RH^{c_1} \cdot T^{c_2} + F_0 \quad (1)$$

где значения коэффициентов a, b_1, b_2, c_1, c_2 и F_0 были 1.44E-07, 8.31334, 62.2957, 1.05966, 2.19565 и 1.01152, соответственно. Коэффициент детерминации r^2=0.84, все коэффициенты были значимы с $t<10^{-4}$. Зависимость газообмена сфагнума только от солнечной радиации для всех значений УГВ в целом отсутствовала. Однако она была выражена для УГВ в пределах 7-21 см, причем плато F начиналось при значениях Q 100-200 Вт·м$^{-2}$ (т.к. F считалось отрицательным при преобладании фотосинтеза над дыханием, то зависимость $F(Q)$ была убывающей). Поэтому нелинейное уравнение для газообмена с учетом радиации было рассчитано отдельно для интервала 7≤SWL≤21:

$$F=0.4423*exp(-0.00136*Q+0.00948*RH+0.0953*SWL)-0.4; \quad n = 165\ R^2=0.65. \quad (2)$$

За пределами интервала 7≤SWL≤21 зависимость $F(Q)$ отсутствовала, и уравнение для F получилось следующим:

$$F = 0.0054 \cdot (45.87 - SWL) \cdot (SWL - 7.12) \cdot T^{0.447} + 2.32 \quad n = 146\ R^2=0.96. \quad (3)$$

В уравнениях (2) и (3) отсутствовали T и RH соответственно, поскольку зависимость газообмена от этих переменных была слабой.

Наконец, зависимость от одного лишь УГВ, описываемая гауссовой кривой

$$G._{sph} = 9.7515*exp(-0.0070*(LSW-32.19)^2)+0.138$$ дает R^2=0.87

Зависимость газообмена от влажности воздуха, солнечной радиации и уровня грунтовых вод дает R^2 =0.66, а без учета уровня грунтовых вод R^2 =0.35. Таким образом, когда УГВ изменяется от 4 до 43 см влияние влажности воздуха на газообмен сфагнума очень незначительно. Влияние солнечной радиации сказывается только при среднем уровне грунтовых вод и низкой радиации (до 200 Вт·м$^{-2}$). Уровень грунтовых вод влияет на газообмен сфагнума больше всех факторов.

Дисперсионный анализ показал значимую зависимость эмиссии CO_2 от всех принятых во внимание переменных: УГВ, солнечной радиации и температуры и влажности воздуха. Самой важной из этих характеристик оказался УГВ: критерий Фишера F для него составил 348, для остальных показателей соответственно 47; 137; 35 (F критическое 3,85). Таким образом, уровень грунтовых вод показал самое высокое значение, затем температура воздуха и менее всего влияли солнечная радиация и влажность воздуха.

Настоящее исследование показало, что в условиях южной тайги на олиготрофных болотах зависимость газообмена CO_2 сфагнума от факторов окружающей среды в значительной степени регулируется уровнем поверхностных грунтовых вод. Температура влияет на газообмен сфагнума при уровнях грунтовых вод от 4 до 43 см, однако влияние ее не однозначно. Если при УГВ от 4 до 7 см поглощение CO_2 с увеличением температуры воздуха увеличивается, то при 21 см вместо поглощения происходит эмиссия CO_2 и с дальнейшим увеличением температуры эмиссия уменьшается. В дальнейшем, со снижением УГВ и увеличением температуры воздуха эмиссия CO_2 увеличивается. При УГВ ниже 43 см влияние температуры сказывается значительно слабее, да и эмиссия CO_2 снизилась более чем в два раза. Солнечная радиация также неравнозначно влияет на газообмен сфагнума: так при УГВ от 4 до 21 см она имеет логарифмическую зависимость, но когда УГВ = 21 см вместо поглощения наблюдается эмиссия CO_2. Однако при освещенности свыше 200 Вт/м^2 эмиссия CO_2 значительно уменьшается. При снижении УГВ ниже 33 см газообмен не зависит от солнечной радиации. Дальнейшее снижение УГВ приводит к снижению эмиссии CO_2.

Таким образом, падение уровня грунтовых поверхностных вод ниже 20 см приводит к смене поглощения CO_2 с поверхности сфагнума на эмиссию CO_2 и значительному снижению влияния как солнечной радиации, так и температуры воздуха, а при УГВ 33 см влияние солнечной радиации динамику CO_2 уже не наблюдается.

Работа выполнена при финансовой поддержке программой РАН “Биологические ресурсы”.

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА В ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОМ РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ

Мухартова Ю.В. [1], Ольчев А.В. [2], Рыжова М.С. [3]

[1]*Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*
muhartova@yandex.ru
[2]*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской скалярной примеси Академии Наук, Москва, Россия*
aoltche@yandex.ru
[3]*Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*
maria.msu.ff@gmail.com

Аннотация: На основании численных экспериментов с помощью двухмерной гидродинамической модели турбулентности получены данные о изменении поля ветра и коэффициентов турбулентного обмена на границе между различными типами растительности (поле-лес). С помощью модели выполнена оценка скорости ослабления переноса скалярной примеси лесной растительностью при различных значениях скорости ветра, высоты и плотности лесной растительности.

1.Введение

Проблема исследования процесса переноса парниковых газов, газовых примесей и аэрозолей между неоднородным растительным покровом и атмосферой является в настоящее время объектом многочисленных экспериментальных и модельных исследований. Основным требованием к разрабатываемым модельным подходам является их способность максимально адекватно описать процессы переноса между неоднородным растительным покровом и приземным слоем атмосферы для различных масштабов осреднения: от масштаба отдельного дерева до всей экосистемы. Наибольшая сложность при этом возникает при описании процесса переноса на границе различных типов растительности с разной структурой и биофизическими свойствами.

В рамках исследования нами была использована двумерная модель, основанная на усредненных уравнениях гидродинамики и позволяющая адекватно описать процессы переноса на границе растительных сообществ. В качестве возможного применения модели была рассмотрена ее способность оценить скорость ослабления переноса скалярной примеси от некоторого источника загрязнения растительным покровом.

2.Описание модели

В области $x \in (-L, L)$, $z \in (0, H)$ усредненные компоненты скорости $\vec{V} = \{U, W\}$ подчиняются уравнениям:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial U}{\partial t} + U\dfrac{\partial U}{\partial x} + W\dfrac{\partial U}{\partial z} = -\dfrac{1}{\rho_0}\dfrac{\partial p}{\partial x} - \dfrac{2}{3}\dfrac{\partial E}{\partial x} + \dfrac{\partial}{\partial x}\left(2K\dfrac{\partial U}{\partial x}\right) + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(K\dfrac{\partial U}{\partial z}\right) + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(K\dfrac{\partial W}{\partial x}\right) - c_d\, LAD\left|\vec{V}\right| U; \\ \dfrac{\partial W}{\partial t} + U\dfrac{\partial W}{\partial x} + W\dfrac{\partial W}{\partial z} = -\dfrac{1}{\rho_0}\dfrac{\partial p}{\partial z} - \dfrac{2}{3}\dfrac{\partial E}{\partial z} + \dfrac{\partial}{\partial x}\left(K\dfrac{\partial W}{\partial x}\right) + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(2K\dfrac{\partial W}{\partial z}\right) + \dfrac{\partial}{\partial x}\left(K\dfrac{\partial U}{\partial z}\right) - c_d\, LAD\left|\vec{V}\right| W; \\ \dfrac{\partial U}{\partial x} + \dfrac{\partial W}{\partial z} = 0; \end{cases}$$

где p - избыточное давление, ρ_0 - плотность воздуха, K - коэффициент турбулентности,

E - кинетическая энергия турбулентного движения, c_d - коэффициент сопротивления растительности, LAD - плотность листовой площади. Для замыкания системы уравнений используется выражение $K = C_\mu E^2 \varepsilon^{-1}$, где C_μ - коэффициент пропорциональности, ε - скорость диссипации турбулентной энергии, и два дополнительных уравнения для энергии E и величины $\varphi = \varepsilon / E$:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E}{\partial t} + U\dfrac{\partial E}{\partial x} + W\dfrac{\partial E}{\partial z} = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{K}{\sigma_E^\varphi}\dfrac{\partial E}{\partial x}\right) + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{K}{\sigma_E^\varphi}\dfrac{\partial E}{\partial z}\right) + P_E - \varepsilon; \\ \dfrac{\partial \varphi}{\partial t} + U\dfrac{\partial \varphi}{\partial x} + W\dfrac{\partial \varphi}{\partial z} = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{K}{\sigma_\varphi}\dfrac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(\dfrac{K}{\sigma_\varphi}\dfrac{\partial \varphi}{\partial z}\right) + \dfrac{\varphi}{E}\left(C_{\varphi 1}P_E - C_{\varphi 2}\,\varepsilon\right) - \dfrac{\varphi}{E}\left(C_{\varphi 1} - C_{\varphi_2}\right)S_d. \end{cases}$$

Здесь σ_E^φ, σ_φ - числа Прандтля для величин E и φ соответственно, $P_E = 2K\left(\left(\dfrac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \left(\dfrac{\partial W}{\partial z}\right)^2\right) + K\left(\dfrac{\partial U}{\partial z} + \dfrac{\partial W}{\partial x}\right)^2$ - скорость образования турбулентной кинетической энергии, $C_{\varphi 1}$, $C_{\varphi 2}$ - модельные константы, величина $S_d = 12 C_\mu^{1/2} c_d\, LAD \left|\vec{V}\right| E$ характеризует увеличение диссипации за счет взаимодействия с растительностью. Концентрация C некоторого переносимого вещества удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U\frac{\partial C}{\partial x} + W\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha K \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\alpha K \frac{\partial C}{\partial z}\right) + F_{\text{source}} + F_{\text{sink}},$$

где α - обратное число Прандтля, F_{source} и F_{sink} - мощности источников и стоков вещества.

3. Результаты

Полученные результаты отмечают существенный эффект растительности на структуру поля скорости ветра и процесс переноса скалярной примеси. На «рисунке 1» приведено распределение концентрации примеси от стационарного источника, расположенного в 50 метрах от лесного массива с постоянным (а) и переменным (б) распределением листвы по высоте без учета осаждения.

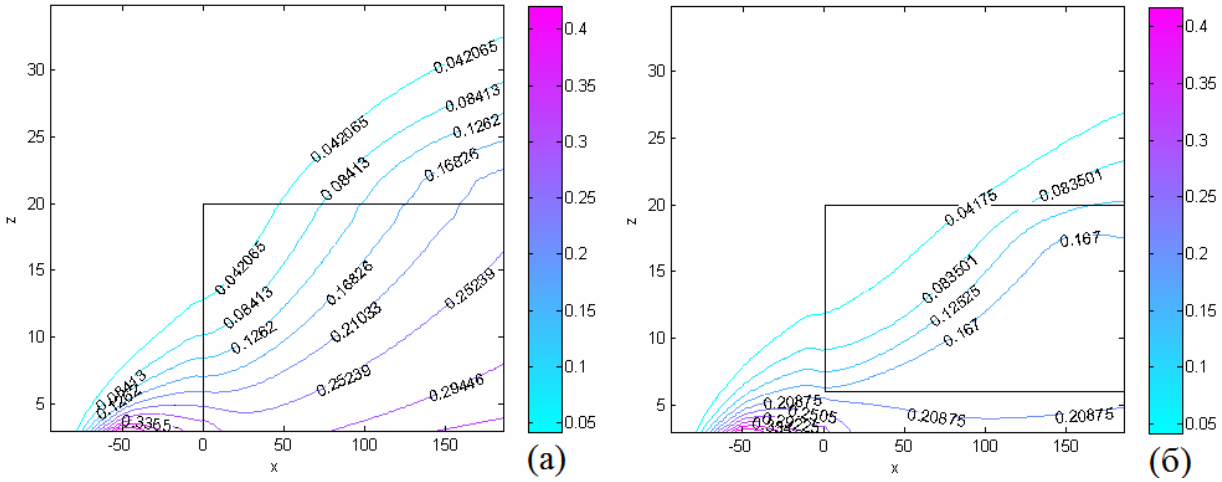


Рисунок 1 - Распределение $C/C\max$, где $C\max$ - максимальное значение концентрации, определяемое мощностью источника.

Литература

Garratt J. R. The atmospheric boundary layer. Cambridge University press, 1992. - 316 p.
Wyngaard J.C. Turbulence in the atmosphere. Cambridge University press, 2010.-393 p.
Sogachev A., Panferov O. Modification of two-equation models to account for plant drag // Boundary-Layer Meteorol. - 2006. - Vol. 121. - Issue 2. - pp. 229-266.
Sogachev A. A note on two-equation closure modeling of canopy flow // Boundary-Layer Meteorol. - 2009. - Vol. 130. – Issue 3. - pp. 423-435.

ОБРАБОТКА ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ ROMUL

Надпорожская М.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
marinta@mail.ru

Аннотация: Обобщен материал по обработке полевых данных по опаду и почве для составления сценариев для вычислительных экспериментов с помощью математической модели ROMUL. Обсуждаются проблемы генерализации первичных данных, выбора мощности профиля моделируемой почвы, калибрации трудно измеряемых параметров.

Модель ROMUL (Chertov et. al, 2001) применена для оценки динамики органического вещества (ОВ) почв, параметров его устойчивого функционирования, аккумуляции в ходе первичной восстановительной сукцессии, оценки экологически обоснованных доз органических удобрений для различных растительных сообществ разных районов (табл. 1). Большая часть материалов опубликована (Надпорожская и др., 2007, 2009; Nadprozhskaya et. al, 2006; Shaw et. al, 2006 и др.). Несмотря на успешную верификацию модели, остается еще много нерешенных вопросов по работе с полевыми данными. Модернизация структуры модели проводится (http://www.ecomodelling.ru/index.php/ru/romuldles).

Почвенный покров отличается значительной пространственной неоднородностью. Например, под ельником выделы почв с запасами ОВ в лесной подстилке могут варьировать в 1,5 раза в зависимости от степени увлажненности и микрорельефа. Данные исходной почвы для каждого выдела имитируют отдельно, либо выбирается преобладающий подтип. Запасы органического вещества в минеральном профиле подзолистых почв и подзолов оценивали для области максимального распространения корней 30-40 см, поскольку пока остаются нерешенными вопросы оценки динамики серединных горизонтов аккумуляции ОВ песчаных почв (BH, BHF) и глубинных горизонтов суглинистых почв со повышенным относительным содержанием азота, предположительно фиксированным глинистыми минералами. Остается пока не разработанной оценка влияния гранулометрического состава и химизма почвообразующих пород на трансформацию ОВ, но некоторые предпосылк для решения этого вопроса нами обнаружены в ходе проведения лабораторных опытов и полевых исследований. При обработке полевых данных по опаду целесообразно объединять фракции, сходные по содержанию азота и зольности. При отсутствии полевых данных сценарии поступления опада приходится компилировать по литературным источникам. Содержание азота в опаде не всегда приведено в литературе, следует учитывать, что его содержание в опаде меньше содержания в живых частях растений. Мало данных о доле напочвенного покрова в общем опаде леса, хотя этот вид опада играет существенную роль в накоплении азота. Еще не решена задача оценки поступления и распределения крупного древесного опада (стволов и веток). Еще более проблемна оценка корневого опада, методы прямого учета которого дают сильно различающиеся результаты. Пока это решается как обратная задача в вычислительных экспериментах. Не менее важно знать распределение опада тонких корней между лесной подстилкой и минеральной частью почвы в зависимости от мощности органогенных и гумусово-аккумулятивных горизонтов. Этот вопрос решен экспертно (Чертов, 2004, устное сообщение).

Дополнительного экспериментального обоснования требуют калибруемые коэффициенты модели: доля лабильного гумуса и скорость разложения стабильного гумуса.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке НИР СПбГУ 1.0.142.2010.

Таблица 1 – Примеры проведенных вычислительных экспериментов с математической моделью динамики органического вещества почв ROMUL (*опубликовано)

Географическое положение	Растительность	Почва	Цель вычислительных экспериментов. Проведен анализ:
Россия, Ленинградская область*	Сосновый лес	Подзол на полиминеральных песках	аккумуляции ОВ в почве в ходе первичной сукцессии
Россия, Лужская область*	Еловый лес	Дерново-подзолистая почва на суглинках	доз внесения удобрений для ускорения зарастания карьеров
Россия, Тверская обл., ЦЛГБЗ	Еловый лес	Подзолистая и торфяно-подзолистая на суглинках	устойчивого функционирования почв в современных биоклиматических условиях
Россия, республика Коми	Еловый лес	Подзолистая на суглинках	динамики ОВ в почве в ходе вторичной сукцессии после сплошных рубок
Россия, республика Коми	Еловый лес	Подзолистые, торфянисто- и торфяно-подзолистые почвы на суглинках	устойчивого функционирования почв в современных биоклиматических условиях
Чехия, Крконоши*	Еловый лес	Дерново-подбур на каменистых суглинках	динамики ОВ в почве в ходе вторичной сукцессии после нарушений, вызванных кислотными дождями
Нидерланды, Велюве*	Сосновый лес	Подзол на бедных кварцевых песках	аккумуляции ОВ в почве в ходе первичной сукцессии
Нидерланды, Велюве*	Посадки дугласии	Дерновая почва на суглинках	динамики ОВ в почве в ходе вторичной сукцессии
Канада*	Сосновый лес	Подзол на полиминеральных песках	динамики ОВ в почве в ходе вторичной сукцессии (в составе модели EFIMOD)
Антарктида	Мохово-лишайниковая тундра	Литозем и петрозем на элювии кристаллических пород	динамики ОВ в почве в ходе вторичной сукцессии

Литература

Надпорожская М.А., Абакумов Е.В., Чертов О.Г. Моделирование накопления органического вещества в почве при зарастании отвалов карьеров Ленинградской области // Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Отв. Ред. В.Н. Кудеяров. М.: Наука/ - 2007. – 380 с. – С. 254-261.

Надпорожская М.А., Цудлин П., Новак Ф., Быховец С.С., Чертов О.Г., Комаров А.С., Михайлов А.В. Применение математической модели ROMUL для анализа устойчивости почв ельников Крконоши в Чехии // Почвоведение. - 2009. - Т. 42. - № 6. - С. 657-667. - ISSN 1064-2293.

Chertov O.G. Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.A., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modelling // Ecological Modelling. - 2001. – Vol. 138 (1-3). – P. 289-308.

Nadporozhskaya M.A., Mohren G.M.J., Chertov O.G., Komarov A.S., Mikhailov A.V. Dynamics of soil organic matter in primary and secondary forest succession on sandy soils in the Netherlands: an application of the ROMUL model // Ecological Modelling. - 2006. - Vol. 190. - P. 399-418.

Shaw C., Chertov O., Komarov A., Bhatti J., Nadporozhskaya M., Apps M., Bykhovets S., Mikhailov A. Application of the forest ecosystem model EFIMOD 2 to jack pine along the Boreal Forest Transect Case Study. Canadian J. Soil Sci. 86. 2006. 171-185.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОМЫСЛОВОГО ИЗЪЯТИЯ НА ДИНАМИКУ ЧИСЛЕННОСТИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОПУЛЯЦИЙ

Неверова Г.П.

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия
galina.nev@gmail.com

Аннотация: Исследуется модель динамики численности структурированной лимитированной популяции с сезонным характером размножения. Предполагается, что популяция подвергается промысловому изъятию. Проведено аналитическое и численное исследование модели. Сделаны выводы о совокупном влиянии промыслового изъятия и процессов саморегуляции на режимы динамики численности популяции с возрастной структурой.

1. Уравнения динамики

В данной работе продолжено исследование математической модели (Фрисман и др., 1988, 2010; Шапиро, 1983, Frisman etc., 2011), описывающей динамику численности двухвозрастной популяции, с плотностным лимитированием рождаемости. Коэффициент рождаемости является функцией численности обеих возрастных групп, ее вид выбран по аналогии с моделью Рикера. Популяция подвергается промысловому изъятию после сезона размножения. Предполагается, что количество изъятых особей пропорционально общей численности популяции, и охота ведется на самых крупных особей, т.е. половозрелых. Соответственно, модель имеет вид:

$$\begin{cases} x_{n+1} = a_0 \cdot y_n \cdot \exp(-\alpha \cdot x_n - \beta \cdot y_n), \\ y_{n+1} = (s \cdot x_n + v \cdot y_n)(1-u) \end{cases}$$

где x – численность младшего возрастного класса, y – численность старшего возрастного класса, составляющего репродуктивную часть популяции, n – номер периода размножения, a_0 – репродуктивный потенциал в условиях неограниченности ресурсов популяции, s - коэффициент выживаемости молоди, v – параметр выживаемости репродуктивных особей. α и β – коэффициенты, характеризующие интенсивности воздействия особей неполовозрелого и половозрелого возрастного класса на рождаемость, u - доля ежегодного промыслового изъятия.

2. Результаты исследования

Проведено подробное аналитическое и численное исследование предложенной модели. Показано, что данная модель демонстрирует все богатство и разнообразие динамических режимов аналогичных уравнений, только без промысла. В зависимости от значений параметров $\bar{b} = \alpha/(s\beta)$, $W(\bar{b}) = (4 - 3\bar{b} - \sqrt{4 + 4\bar{b} - 7\bar{b}^2})/(2 - 2\bar{b})$ и u сделаны выводы о способах потери устойчивости нетривиального равновесия (таблица 1).

Таблица 1 – Сценарии потери устойчивости нетривиального равновесия

Значения параметра $\bar{b} = \gamma / \bar{s}$	Значения параметра u	Способ потери устойчивости
$0 \le \bar{b} \le 3/4$	$u < W(\bar{b})$	Сценарий Неймарка-Сакера
$0 \le \bar{b} \le 3/4$	$W(\bar{b}) < u < 1 - \bar{b}$	По двум сценариям
$0 \le \bar{b} \le 3/4$	$u < 1 - \bar{b}$	Через удвоение периода
$3/4 < \bar{b} < 1$	$u < 1 - \bar{b}$	По двум сценариям
$3/4 < \bar{b} < 1$	$u \ge 1 - \bar{b}$	Через удвоение периода
$\bar{b} \ge 1$	$\forall u$	Через удвоение периода

Показано, что при лимитировании рождаемости численностью старшего возрастного класса ($0 \le \bar{b} \le 3/4$, $u < W$) увеличение объемов промыслового изъятия приводит к расширению области устойчивости нетривиального равновесия, однако популяция способна испытывать нерегулярные колебания. Потеря устойчивости происходит по сценарию Неймарка-Сакера (рисунок 1).

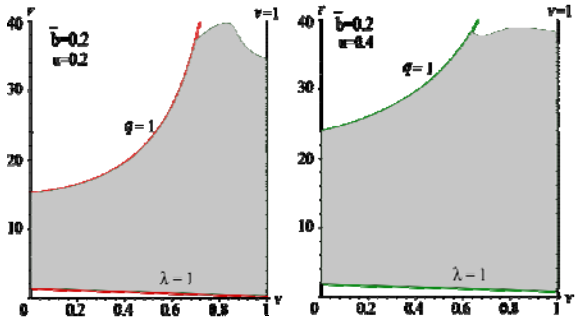


Рисунок 1 – Расширение области устойчивости нетривиального равновесия, вызванное ростом промыслового изъятия

Причем чем больше особей изымается, тем меньше устойчивое развитие популяции зависит от выживаемости старших особей. При $u \ge W$ область устойчивости начинает сужаться, расширяя область устойчивости тривиального равновесия. При $3/4 < \bar{b} < 1$ промысловое изъятие ведет к сужению области устойчивости, расширяя диапазон значений демографических параметров при которых наблюдаются нерегулярные колебания. При снижении рождаемости, в связи с ростом численности молоди, воздействие промыслового изъятия ведет к двухгодичным колебания численности, т.е. потеря устойчивости реализуется по сценарию Фейгенбаума (при $\bar{b} \ge 1$). Как правило, рост интенсивности промыслового изъятия, приводит к стабилизации численности популяции (наблюдается расширение области устойчивости). Однако в ряде численных экспериментов удалось выявить немонотонные изменения области устойчивости нетривиального равновесия, вызванные учетом возрастной структуры популяции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке конкурсных проектов ДВО РАН (12-I-ОБН-05, 12-I-П30-14, 12-II-СУ-06-007, КПФИ12-06-017) и РФФИ (региональный проект 11-01-98512-р_восток_а).

Литература

Фрисман Е.Я., Луппов С.П., Скокова И.Н., Тузинкевич А.В. Сложные режимы динамики численности популяции, представленной двумя возрастными классами // Математические исследования в популяционной экологии. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. – С.4-18.

Шапиро А.П. Роль плотностной регуляции в возникновении колебаний численности многовозрастной популяции // Исследования по математической популяционной экологии. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. – С. 3-17.

Фрисман Е.Я., Неверова Г.П., Ревуцкая О.Л., Кулаков М.П. Режимы динамики модели двухвозрастной популяции // Изв. вузов «ПНД», 2010, т. 18, № 2. С. 111-130.

Frisman E.Ya. Neverova G.P., Revutskaya O.L. Complex dynamics of the population with a simple age structure. // Ecological Modelling, 2011, Vol. 222. P. 1943-1950.

АЛГОРИТМИРОВАНИЕ ЭТАПОВ АВТОГЕННОЙ СУКЦЕССИИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Немчинова А.В.

Костромской государственный университет им. Н.А. Некрасова, Кострома, Россия
nemanvic@rambler.ru

Аннотация: работа посвящена вопросам прогнозирования темпов восстановительной сукцессии на основе закономерностей восстановления вертикальной структуры и горизонтальной организации лесных экосистем после деструктивных нарушений различной природы на примере южнотаежных лесов Костромской области. Смоделированы сценарии восстановления спонтанно развивающихся лесов до квазиклимаксового состояния. Предложены подходы к расчету темпов восстановления лесных экосистем до эталонного уровня.

Несопоставимость собственных времен формирования лесных экосистем со временем проведения наблюдений не позволяет получить необходимую информацию о механизмах, темпах и векторах восстановительных сукцессий, что приводит к внедрению в практику методов лесопользования, снижающих восстановительный потенциал лесных экосистем. Основные подходы оценки сукцессии и климакса изложены в литературе (Восточноевропейские…, 1994; Восточноевропейские…, 2004; Смирнова и др., 2008; и др.). Рекомендуется оценивать популяционно-демографическую структуру сообществ по соотношению ранне- и позднесукцессионных эдификаторов в ярусах и учитывать пространственные параметры (Смирнова и др., 2001), за точку отсчета принимать доагрикультурный облик биогеоценотического покрова начала голоцена. Для практики лесоуправления требуются приемлемые методики оценки степени нарушенности и потенциала восстановления лесов, независимо от текущего возраста и характера нарушения в прошлом. Предлагаем не ограничиваться определением стадий сукцессии, а оценивать ее тенденции и темпы в границах различных пространственных единиц, принимая за эталон любое исходное состояние – ближайшее, до начала нарушения, или давно утерянное, реконструированное. В качестве эталонов может быть принято современное биоразнообразие заповедных лесов и малонарушенных лесных территорий.

На примере спонтанной динамики растительного покрова лесов заповедника «Кологривский лес» смоделированы стадии освоения вертикального и горизонтального пространства популяциями южнотаежных позднесукцессионных эдификаторов, которые могут проходить одновременно или рассогласованно во времени, и с разными темпами. Степень освоенности пространства выступает мерой «зрелости» сообщества и может быть выражена насыщенностью ярусов особями этих видов и уровнем приближенности структуры растительного покрова к мозаичности климаксовых лесов. Выяснено, что приоритет доминирования тех или иных раннесукцессионных древесных пород детерминирован наличием диаспор, а экотопические факторы на первых этапах сукцессии второстепенны или не значимы, но влияют на темпы «созревания» экосистем в последующие стадии. Показана роль катастрофических ветровалов в сокращении сроков восстановления климаксовых лесов. Потоки поколений популяций позднесукцессионных эдификаторов реализуются через дифференциацию в ярусах и в горизонтальном пространстве. Восстановление сообществ в окнах вывалов осуществляется через чередование стадий полидоминантных подъярусов со стадиями доминирования ели, липы или рябины в моно-, или олигодоминантных подъярусах. В горизонтальном пространстве, рассматриваемом в единой шкале, процесс «созревания» экосистем характеризуется чередованием проявлений фрагментации и дефрагментации (гомогенизации) биотического покрова.

На основе обобщения сведений разрабатывается модель относительной оценки темпов восстановления климаксовых лесов на основе хронометрации процессов насыщения

ярусов позднесукцессионными видами. Классифицировано 32 модели (варианта) состояния вертикальной структуры древесной синузии сообществ (рисунок 1) и построены логические схемы разновроятных взаимопереходов моделей, отражающие последовательные переходы растущих деревьев в ярусах до одной из заданных финальных стадий, которая, будучи достигнутой, уже не покидается или зацикливается на замкнутом множестве состояний. Прогнозируемая длительность сукцессионного хода до климаксового состояния или любого заданного этапа определяется минимальным числом вероятных актов в сукцессионной цепочке от начала отсчета, а также вероятностью развития по короткому пути, и соотносится со средним временем онтогенеза наиболее долгоживущей лесообразующей породы – ели (250 лет). В общей формуле расчета учитываются также основные факторы, определяющие темпы восстановления климаксового сообщества – экотопические (ландшафтные) условия; состав формирующегося древостоя (полидоминантность); морфология вертикальной структуры (насыщенность ярусов коренными древесными породами); горизонтальная пространственная структура (стадия, периметр локуса); уровень биоразнообразия. Для пространственных единиц разной размерности предложено рассчитывать балловый показатель относительного восстановительного потенциала лесных экосистем.

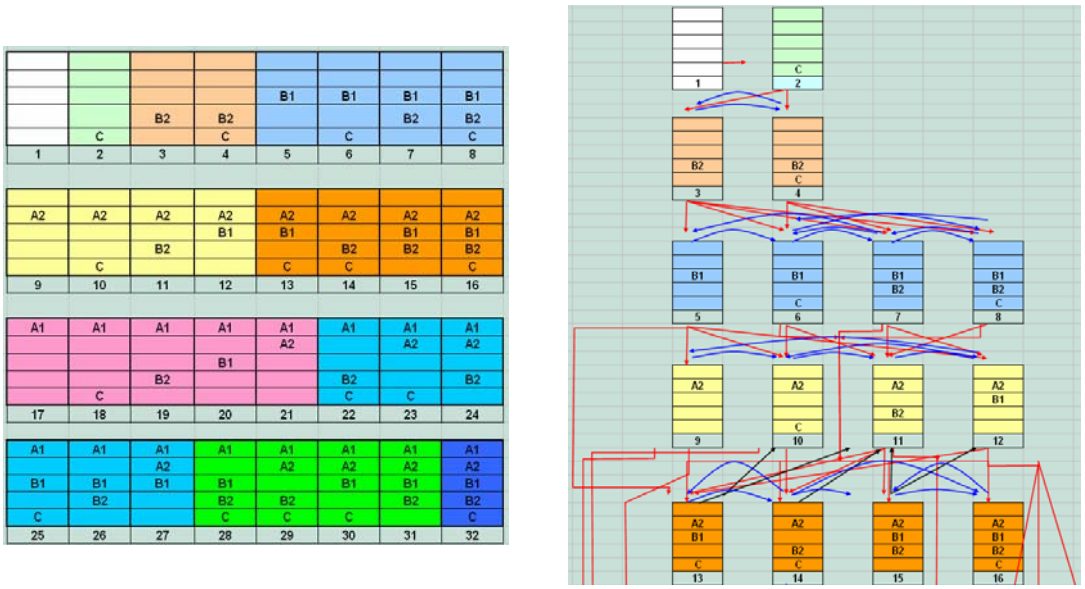


Рисунок 1. Модели вертикальной структуры древесной синузии лесных сообществ (слева) и пример схемы вероятных переходов от одной модели к другой на начальных этапах автогенной сукцессии (справа)

Результаты обеспечены материалами полевых исследований в южнотаежных лесах заповедника «Кологривский лес», принятых за эталонные, на участках массовых ветровалов и в антропогенно преобразованных лесах Костромской области, описаниями на отдельных участках в Коми и Карелии, Кировской, Ленинградской, Псковской, Нижегородской, Ульяновской, Саратовской, Омской (Зап. Сибирь) областях. Использованы методы ординации растительности, демографических и популяционных исследований, факторного анализа, расчета внутриценотического сопряжения видов, биологического и ландшафтного разнообразия, сравнительного анализа разновременных классифицированных космических снимков лесного покрова эталонных участков.

Литература

Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. В 2 кн. М.: Наука, 2004 . Т.1 479 с. Т.2 575 с.
Восточноевропейские широколиственные леса. М.: Наука, 1994. 364 с.

Смирнова О.В., Бобровский М.В., Ханина Л.Г. Использование демографических методов для оценки и прогноза сукцессионных процессов в лесных ценозах // Бюлл. МОИП. Сер. Биологическая. 2001. Т. 106, № 5. С. 26-34.

Смирнова О.В., Торопова Н.А. Сукцессия и климакс как экосистемный процесс // Успехи современной биологии, 2008 г т. 128 №2 с 129-144.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОТНО-ПОЯСНОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Овчинникова Т.М., Суховольский В.Г.

Институт леса им.В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия
ovchinnikova_tm@mail.ru

Аннотация. Предложена модель фазовых переходов второго рода, описывающая высотную зональность древесных растений в горах Саян. Модель хорошо согласуется с данными наблюдений и позволяет количественно охарактеризовать как влияние климатических факторов на встречаемость древесных растений, так и взаимодействия между деревьями различных пород.

Высотная зональность растительности выражается в изменении с высотой типа растительности и встречаемости отдельных видов древесных, кустарниковых и травянистых растений. На высотных профилях происходят качественные изменения состава насаждений (одни породы появляются, а другие перестают встречаться с изменением высоты произрастания, меняется породный состав насаждений).

Для выделения факторов, влияющих на породный состав насаждений в зависимости от высоты и для определения границ высотных поясов у отдельных пород предполагается использовать модель экологических фазовых переходов второго рода, характеризующих ситуацию, когда на определенной высоте деревья отдельной породы появляются (тогда на этой высоте происходит переход из упорядоченной фазы в неупорядоченную) или, напротив, исчезают (в этом случае происходит переход из неупорядоченной фазы в упорядоченную).

В работе использовались данные о высотной зональности лесной растительности среднегорных барьерно-дождевых ландшафтов Западного Саяна. Для анализа изменений высотной поясности древесной растительности в пространстве ГИС были выбраны три трансекты длиной около 45 км и средней шириной 3 км каждая с минимальной высотой H_0 = 320 м н.у.м. и максимальной высотой 1700 м н.у.м. На трансектах использовались данные о составе насаждения, площади и высоты н.у.м. для всех выделов, попавших в пределы трансекты. Для выделенных трансект с шагом 47.6 м по высоте оценивались площади и породный состав лесных насаждений в заданном диапазоне высот. Каждый выдел в пределах изученных трансект характеризовался площадью и породным составом, включавшим березу *Betula* pendula, осину *Populis* tremula, пихту сибирскую *Abies sibirica*, кедр сибирский *Pinus sibirica*, сосну обыкновенную *Pinus sylvestris*.

При описании фазовых переходов для каждой древесной породы вводится функция $G(x_1, x_2, ...)$, риска вытеснения деревьев изучаемой породы, зависящая от большого числа различных факторов $x_1, x_2, ...$, воздействующих на ценоз. Предполагается, что для деревьев определенной породы функция $G(x_1, x_2, ...)$ достигает своего минимально возможного значения во всей области значений переменных x_1, x_2. Для упрощения будем предполагать, что функцию $G(x_1, x_2, ...)$ можно представить как функцию $G(q)$ от некоторой скалярной величины q – параметра порядка, характеризующего насаждения и определяемого так, что $0 \le q \le 1$. Далее, разложив функцию $G(q)$ в ряд Тейлора по четным степеням параметра порядка q, запишем аналог уравнения Л.Ландау (Ландау, Лифшиц, 1964):

$$G(q) = G_0 + a(U - U_c)q^2 + bq^4 \Rightarrow min \qquad (1)$$

где $G_0 > 0$ и $b > 0$ – константы, U – управляющая переменная.

В качестве управляющей переменной в модели высотной зональности была выбрана высота h произрастания деревьев, а в качестве параметра порядка q – относительная встречаемость деревьев i-ой породы в пределах j-го высотного пояса:

Согласно модели (1), связь между параметром порядка деревьев отдельной породы и высотой h их произрастания должна выражаться следующим уравнением:

$$q^2 = \begin{cases} 0, h > h_c \\ \frac{a}{2b}(h_c - h) = A - Bh, h < h_c \end{cases} \quad (2)$$

Если значение управляющей переменной h больше критического значения h_c, то $q = 0$ и деревья данной породы на высотах, больших критической, не встречаются. Если значение управляющей переменной меньше критического, то $0 < q < 1$ и доля территории, занятой деревьями данного вида, будет зависеть от высоты произрастания. Если на некоторой высоте для определенной древесной породы $q = 1$, то вся территория на данной высоте занята деревьями этой породы.

Предложенная модель фазовых переходов второго рода описывает высотную зональность древесных растений в горах Саян. Модель хорошо согласуется с данными наблюдений и позволяет количественно охарактеризовать как влияние климатических факторов на встречаемость древесных растений, так и взаимодействия между деревьями различных пород. Использование универсальной модели (1) для описания высотной зональности произрастания различных пород позволяет существенно упростить модельные уравнения. Предложенная модель позволяет оценить реакцию растительных ценозов на возможные климатические изменения в горных условиях (например, рост температуры T воздуха на данной высоте) через уменьшение эффективного значения h.

В целом предложенный подход позволяет объединить модели, описывающие влияние модифицирующих (климатических) и регулирующих факторов на пространственное распределение в растительных сообществах в горных условиях.

Работа поддержана РФФИ (гранты №№ 10-04-00256-а и 12-05-00494-а).

Литература

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. - М.: Наука, 1964. - 567 с.

НЕТТО CO_2-ОБМЕН И ИСПАРЕНИЕ СФАГНОВОГО БОЛОТА: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И РАСЧЕТОВ С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Ольчев А.В.[1], Волкова Е. М.[2], Каратаева Т.А.[2], Новенко Е.Ю. [3]

[1] *ФГБУН Институт Проблем Экологии и Эволюции имени А. Н. Северцова Российской академии наук, Москва, Россия*
aoltche@gmail.com
[2] *ФГБОУВПО Тульский государственный университет, Тула, Россия*
convallaria@mail.ru
[3] *ФГБУН Институт Географии Российской академии наук, Москва, Россия*
lenanov@mail.ru

Аннотация: Для оценки продуктивности болот и их роли болот в круговороте CO_2 и H_2O были проведены комплексные исследования потоков на сфагновом болоте в Тульской области. По результатам измерений были получены данные о сезонной и суточной изменчивости CO_2/H_2O обмена с учетом пространственной неоднородности болота, а также о вкладе различных растительных сообществ в суммарные потоки. С помощью трехмерной модели Mixfor-3D были получены данные о приходящей к поверхности болота радиации и рассчитаны интегральные величины CO_2 и H_2O обмена.

1. Введение

Основной целью исследования являлось определение масштабов пространственно-временной изменчивости CO_2/H_2O-обмена болот, расположенных в зоне широколиственных лесов на территории Тульской области, по данным экспериментальных наблюдений и модельных расчетов. Болота Тульской области в настоящее время являются объектом интенсивных геоботанических, геоморфологических и экологических исследований (Волкова 2011). Они являются устойчивыми природными экосистемами и оказывают существенное влияние на сохранения экологического равновесия природных ландшафтов. Данные о динамике нетто CO_2 обмена между различными типами болотных экосистем и атмосферой в регионе, а также данные по испарению болот необходимы, с одной стороны, для оценки продуктивности болот и интенсивности торфообразования, а с другой - для определения роли болот в круговороте CO_2 и H_2O в атмосфере и для ослабления возможных негативных экологических последствий усиления парникового эффекта на биосферу в XXI веке.

2. Методы

В качестве основного объекта исследований было выбрано болото "Главное" (п. Озерный, Тульская обл.), которое занимает площадь около 1.2 га и сформировано в серии провалов карстово-суффозионного происхождения, которые объединены общей торфяной залежью. Эвтрофные сообщества приурочены к окраинным частям болота. Центральная его часть занимает около 0.7 га и представлена мезоолиготрофной растительностью. Болото окружено сообществами широколиственного леса с дубом, липой, ясенем и кленом.

Для определения масштабов пространственно-временной изменчивости CO_2 и H_2O обмена на исследуемом болоте нами была заложена трансекта от южной окраины к центру болота, пересекающая разные растительные сообщества. Измерения потоков CO_2 и H_2O проводились с помощью метода экспозиционных камер. Применение данного метода было обусловлено небольшими размерами болота и мозаичным растительным покровом, что сделало невозможным применение альтернативных методов измерений потоков, в частности, метода турбулентных пульсаций. Интенсивность газообмена определялась по закрытой схеме с помощью измерительной системы, включающей экспозиционную прозрачную

камеру и портативный инфракрасный газоанализатор LI-840 CO_2 и H_2O (Li-Cor, США). Для интерпретации результатов измерений CO_2 и H_2O обмена между поверхностью болота и окружающим воздухом параллельно с оценкой интенсивности потоков проводили измерения приходящей ФАР, температуры воздуха и торфа, а также уровня болотных вод. Измерения проводились в течение вегетационного периода с мая по октябрь 2012-13 годах в дневное время при солнечной малооблачной погоде. В ходе исследований для различных компонентов растительных сообществ были получены данные о первичной брутто продуктивности и темновом дыхании. Для определения зависимости нетто CO_2 обмена и первичной продуктивности сообществ от приходящей ФАР для доминирующих видов в растительных сообществах были получены световые кривые фотосинтеза.

Для расчета пространственной изменчивости нетто CO_2 и H_2O обмена в пределах болота, а также расчета интегральных потоков была использована трехмерная процесс-ориентированная модель Mixfor-3D (Olchev et al 2009). Mixfor-3D модель состоит из нескольких тесно взаимосвязанных блоков, описывающих 3D структуру древостоя, 3D перенос радиации, 3D турбулентный перенос тепла, H_2O и CO_2 в приземном слое воздуха, 3D перенос воды и тепла в почве. Основной концепцией, использованной в модели, является совокупное описание физических и биологических процессов на различных пространственных уровнях экосистемы: от уровня отдельного листа, растения и дерева до всей экосистемы в целом.

3. Основные результаты

Результаты экспериментальных исследований показали значительную пространственную и временную изменчивость CO_2 и H_2O-обмена исследуемого болота (Ольчев с соавт. 2012). В сезонном ходе максимальные значения нетто CO_2-обмена в центральной части болота наблюдались в июне (-6.8±4.2 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$, сток CO_2 из атмосферы). В краевой части болота максимум нетто CO_2-обмена был несколько сдвинут к июлю и не превышал 1.8±0.6 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$, прежде всего, из сильного затенения поверхности болота кронами окружающих болото деревьев. Интенсивный перегрев листьев растений в центральной части болота в августе за счет высоких значений приходящей ФАР (до 1500 мкмоль $м^{-2}с^{-1}$) и экстремально высоких температур воздуха, достигавших в дневные часы 33-38єС, являлся основной причиной снижения нетто-фотосинтеза растений и, как следствие, уменьшения интенсивности интегрального нетто CO_2 обмена. На август приходятся также и максимум фактического испарения (0.23±0.10 мм $час^{-1}$), что обусловлено высоким уровнем грунтовых вод (УБВ=13-15см). Интегральные величины CO_2 и H_2O обмена были рассчитаны по результатам расчета поля радиации, смоделированным Mixfor-3D моделью и световым кривым фотосинтеза и транспирации для разных компонентов растительных сообществ.

Исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ (11-04-97538-р_центр_а, 11-04-01622-а, 11-05-00557-а, 11-05-00854-а), правительства РФ (11.G34.31.0079) и программы фундаментальных исследований президиума РАН "Живая природа: современное состояние и проблемы развития".

Литература

Волкова Е.М. Редкие болота северо-востока Среднерусской возвышенности: растительность и генезис // Ботанический журнал - 2011 - Т. 96 - № 12 - С.1575-1590

Olchev A., Radler K., Sogachev A., Panferov O., Gravenhorst G. Application of a three-dimensional model for assessing effects of small clear-cuttings on radiation and soil temperature // Ecological Modelling. – 2009 - V.220 - P. 3046–3056

Ольчев А.В., Волкова Е. М., Каратаева Т., Новенко Е.Ю. Нетто CO_2-обмен и испарение сфагнового болота в зоне широколиственных лесов Европейской России // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. - 2012 - Вып. 3 - С. 207-220

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГЕНОФОНДОВ ПОПУЛЯЦИЙ КАВКАЗСКИХ СКАЛЬНЫХ ЯЩЕРИЦ РОДА DAREVSKIA НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ МОЛЕКУЛЯРНОГО МАРКИРОВАНИЯ ГЕНОМОВ

Омельченко А.В. [1], Вергун А.А.[2], Петросян В.Г.[1], Рысков А.П.[2]

[1]*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*
omi@bk.ru
[2]*Институт биологии гена РАН, Москва, Россия*
vermand@mail.ru

Аннотация: В настоящей работе представлены результаты применения разработанной нами математической модели генетико-популяционной структуры партеновидов с использованием данных о внутри- и межпопуляционном полиморфизме тетрануклеотидных микросателлитных маркеров геномов партеногенетических ящериц *Darevskia unisexualis, Darevskia dahli* и двуполых ящериц *Darevskia valentini*.

Введение

Ранее нами была разработана математическая модель, которая позволяла количественно оценить вклад популяций в генофонд однополых видов позвоночных животных (Омельченко и др., 2009). Первоначально данная модель применялась в наших исследованиях с использованием данных о распределении динуклеотидных микросателлитных локусов в генофонде партеновида *D. unisexualis*. В данной работе мы расширяем спектр объектов исследования и вовлекаем в него другие виды ящериц рода *Darevskia* – как однополые (*D. dahli*), так и двуполые (D. valentini). При этом следует отметить, что вид *D. valentini* является отцовским видом для *D. unisexualis* и именно от него в процессе сетчатой эволюции при гибридизации с другим двуполым видом произошел вид *D. unisexualis* (Darevskiy et al., 1985). Кроме того, в качестве входных данных мы используем другой тип микросателлитных маркеров, а именно - комбинации трех локусов, содержащих тетрануклеотидные микросателлиты. Таким образом, целью данной работы является проверка применимости разработанной математической модели в условиях использования различных типов маркеров, а также проведение сравнительного анализа структур генофондов трех видов рода Darevskia. Данные исследования в будущем помогут внести вклад в понимание процессов дифференцировки популяций однополых и двуполых видов в условиях уникальных эволюционных и экологических взаимоотношений внутри данного рода.

Объекты и методы

Объектами исследования являются три вида скальных ящериц - *D. Unisexualis* (5 популяций, 65 особей), *D. Dahli* (5 популяций, 110 особей), *D. Valentini* (4 популяции, 19 особей). В качестве молекулярных маркеров использовались три GATA-микросателлитных локуса — Du215 (12 аллелей), Du281 (23 аллеля) и Du323(12 аллелей). Помимо описанной выше математической модели генофонда мы использовали аддитивную модель генома, где каждой особи ставилось в соответствие бинарное упорядоченное множество, единицы в котором обозначают наличие того или иного аллеля в геноме особи, а нули — его отсутствие. Вычислительный эксперимент с использованием двух описанных моделей ставился при помощи созданной нами компьютерной программы «Генофонд популяций» (Омельченко и др., 2013). Массивы выходных значений, полученных в результате применения моделей подвергались статистической обработке (диссперсионному и кластерному анализам) при помощи программы STATISTICA 7.0.

Результаты и обсуждение

Результаты использования указанных математических моделей показаны на рисунках 1 и 2. На основании этого и прошлых исследований можно сделать следующие выводы: (1) Модели демонстрируют сходные результаты вне зависимости от типа используемых генетических маркеров; (2) Популяции, обитающие в более жестких экологических условиях демонстрируют меньший вклад в генофонд вида, но при этом наиболее близки по геномному разнообразию основному геномному пулу вида, что в случае партеновидов может объясняться либо эффектом бутылочного горлышка за счет меньшей численности их популяций, либо эффектом основателя в процессе их видообразования.

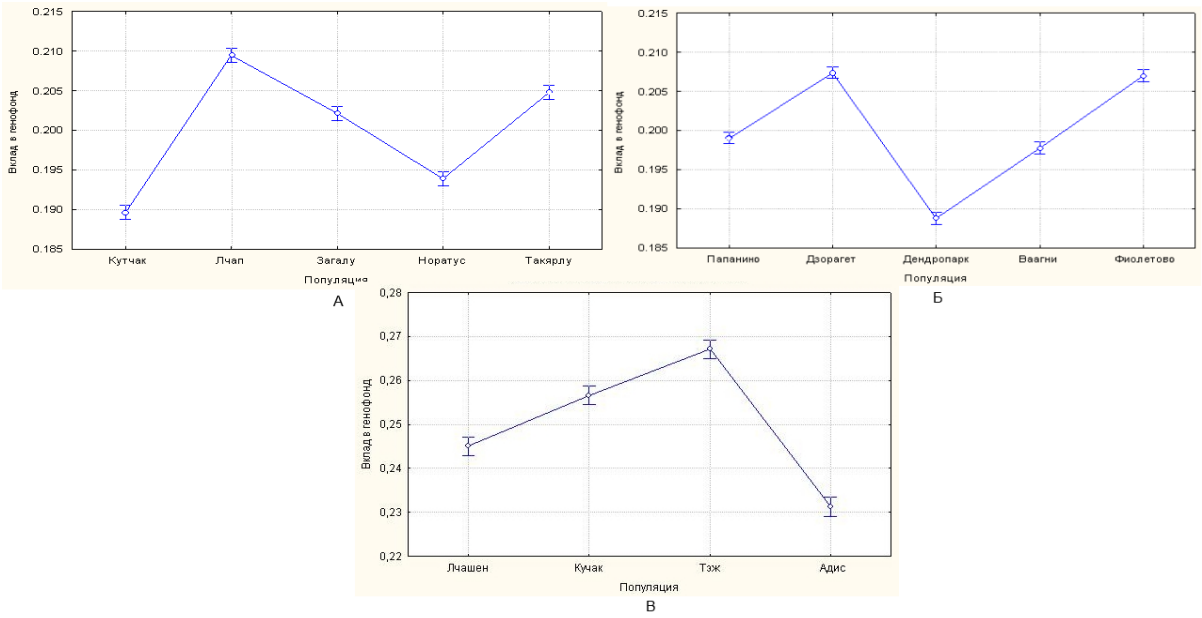


Рисунок 1 – Результаты диссперсионого анализа генетического вклада популяций в генофонд вида *D.unisexualis* (А), *D. dahli* (Б)*, D. valentini*(В)

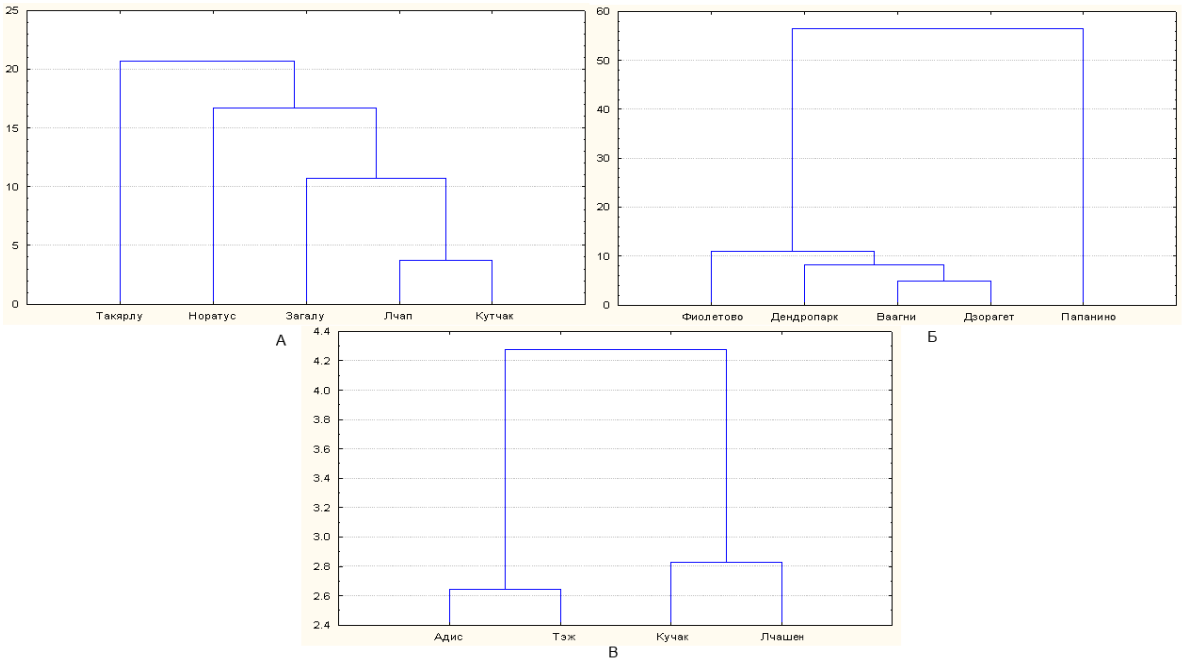


Рисунок 2 – Результаты кластерного анализа близости популяций на основании распределение геномов у *D.unisexualis* (А), *D. dahli* (Б), *D. valentini*(В).

Литература

Омельченко А.В., Корчагин В.И., Севастьянова Г.А., Рысков А.П., Токарская О.Н. Молекулярно-генетическая характеристика микросателлитных динуклеотидных локусов у партеногенетических ящериц Darevskia unisexualis. // Генетика, 2009, том 45, №2, с. 230-238.

Darevsky I.S., Kupriyanova L.A., Uzzel T. Parthenogenesis in Reptiels // Boilogy of Reptilia. 1985.V.15. P. 412-526.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615297 Генофонд популяций / Омельченко А.В., Вергун А.А. заявитель и патентообладатель МПГУ. – № 2013610830/69; дата поступ. 05.02.13; зарегис. 04.06.13;

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ И ПРОДУКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИИ В XX - XXI-ОМ СТОЛЕТИЯХ

Павлова В.Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии», Обнинск, Россия
vnp2003@bk.ru

Аннотация: Представлены оценки линейных трендов агроклиматических показателей за период потепления климата с 1975 по 2012 г. для территории РФ. Показано, что изменения климата последних десятилетий привели к росту урожайности зерновых культур, которая оценивается величиной порядка 1,2 - 2,6 % за 10 лет. Получены оценки биоклиматического потенциала и представлен прогноз урожайности зерновых культур при изменении климата по ансамблевому сценарию (ГГО) и сценарию GFDL. Показано, что к 2030-2050 гг. можно ожидать снижения продуктивности агросферы на 12-18 % по сравнению с современным уровнем.

Важной стратегической задачей XXI-го века, несомненно, является рост производства сельскохозяйственной продукции в связи с мировым продовольственным кризисом. В силу разнообразия физико-географических условий России, оценки влияния ожидаемых изменений климата и меры по адаптации к ним должны носить региональный характер, оставаясь при этом сопоставимыми в экономическом отношении. Для практической реализации указанного подхода разработаны соответствующие математические модели и методики, используемые для расчетов в виде имитационной системы КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ (КПУ) (Сиротенко и др., 2011).

Система КПУ позволяет вести расчеты на протяжении всего XX-го столетия (ретроспективный режим) и XXI-го столетия на основании сценариев глобальных климатических моделей (прогностический режим). Рассчитаны оценки трендов важнейших агроклиматических показателей, характеризующих теплообеспеченность, увлажненность территории России за период глобального потепления с 1976 г. по 2012 г.

Анализ трендов показателей увлажненности, представленных в таблице 1, позволяет

Таблица 1 – Оценки трендов показателей влажностного режима на территории земледельческой зоны России за период с 1976 по 2012 гг.

Федеральный округ	Сумма осадков, мм				ИС	$W_{воз.вег.}$	$W_{июль}$	N_{w10}
	зима	весна	лето	осень	б/р	мм	мм	сут.
1976-2012 гг.								
Северо-Западный	4,82	5,32	0,0	0,64	0,02	-0,7	-2,6	0,9
Центральный	-0,43	-0,35	-10,3	0,12	0,06	-1,2	-2,8	4,5
Приволжский	0,26	5,67	-10,1	-2,03	0,06	-0,9	-1,6	4,7
Южный	-2,50	13,25	-4,6	6,54	0,01	-0,4	-0,6	0,5
Северо-Кавказский	8,43	4,07	-1,7	7,14	-0,03	-0,6	0,1	-1,7
Уральский	-1,18	7,50	-4,2	-1,18	0,04	-0,2	-1,4	2,2
Сибирский	0,99	2,45	4,9	0,96	0,01	-0,1	-0,5	1,2
Дальневосточный	7,43	6,71	3,7	-1,34	0,01	-0,6	-1,2	1,1
Россия	2,01	5,03	-1,7	0,56	0,03	-0,5	-1,4	2,4

Примечание: ИС – отношение испаряемости к осадкам за год, $W_{июль}$ – влагозапасы пахотного слоя почвы в июле, $W_{воз.вег.}$ – влагозапасы почвы на дату возобновления вегетации, N_{w10} – число дней вегетационного периода, когда влажность пахотного слоя почвы не превышает 10 мм

сделать вывод, что за период 1976 - 2012 гг. наблюдается незначительный рост засушливости на территории земледельческой зоны РФ. Обращает на себя внимание практически повсеместный рост осадков весной (за исключением Центрального ФО), а также рост осенних осадков в районах возделывания озимых зерновых культур (Северный Кавказ, Центральный ФО).

Рассчитаны тренды климатообусловленной урожайности зерновых и зернобобовых культур в целом и озимой пшеницы при современных климатических изменениях. Положительные тренды урожайности для озимых зерновых культур сохраняются. Урожайность всех зерновых и зернобобовых культур в результате изменений климата растет на большей части России. Отмечено снижение климатообусловленной урожайности в трех регионах (на юге Приволжского ФО и в центральной и южной частях Центрального ФО), скорость которого не превышала 1,2 % за десятилетие. Средняя оценка роста урожайности для территории России оценивается величиной порядка 1,2 % за десятилетие или 4,5 % за период с 1975 г. по 2012 г.

При расчетах по сценариям будущего климата использованы сценарии, подготовленные на пятом этапе работы по Всемирной программе исследования климата (CMIP5 Coupled Model Intercomparison Project) (2). Выбор сценариев и методические рекомендации по их использованию осуществлялся ведущими специалистами ГГО и ИГКЭ.

Рассматривалось влияние последствий изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных культур на территории России на протяжении 21-го века для двух сценариев антропогенного воздействия - RCP4.5 (“мягкий сценарий”) и RCP8.5 (“жесткий сценарий”).

В таблице 2 представлены оценки изменений продуктивности биоклиматического потенциала и урожайности яровых зерновых культур по ансамблевому сценарию для разных временных интервалов: 2011- 2030 гг. (S2), 2034- 2053 гг. (S3), 2041 - 2060 гг. (S4), 2080 - 2099 гг. (S5) при антропогенном воздействии RCP4.5. Расчеты выполнялись при прогнозируемых уровнях CO_2.

Таблица 2 - Изменение продуктивности сельскохозяйственных культур России в XXI-ом веке по ансамблевому сценарию (RSP4.5) для территории ЕТ РФ

Регион	Биоклиматический потенциал, %				Зерновые культуры, %			
	S2	S3	S4	S5	S2	S3	S4	S5
	Рост содержания CO_2, %							
	28	39	51	80	28	39	51	80
Центральный	10.4	19.0	22.6	35.1	12.4	16.2	18.8	25.8
Волго-Вятский	12.5	16.2	21.5	33.4	8.2	7.3	8.8	16.9
Центр.-черноземный	3.9	6.0	7.3	10.3	.7	-.5	-.5	-3.4
Приволжский, север	11.0	11.1	12.7	20.4	-1.6	-6.3	-4.3	-2.0
Приволжский, юг	1.6	1.6	3.9	7.5	-3.7	-4.2	-2.3	3.6
Северо- Кавказский	-1.2	-3.0	-1.2	4.5	-7.1	-9.0	-10.9	-12.5

Литература

Сиротенко О.Д., Клещенко А.Д., Павлова В.Н., Абашина Е.В., Семендяев А.К. Мониторинг изменений климата и оценка последствий глобального потепления для сельского хозяйства // Агрофизика. - 2011. - №2. - с. 31-39.

http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/forcing.

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОПУЛЯЦИЮ ФИТОГЕЛЬМИНТОВ В АГРОБИОЦЕНОЗЕ

Перевертин К.А.

Центр паразитологии Института Проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия
perevertink@mail.ru

Аннотация: Система управления популяцией паразитических нематод на сельхозкультурах путём дозированного использования средств борьбы (химпрепараты, биоагенты) базируется на 2-х зависимостях типа «доза-эффект» - экспонентой (хорошо известной моделью вредоносности) и предлагаемой гиперболической поверхностью затрат на управление. Хотя 1/x≠e-X, при наличии соответствующих параметров гипербола и экспонента пересекаются не более чем в двух точках. Их положительная разность – кривая, имеющая единственный максимум. Аналитическое решение для этой критической точки соответствует оптимальному управляющему воздействию по критерию максимизации условно-чистого дохода.

Коммерциализация современного землепользования предполагает востребованность новых экономико-математических методов управления агробиоценозами, в частности, в области защиты растений, особенно в условиях дефицита ресурсов.

В общем виде постановка задачи выглядит достаточно просто: Имеется посевная площадь, заражённая фитонематодами. Борьба с ними возможна внесением препарата (химического либо биоагента). Требуется оптимально использовать препарат по критерию наивысшей рентабельности (max руб. дохода/ руб. затрат).

Ранее нами (Экоматмод -2009) подробно рассматривалась зависимость (потерь) урожая сельхозкультур (Y) от допосевной плотности популяции фитопаразитических нематод (P), описываемая классической моделью Seinhorst (1965), известной за рубежом, как модель критической точки (critical point model).

$$Y = m + (1-m)Z^{(P-T)} \text{ для P>T, а для } P \le T \text{ , Y=1} \quad (1)$$

Где Y-выход урожая; P – входная переменная – плотность популяции нематод (особей/100 мл почвы). В этих же единицах выражается параметр T – порог толерантности – плотность ниже которой потерь урожая не происходит; m – минимальный урожай, постоянный при сколь угодно высоких плотностях нематод; Z – параметр меньше 1, имеющий биологический смысл агрессивности паразита в системе с конкретным хозяином.

Хуже дело обстоит со второй кривой – функцией затрат на борьбу. Подавляющее большинство прикладных рекомендаций, характеризуя «биологическую эффективность», либо напрямую связывают дозировку препарата с выходом урожая (минуя редукцию популяции паразитов), либо описывают это снижение, как постоянную, вне зависимости от значения исходной плотности популяции. На более высоком уровне стоит функция «доза-эффект», представляющая S-образную кривую, задаваемую не аналитически, а, например, таблицей вероятностных единиц (пробит-юнит). Самым главным её достоинством является доза LD_{50} – аргумент, предусматривающий 50%-ю смертность паразитов – соответствующая точке перегиба (центру) S-образной кривой.

Альтернативой нами предлагается гиперболический вид функции затрат на борьбу З(P). Точка перегиба гиперболы сохраняет свой смысл LD_{50}, «наследуя» его от соответствующей точки S-образной кривой «доза-эффект». К тому же LD_{50} – один из очень немногих достоверно определяемых показателей для многочисленных хозяинно-паразитных систем в различных агробиоценозах. Зная «главную точку» гиперболы и асимптоты, функцию затрат З(P) (для конкретной P_0) можно вполне считать определённой.

Вообще говоря о «дозе-эффекте», S-образность – это, зачастую, дань вербальным человеческим представлениям о характере функции. Та же отрицательная экспонента Сейнхорста именно S-образна в полулогарифмических координатах и полностью

удовлетворяет представлениям о функции «доза-эффект» от токсикологии до, например, акустики:

1. наличие зоны отсутствия эффекта (возможен и контринтуитивный обратный эффект) на малых дозах [0;T];

2. зависимость эффекта от логарифма дозы близка к линейной в среднем диапазоне нагрузок (LD_{50}+- L);

3. влияние высоких доз нивелируется – эффект индифферентно приближается к некой горизонтальной асимптоте (m).

Целевая функция оптимизации, разумеется, может быть различной. Существовала, например, такая страна – ГДР, где самообеспечение сахаром возводилось в ранг госполитики. Очень смелое решение для агробиоценоза (свекловичных полей) ещё в 19 веке «порадовавшем» паразитогенным кризисом – массовым банкротством и закрытием сахзаводов по причине «свеклоутомления». Причиной была свекловичная цистообразующая нематода до сих пор широко представленная (несмотря на более чем 100-летнюю борьбу) в нематофауне Германии. Кстати, невозможность полной ликвидации (девастации) рассматриваемого паразита хорошо вписывается в предлагаемую нами гиперболическую кривую затрат на борьбу. Снижение потерь до неощутимого уровня ($P_i \leq T$) возможно, хотя чрезвычайно затратно, но нулевой аргумент асимптотически недостижим. Поэтому, в нашем случае, в качестве целевой функции логично заявлена не максимизация выхода урожая, а оптимальная рентабельность использования препарата (достаточно редкая ситуация, когда экономические приоритеты относительно совпадают с экологическими).

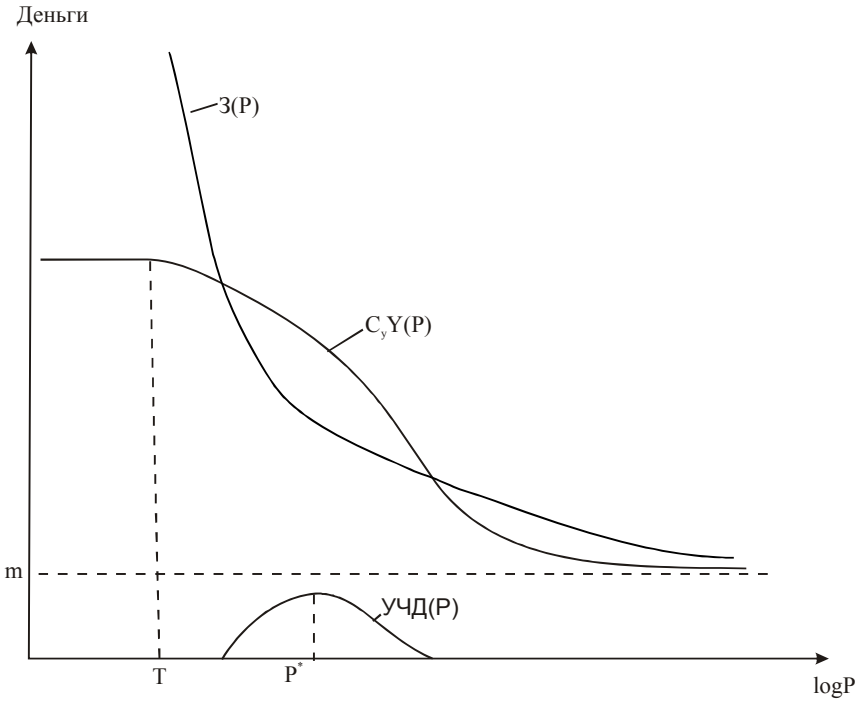


Рисунок 1. Определение оптимального аргумента в двух системах “доза-эффект”

Корректно совместить рассматриваемые отрицательную экспоненту и гиперболу очень легко – достаточно умножить выход урожая У на закупочную цену урожайной продукции C_y (строго говоря, на прогноз этой цены в конце вегетационного периода). Итак, по оси ординат имеем «Деньги», по оси абсцисс – плотность популяции нематод - Р. При этом (исключительно для наглядности) последняя шкалируется в логарифмах. Сейнхорстова экспонента становится S-образной, а гипербола лишь теряет симметричность ветвей (рисунок 1).

Две точки пересечения кривых – это два корня решения уравнения 2.

$$З(P, P_0) = C_y УР \quad (2)$$

Именно в диапазоне между этими точками существует последняя интересующая нас кривая – разность между затратами и доходом – условно чистый доход УЧД(Р) (уравнение 3). Понятно, что

$$УЧД(P) = C_y У(P) - З(P, P_0) \quad (3)$$

Эта несимметричная кривая обладает несомненным достоинством — единственным максимумом, который и является целью наших скромных поисков. Определить его также несложно – УЧД(Р)* - корень уравнения 4.

$$(C_y У(P) - З(P, P_0))' = 0 \qquad (4)$$

Задача решена.

Пример. Рассчитанная в результате применения данного подхода доза ДД (дихлорпропен-дихлорпропан, правда, в настоящее время не применяется) против свекловичной цистообразующей нематоды при Ро=5000 нематод/100 мл почвы составила 410 л/га против универсальной рекомендации 800 л/га.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЧНО-ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫБОРА РАЗЛИЧНЫХ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ПОПУЛЯЦИЯМИ ВАЖНЕЙШИХ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ ПАРНОКОПЫТНЫХ РОССИИ

Петросян В.Г., Дергунова Н.Н., Бессонов С.А., Омельченко А.В.

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия
petrosyan@sevin.ru

Аннотация: Представлен анализ популяционной динамики и выбора оптимальной стратегии управления популяциями важнейших ресурсных видов с помощью матрично – имитационной модели на примере лося (A. *alces* L.) Показано, что значительное влияние на динамику численности животных оказывает структура добычи животных, и для современных годовых квот на отстрел предложены наилучшие структуры изъятия животных – доли сеголеток, взрослых самок и самцов.

Введение

В настоящее время в России добыча копытных в пересчёте на одного охотника в год существенно ниже, чем в ряде зарубежных стран (Государственное управление…, 2011). На основе литературных данных можно утверждать, что в России 1 охотник может легально добыть лишь одно копытное животное 1 раз в 25 лет. В Венгрии показатели добычи косули сравнимы с их добычей в России, а добыча кабана во Франции в 2 раза превышает их добычу в России. По экспертным оценкам потенциальная численность копытных в России может составлять около 19 млн. особей, т.е. в целом по стране суммарная численность копытных в 6 раз ниже потенциально возможной (Государственное управление…, 2011). Наш комплексный анализ данных мониторинга в 1961-2010 гг. позволяет утверждать, что для косули и кабана наблюдаются положительные тенденции увеличения численности за последние годы после длительного периода (1996-2002 гг.) минимальной численности. К сожалению, для лося отсутствуют положительные тенденции к увеличению численности как на федеральном, так и на региональном уровнях (Петросян и др. 2010, 2012).

Методы и анализ результатов

Для выбора оптимальной стратегии управления популяциями нами разработана матрично-имитационная модель (дискретная по времени), предназначенная для оценки влияния различных стратегий отстрела на динамику популяций парнокопытных животных. Разработанная модель и компьютерные программы позволяют получать прогнозные значения динамики численности для различных стратегий управлений популяциями. Выбор оптимальной стратегии управления популяциями диких копытных реализовался на примере лося. Имитационные эксперименты проводились для принятого в России диапазона квот отстрела 3- 7 %% осенней численности при различных долях сеголеток (20, 40 %%) и старших возрастных групп самок:самцов (50:50, 40:60, 20:80 %%) с целью определения наилучшей динамики темпов роста численности.

Прогнозирование динамики численности российской модельной популяции проводилось при ежегодной промысловой нагрузке 3.6 и 7 %% соответственно. Для указанных квот рассматривались различные стратегии отстрела при выборе оптимальных параметров управления. Например, для лимита добычи 3.6% (из них – 20 % сеголетки и 80 % - взрослые) рассматривались три стратегии (стратегия I- самки:самцы 50 %; стратегия II- самки 35% , самцы 65 %; стратегия III –самки 20% , самцы 80 %). Для другого варианта (доля сеголеток составляла 40% и взрослых 60 %) также рассматривались три стратегии - (стратегия I - самки:самцы 50 %; стратегия II- самки 35%, самцы 65 %; стратегия III –самки 20%, самцы 80 %). Моделирование показало, что при ежегодном отстреле 3.6% особей численность популяции будет стабильно увеличиваться. Однако, среди анализируемых

вариантов существует стратегия управления популяциями (рис.), которая обеспечивает максимальный рост численности до 1.6 млн. особей с 2012 по 2033 гг. Причем соотношение численности полов (самок:самцов) взрослых особей в конце периода моделирования составляет - 1.8:1. Результаты вычислительного эксперимента наглядно демонстрируют, что при неизменности экологических факторов и фиксированном ежегодном лимите добычи увеличение численности популяции можно добиться смещением основной промысловой нагрузки на сеголеток и самцов.

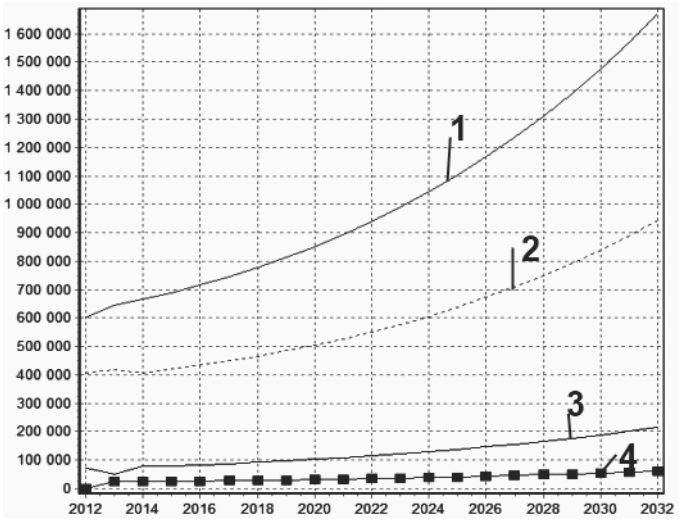


Рисунок 1. Отстрел 3.6% (структура изъятия - 40 % сеголетки; 60 % -взрослые из них самки-самцы 20:80 %%). Половое соотношение взрослых особей самок:самцов в конце периода моделирования 1.8:1(где по оси X – время, годы, по Y- численность особей; 1 – общая численность, 2-взрослые особи, 3-полутарогодовалые; 4 - отстрел)

Прогнозирование динамики численности модельной популяции также проводилось при ежегодной промысловой нагрузке 7 %. Результаты показали, что при ежегодной добычи 7 % рекомендуется использовать следующую структуру изъятия – сеголетки 20 %; взрослые 80 %, в том числе из них самки:самцы 35:65 %%. В экспериментах мы ограничивались только теми значениями ежегодной добычи животных в размере 3.6 и 7 %% от популяции, которые на практике осуществляются в нашей стране в последние годы 2009-2012 гг.

Итак, значительное влияние на динамику численности животных оказывает структура добычи животных в рамках выделенного лимита 3.6% и 7% соответственно. Для увеличения численности могут быть использованы следующие стратегии: 1) при ежегодной добычи 3.6 % рекомендуется использовать следующую структуру изъятия - 40 % сеголетки; 60 % - взрослые из них самки-самцы 20:80 %%; 2)при ежегодной добычи 7 % рекомендуется использовать следующую структуру изъятия - 20 % сеголетки; 80 % -взрослые из них самки:самцы 35:65 %%.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Программы ОБН РАН “Биологические ресурсы России: Динамика в условиях глобальных климатических и антропогенных воздействий ” и Соглашения № 8051 МинобрНауки, РАН и ИПЭЭ РАН.

Литература

Государственное управление ресурсами. Охота и охотничьи ресурсы Российской Фередрации. Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Специальный выпуск. Изд. «Молодая гвардия-Стиль». Г. Пермь. Специальный выпуск. 2011. 664 с.

Петросян В.Г., Дергунова Н.Н., Бессонов С.А., Назарова К.А. Комплексная имитационная модель оценки динамики численности, половозрастной структуры и оптимальной плотности лося (*Alces alces* L.) на основе данных наземных и дистанционных измерений. Ж. Успехи современной биологии. 2010, т. 130, № 1, с. 88-99

Петросян В.Г., Дергунова Н.Н., Бессонов С.А., Омельченко А.В. Анализ динамики численности и пространственного распределения важнейших ресурсных видов диких копытных (лося, косули, кабана) России на основе данных многолетнего мониторинга. Ж. Успехи современной биологии. 2012. Т. 132. № 5 С. 463-476.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ В ПИТАНИИ ЗООПЛАНКТОНА НА ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТОНОЙ (N–P–Z–D) ПЛАНКТОННОЙ ПИЩЕВОЙ ЦЕПИ

Подгорный К.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок, Россия
kapborok@mail.ru

Аннотация: Рассматриваются свойства четырехкомпонентной N–P–Z–D-модели планктонной пищевой цепи. В модели учтено, что существуют определенные пищевые предпочтения в питании зоопланктона. Предлагается математическая модель, которая способна порождать некоторые фундаментальные правила пищевого поведения и дает возможность исследовать влияние смены пищевых предпочтений в питании зоопланктона на динамическое поведение всей планктонной системы.

Цель работы состоит в исследовании динамического поведения пространственно однородной математической модели четырехкомпонентной планктонной системы. Модель включает в себя биогенные элементы (N), фитопланктон (P), зоопланктон (Z) и планктонный детрит (D) (Подгорный, 2012). В данной работе будет рассматриваться такой вариант структуры модели, который учитывает, что зоопланктон может питаться фитопланктоном и детритом и что в природных экосистемах у зоопланктона существуют определенные пищевые предпочтения в питании, которые могут изменяться с течением времени в зависимости от тех или иных условий. Поэтому важно оценить влияние этого фактора на характер динамики модельной системы.

Базовый вариант модели представляет собой систему четырех обыкновенных дифференциальных уравнений (Подгорный, 2012):

$$\begin{cases} \dfrac{dN}{dt} = -\dfrac{N}{e+N}\cdot\dfrac{aP}{b+cP} + \beta\lambda\dfrac{(P+\omega D)}{\mu+P+\omega D}Z + \gamma qZ + \varphi D^{\delta} + k(N_0 - N), \\ \dfrac{dP}{dt} = \dfrac{N}{e+N}\cdot\dfrac{aP}{b+cP} - rP - \lambda\dfrac{P}{\mu+P+\omega D}Z - (s+k)P, \\ \dfrac{dZ}{dt} = \alpha\lambda\dfrac{(P+\omega D)}{\mu+P+\omega D}Z - qZ - \theta PZ, \\ \dfrac{dD}{dt} = rP + \lambda\dfrac{((1-\alpha-\beta)P - (\alpha+\beta)\omega D)}{\mu+P+\omega D}Z - \varphi D^{\delta} - (\psi+k)D, \end{cases} \quad (1)$$

где a/b – максимальная скорость роста фитопланктона; b – коэффициент поглощения света водой; c – коэффициент самозатенения фитопланктона; e, μ – константы полунасыщения; r – скорость дыхания фитопланктона; λ – максимальная скорость роста зоопланктона; q – коэффициент выедания зоопланктона организмами высших трофических уровней; k – скорость поступления биогенных элементов; N_0 – концентрация биогенных элементов, поступающих в систему; s, ψ – скорости оседания фитопланктона и детрита соответственно; φ – скорость минерализации детрита; δ – порядок ферментативной реакции; α – коэффициент эффективности потребления фитопланктона зоопланктоном; β – коэффициент экскреции пищи зоопланктоном; γ – коэффициент регенерации пищи, не усвоенной организмами высших трофических уровней; θ – скорость выделения метаболитов

(токсических компонентов) клетками фитопланктона. Все переменные модели неотрицательны и выражены в граммах углерода на м^3. Пищевые предпочтения зоопланктона учитываются с помощью параметра $\omega = p_2/p_1$, где p_1 и p_2 – коэффициенты предпочтения зоопланктоном фитопланктона и детрита соответственно. Если $\omega = 0$, то это означает, что $p_2 = 0$, $p_1 \neq 0$, то есть зоопланктон не питается детритом, а источником пищи для него является только фитопланктон.

Рассмотрим кратко структуру математической подмодели, которая способна порождать некоторые фундаментальные правила пищевого поведения, общие для разных организмов. Предполагается, что такая подмодель состоит из трех осцилляторов и имеет единственный пищевой сенсор. Все осцилляторы в любой момент времени находятся в активном состоянии. Активирующий осциллятор оказывает влияние на два других осциллятора, которые определяют тенденции к изменению коэффициента ω в тот или иной момент времени. В результате функционирования этих осцилляторов на выходе получаем активирующую (*F*), левую (*L*) и правую (*R*) тенденции соответственно. Левая тенденция связана с уменьшением значения коэффициента ω в данный момент времени, а правая, наоборот, с его увеличением. Все тенденции на каждом шаге по времени τ меняются в соответствии со следующими одномерными логистическими отображениями:

$$F_{t+\tau} = \lambda_t^F F_t(1-F_t),\ L_{t+\tau} = \lambda_t^L L_t(1-L_t),\ R_{t+\tau} = \lambda_t^R R_t(1-R_t), \quad (2)$$

где $0 < F_t, L_t, R_t < 1; 0 < F_{t+\tau}, L_{t+\tau}, R_{t+\tau} < 1; 0 < \lambda_t^F, \lambda_t^L, \lambda_t^R < 4.$ В качестве τ можно выбрать, например, шаг интегрирования по времени. Предполагается, что на значения параметров $\lambda_t^F, \lambda_t^L, \lambda_t^R$ оказывает влияние внутренний и внешний шум. Изменения значений параметров $\lambda_t^F, \lambda_t^L, \lambda_t^R$ в определенный момент времени рассчитываются по следующим формулам:

$$\lambda_t^F = \mu^* + \sigma^* \xi_t^F,\ \lambda_t^L = \mu^* + \sigma^* \xi_t^L + F_t - R_t - I_t,\ \lambda_t^R = \mu^* + \sigma^* \xi_t^R + F_t - L_t - I_t, \quad (3)$$

где μ^* – среднее значение параметра; $\xi_t^F, \xi_t^L, \xi_t^R$ – случайная величина, распределенная по нормальному закону и изменяющаяся в пределах от –1,0 до +1,0; σ^* – максимальное значение внутреннего шума. При расчете параметров λ_t^L и λ_t^R учитывается, что выходной сигнал от пищевого сенсора I_t одинаков для обоих параметров и задается не в абсолютных, а в относительных единицах интенсивности внешней стимуляции. Таким образом, учитывается, какова была пищевая стимуляция на предыдущем шаге по времени и стимуляция в данный момент времени:

$$I_t = (S_t - S_{t-\tau})/S_{t-\tau}. \quad (4)$$

В качестве величин $S_{t-\tau}$ и S_t могут выступать концентрации детрита, значения которых известны в процессе численного интегрирования соответствующих систем уравнений.

После того как вычислены значения тенденций L_t и R_t, можно оценить абсолютную разность этих величин. Именно эта разность и будет задавать изменение $\Delta\omega_t$ коэффициента предпочтения детрита зоопланктоном на данном шаге по времени. Если $L_t > R_t$, то значение коэффициента ω на следующем шаге по времени будет уменьшаться на величину $\Delta\omega_t = |L_t - R_t|$: $\omega_{t+\tau} = \omega_t - \Delta\omega_t$. Если же $L_t < R_t$, то значение коэффициента ω на следующем шаге по времени будет увеличиваться на величину $\Delta\omega_t = |L_t - R_t|$: $\omega_{t+\tau} = \omega_t + \Delta\omega_t$. При вычислениях необходимо учесть, что значения параметра ω ограничены. Таким образом, если $\omega_t - \Delta\omega_t < 0$, то полагаем, что $\omega_{t+\tau} = 0$. Если же $\omega_t + \Delta\omega_t > 2$, то полагаем, что $\omega_{t+\tau} = 2$, поскольку для большинства модельных исследований используют значения $\omega \in [0;2]$. В природных экосистемах значение параметра ω, по всей видимости, близко к 0,5.

Литература

Подгорный К.А. Исследование свойств пространственно однородной математической модели четырехкомпонентной планктонной системы // Математическая биология и биоинформатика, 2012, т. 7, №1, стр. 299–321.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ВИСЛИНСКОГО ЗАЛИВА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Подгорный К.А.[1], Дмитриева О.А.[2]

[1] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок, Россия*
kapborok@mail.ru
[2] *ФГУП "Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии"*
phytob@yandex.ru

Аннотация: Рассматриваются общие статистические особенности всех имеющихся для Вислинского залива исходных данных многолетних мониторинговых наблюдений. Дается краткая характеристика структуры и наиболее важных свойств разрабатываемой имитационной модели экосистемы Вислинского залива Балтийского моря.

К настоящему времени для Вислинского залива (ВЗ) Балтийского моря имеется только зарубежный опыт разработки и применения пространственно неоднородной имитационной математической модели для оценки качества водной среды (Delft 3D WAQ, 2005; Witek et al, 2010). Отечественных работающих модельных разработок для ВЗ, способных служить инструментом при решении первостепенных экологических задач, на сегодняшний день нет. Всесторонняя проверка работоспособности модели Delft 3D WAQ, выполненная в работе (Witek et al, 2010) для периода 1998–2000 гг., выявила ряд существенных недостатков этой модели. Они связаны, прежде всего, с недостаточно адекватным выбором ее структуры и очень упрощенным описанием многих механизмов процессов трансформации биогенных элементов. Конечная цель данной работы состоит в том, чтобы разработать принципиально иной, отличный от имеющейся модели Delft 3D WAQ, вариант структуры пространственно неоднородной имитационной математической модели для исследования процессов биотрансформации форм углерода, азота, фосфора, кремния и динамики растворенного кислорода в водах ВЗ и в деятельном слое донных отложений.

На первом этапе построения модели нами проводился всесторонний системный анализ имеющихся данных многолетних мониторинговых наблюдений. В частности, для проведения статистического анализа возможных взаимосвязей между гидробиологическими, гидрохимическими и структурными показателями фитопланктона Вислинского залива использовался нелинейный регрессионный анализ.

Несмотря на значительный объем данных наблюдений экологического состояния ВЗ, которые привлекаются нами для разработки общей структуры биохимического блока модели и выполнения в дальнейшем модельных расчетов, необходимо принимать во внимание следующее, общие особенности всех имеющихся для ВЗ исходных данных:

— существует достаточно высокий – в среднем 10–30 % (а в ряде случаев и до 60–80 %) – статистический разброс данных относительно их средних значений (Witek et al, 2010);
— проведение нелинейного регрессионного анализа показало, что между различными гидрохимическими и гидробиологическими компонентами водной экосистемы ВЗ имеет место высокая временная изменчивость (как внутри-, так и межгодовая);
— для разных систематических групп фитопланктона регуляторами их развития могут быть разные факторы. Это могут быть и разные гидрологические параметры, и разные формы биогенных элементов, и разные соотношения форм биогенных элементов в водной среде. Сами эти факторы могут проявлять свою значимость в разные периоды времени в течение вегетационного периода. Поэтому выделить «ведущий» фактор или небольшую,

постоянно действующую группу факторов не представляется возможным;
— ряд важных для построения модели параметров и данных либо отсутствует совсем, либо получен в результате эпизодических наблюдений;
— некоторые данные получены с нарушением принципа синхронности проведения наблюдений (особенно это относится к данным по рекам) (Witek et al, 2010);
— ряд данных необходимо привлекать из литературных источников;
— из-за имеющихся пропусков в данных (как по времени, так и по пространству) необходимо проводить соответствующие процедуры интерполяции и/или экстраполяции для того, чтобы получить соответствующие значения данных в нужной точке пространства на необходимый момент времени;
— существует ряд показателей, которые могут быть получены не в результате их прямых измерений, а путем пересчета (с той или иной погрешностью) из других, но измеренных непосредственно в водной среде величин.

Поскольку в исходных данных имеет место существенный их статистический разброс и высокая степень неопределенности, то применение процедур статистического моделирования является важным свойством разрабатываемой модели. Это позволит создавать временные стохастические ансамбли входных данных и учитывать тем самым наблюдающуюся их изменчивость.

Модель включает в себя несколько основных блоков: гидродинамический, гидротермический, гидрооптический и биохимический. В биохимическом блоке рассматриваются 45 переменных состояния водной экосистемы ВЗ. Из них 35 переменных относятся к водной среде и 10 – к донным отложениям. Предусмотрен расчет скоростей изменения концентраций биогенных веществ за счет процессов седиментации и ресуспензии донных отложений. Биомассы гетеротрофных бактерий выражаются в единицах углерода, азота, фосфора и кремния. Фитопланктон разделен на три основные систематические группы: диатомовые, синезеленые и зеленые водоросли. Биомассы диатомовых водорослей выражаются в модели в единицах азота, фосфора и кремния, а биомассы синезеленых и зеленых водорослей – в единицах азота и фосфора. Биомассы простейших организмов выражаются в модели в единицах азота, фосфора и кремния. Зоопланктон по типу питания разделен на две основные группы: растительноядный (мирный) и хищный. Соответственно этому биомассы мирного зоопланктона выражаются в модели в единицах азота, фосфора и кремния, а хищного – в единицах азота и фосфора. Биомассы макрофитов вычисляются в единицах азота и фосфора. С помощью биохимического блока воспроизводится совместная биотрансформация форм C, N, P и Si, которые поступают в акваторию ВЗ со сточными водами и стоком рек, в результате водообмена с Гданьским заливом Балтийского моря, процессов седиментации и ресуспензии донных отложений, а также в результате взаимодействия переменных в меняющихся условиях при совместном воздействии природных и антропогенных факторов. Предложенный в модели химико-кинетический аппарат позволяет изучать сложные биохимические, химические и физико-химические процессы и осуществлять математическое моделирование биотрансформации биогенных веществ.

Одно из наиболее важных свойств разрабатываемой модели состоит в том, что она позволяет предусмотреть возможность применения алгоритма, согласно которому коэффициенты предпочтения гидробионтами тех или иных источников пищи будут непрерывно изменяться в процессе расчета в соответствии с изменениями концентраций тех или иных взаимозаменяемых веществ. Таким образом, вся модель приобретает новое качество и становится адаптивной моделью.

Литература

Delft 3D WAQ, v. 2.02: detailed description of processes. Technical reference manual. – Delft, the Netherlands: Delft Hydraulics, 2005. – 386 p.

Witek Z., Zalewski M., Wielgat-Rychert M. Nutrient stocks and fluxes in the Vistula lagoon at the end of the twentieth century. – Slupsk–Gdynia, 2010. – 186 p.

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА СИНЭРГЕТИКИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ

Пузаченко Ю.Г.

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова. Москва, Россия
jpuzak@mail.ru

Аннотация: Рассматриваются возможности выделения параметров порядка для сложных систем, данных в наблюдениях.

В соответствие с представлениями синэргетики в любой сложной системе существует ограниченное число параметров порядка, которые определяют значения всех переменных. В свою очередь параметры порядка подчиняются управляющим параметрам, которые являются фактически средой системы. Параметры порядка можно ассоциировать с относительно независимыми частями системы, динамика которых определяется собственными механизмами. В работах Г. Хакена в большинстве случаев параметры порядка определяются, исходя из физических соображений, и исследуется поведение соответствующей математической модели. В его работах только при исследовании электрических полей мозга, выделение параметров порядка и исследование функционирования системы строится на основе статистического анализа множества переменных, полученных в эксперименте. Эколог и географ чаще всего сталкивается именно с этой задачей: имеется множество измеренных переменных и требуется на их основе получить представление о функционировании системы. В отличие от решения задачи в первой постановке этот подход можно определить как обратную задачу синергетики: идентификация параметров порядка по результатам измерений множества переменных, связываемых с некоторой естественной системой. Для ее решения Г. Хакен использовал аналог метода главных компонент. В докладе демонстрируется применение его к идентификации параметров порядка глобальной климатической системы на основе материалов проекта CRU TS 3.1 за период 1900 по 2009 год. Показано, что выделяемые параметры получают естественную физическую трактовку. Демонстрируется построение пространственно-временной статистической модели варьирования переменных и выделение временных интервалов с изменениями управляющих параметров, проявления нелинейных составляющих процессов. Оценивается соотношение между региональными и глобальными параметрами порядка.

В качестве примера покажем некоторые результаты анализа пространственно-временной динамики температуры поверхности суши за каждый месяц с 1900 по 2009 г. Метод главных компонент по условию дает отображение переменных в линейном пространстве, которое отображает идеальное равновесное или стационарное состояние системы. Нелинейные отношения и нарушения нормальности распределений определяют параметры порядка с малыми весами. Первые параметры порядка определяют линейные отношения. В данном случае при размерности 200 в среднем переменные отображаются в пространстве с коэффициентом детерминации в среднем 0.99970415, максимум 0.999902, минимум 0.999025. Минимуму соответствует средняя стандартная ошибка отображения переменной 0.5389oC (минимум -3,377, максимум 4,081), максимуму 0,4573 (минимум -2,949, максимум 5,299). Хотя детерминацию можно считать практически полной, однако в ее сезонном и многолетнем изменении проявляются четкие закономерности. В сезонном ходе система описывается наиболее однозначно в марте и ноябре система описывается наиболее однозначно (рисунок 1).

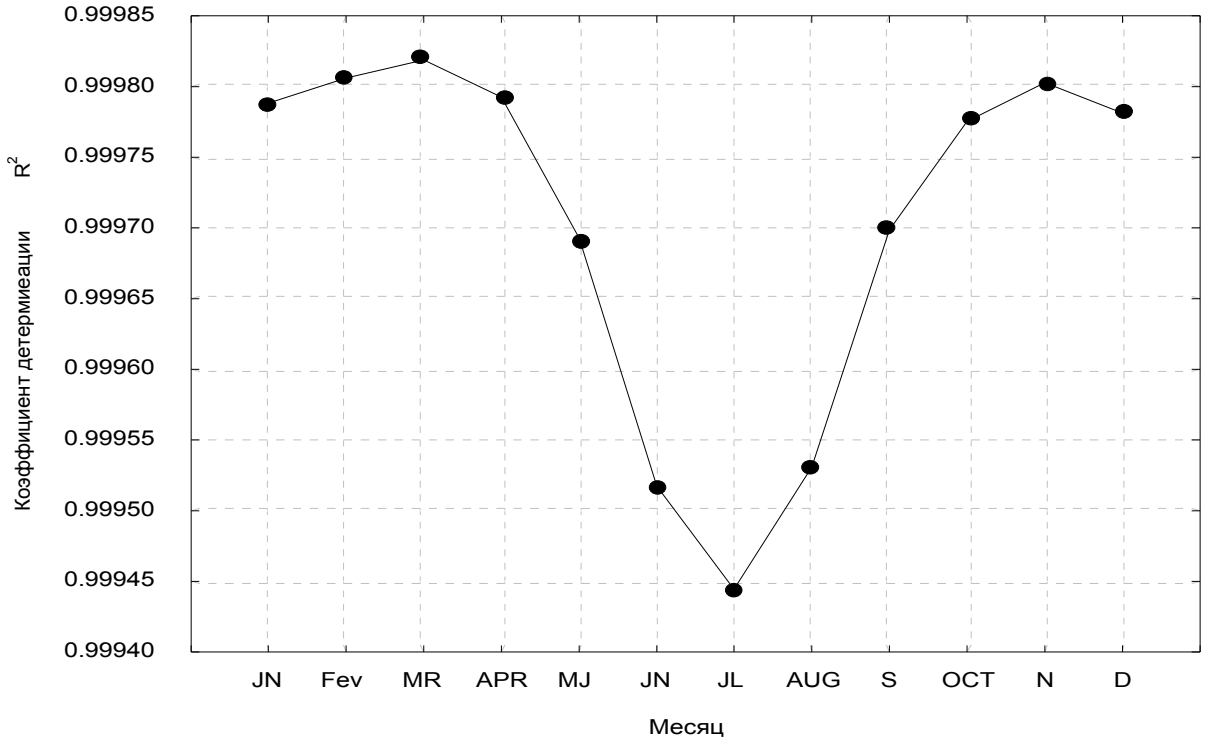


Рисунок - 1 Сезонное изменение коэффициента детерминации.

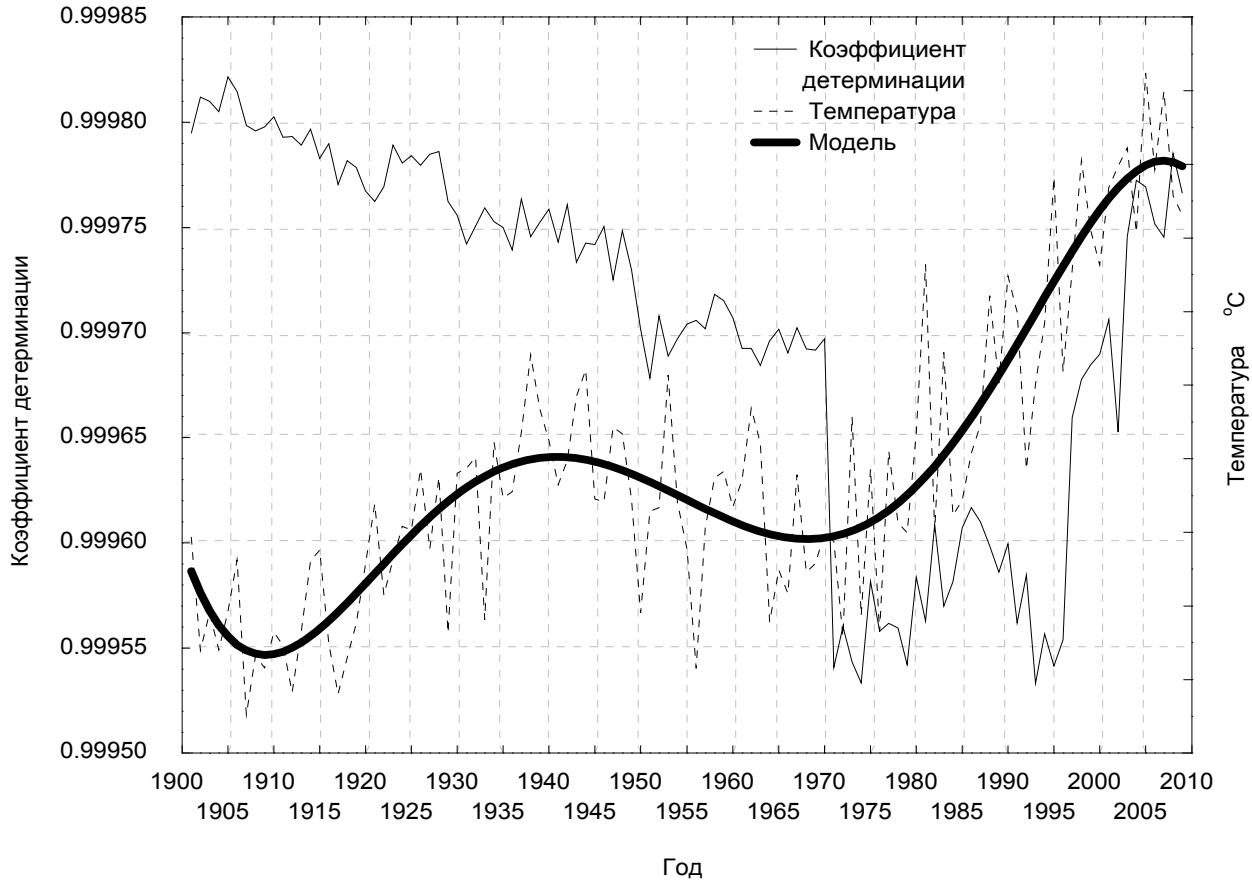


Рис. 2 Вековая динамика коэффициента детерминации и температуры.

Еще более показательно изменение среднего значения коэффициента детерминации за год. Рисунок 2 демонстрирует постепенное снижение стационарности системы с начала века с резким падением в 1970 г с последующим увеличением стационарности с 1996 г.

Применяя метод «осыпи», определяем, что все пространственное варьирование температуры можно описать четырьмя параметрами порядка. При этом описывается 98,84% общего варьирования. После ротации получаем, что первый параметр порядка (54% варьирования) индицирует зимние температуры, второй (43%) - летние, третий (всего 0.4%) - весенние, а четвертый (2%) - осенние. Поученные параметры порядка отражают сезонные составляющие атмосферной циркуляции. Положительные области параметра выделяют территории со в среднем положительной температурой и наоборот. Соответственно, можно полагать, что воздушные массы переносятся из теплых областей в холодные. Зимой широтная структура параметра резко дисимметрична (рис. 3), летом – практически симметрична. Для того, чтобы потепление произошло в северном полушарии в зимние месяцы, достаточно, например, увеличить подачу энергии в южное.

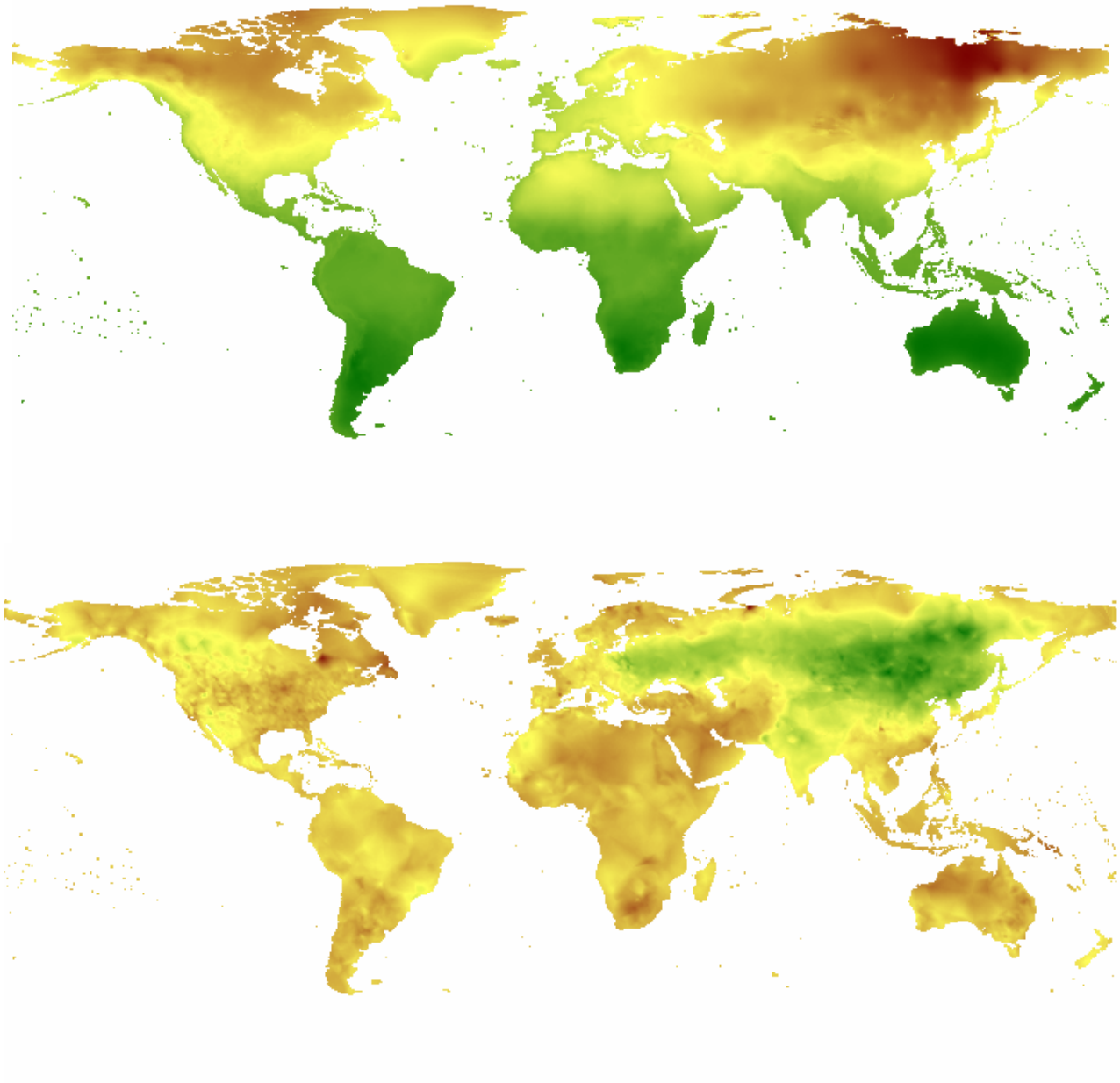


Рисунок 3 - Первые два параметра порядка пространственно-временного варьирования температуры за 1991-2009 г. (верх – первый параметр, низ –второй параметр)

Внешний управляющий параметр при его изменении должен приводить к изменению параметров порядка. Можно полагать, что скачкообразные изменения произошли в 1971 и 1996 г. Для того чтобы оценить характер перестройки системы можно рассчитать параметры порядка для интервалов 1901-1970, 1971-1996 и 1997-2009 годы. Разности соответствующих интервальных параметров отразят характерные черты перестройки системы. В качестве примера эта перестройка показана для первого параметра (рис. 4).

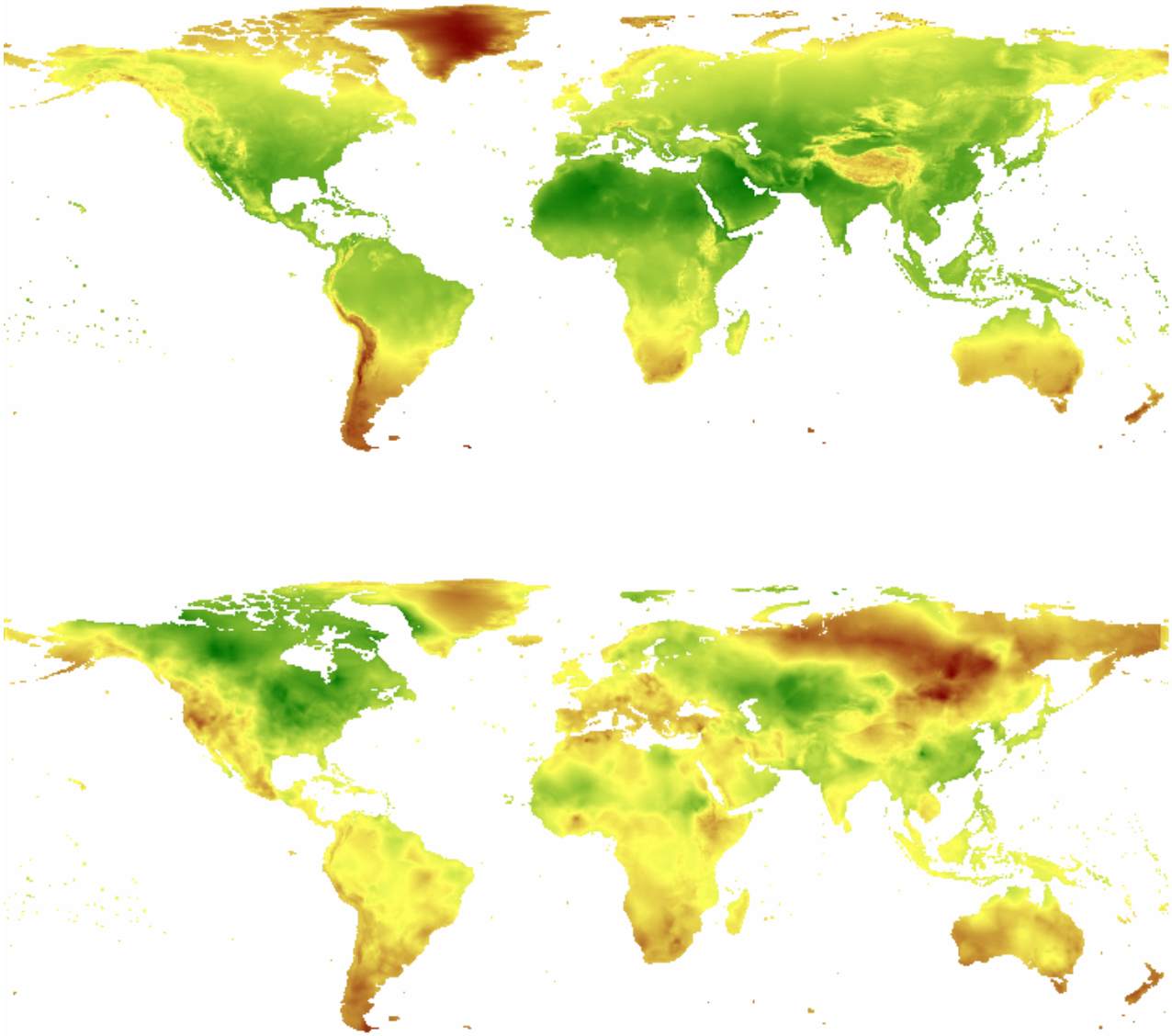


Рисунок - 4 Приращение параметра первого порядка (зима). (Вверху: между интервалами за 1901-1971 и за 1971-1996 годы. Внизу: за 1971-1996 и за 1997-2009)

Характерной чертой перестройки параметров порядка является смещение от одного периода к другому положительного приращения с Азиатского континента, на Северо-Американский. Подобные территориальные смещения положительных приращений характерны и для других параметров. Так как положительным значениям параметров в среднем соответствуют области с более высокими температурами, а низким – отрицательные, то, соответственно, положительные приращения индицируют относительное повышение температуры, определяемой соответствующим параметром. Приведенный пример анализа демонстрирует факт территориальных перестроек параметров порядка, но не

вскрывает их причины, то есть управляющего параметра, который может быть и автохтонным. В докладе рассматриваются процессы преобразования параметров порядка для других климатических переменных. Обращается внимание на необходимость разработки непараметрических методов оценки параметров порядка.

О ТЕОРИИ СИСТЕМ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ПАРНЫМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ

Пых Ю.А.

ФГБУН Центр междисциплинарных исследований по проблемам окружающей среды РАН, Санкт-Петербург, Россия
inenco@mail.neva.ru

1. О системах с парными взаимодействиями.

В недавней статье: «Переоткрывая силу парных взаимодействий» (Bialek, Ranganathan, 2007) авторы подчеркивают, что анализ многих объектов рассматриваемых в физике, химии, биологии и других естественных науках может быть проведен на основе исследования взаимодействий, составляющих эти системы, пар элементов. Приведем примеры нескольких, наиболее известных моделей основанных на идее *парных взаимодействий*: **Закон тяготения Ньютона.** В теоретической механике большинство взаимодействий являются *парными*. Таким образом, например, представлен закон всемирного тяготения открытый И.Ньютоном в **1684** году; **Кинетическое уравнение Больцмана (1872 г.)**. В приближении гипотезы парных столкновений оно описывает изменение одночастичной функции распределения молекул газа по скоростям и по координатам; **Уравнения Лотки-Вольтерра.** В **1920** году А.Лотка при описании кинетики химических реакций, а затем в **1926** году В.Вольтерра для моделирования динамики численности взаимодействующих групп, биологического сообщества использовали гипотезу линейных *парных взаимодействий*, что привело к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с квадратичными нелинейностями; **Модель Изинга.** В **1925** году Е.Изингом была предложена модель ферромагнетизма основанная на гипотезе *парных взаимодействий* между спинами соседних атомов; **Уравнения Фишера.** В **1930** году Р.Фишер, развивая математическую теорию эволюции генетической структуры популяций, предложил, основанную на гипотезе линейных *парных взаимодействий*, систему уравнений динамики этой структуры для панмиктичных однолокусных популяций с постоянно действующим отбором; **Уравнения эволюции биологических макромолекул.** В **1971** году М.Эйген использовал принцип *парных взаимодействий* при построении модели добиологической эволюции, объясняющей возникновение упорядоченных структур из неупорядоченных; **Эволюционные игры.** В **1978** году П.Тэйлор и Л.Джонкер используя принцип *парных взаимодействий* построили систему уравнений определяющую динамику взаимодействующих популяций в зависимости от стратегий выбираемых особями; **Нейронные сети.** В **1982** году Д.Хопфилд предложил модель нейронной сети основанной на *парных взаимодействиях* между нейронами; **Биологические сети.** В **2006** году Е.Шнейдман с соавторами показали, что для описания функционирования популяции клеток сетчатки глаза у позвоночных достаточно учета *парных взаимодействий*.

Из приведенного краткого обзора очевидно, что парные взаимодействия имеют достаточно широкое распространение. Вместе с тем, практически все приведенные примеры основаны на рассмотрении линейных парных взаимодействий.

2. Нелинейные парные взаимодействия.

Предметом исследования является система из n различных типов взаимодействующих объектов с численностями: $x_i(t)$, $i = 1,\ldots,n$, $\sum_{i=1}^{n} x_i(t) = N(t)$. В данной работе мы рассмотрим обобщение уравнений Фишера (репликаторных уравнений) с учетом нелинейности парных взаимодействий. В работе (Пых, 2011) предложены две гипотезы о структуре и типах нелинейных взаимодействий между объектами. Принятие этих

гипотез приводит к следующей системе дифференциальных уравнений для относительных численностей взаимодействующих объектов $p_i(t) = x_i(t)/N(t)$:

$$\dot{p}_i = h(p) f_i(p_i)\left(\sum_{j=1}^{n} w_{ij} f_j(p_j) - \theta^{-1}(p) \sum_{j,k=1}^{n} w_{jk} f_j(p_j) f_k(p_k) \right) \quad i = 1,...,n \qquad (1)$$

Здесь матрица $W = (w_{ij})$ определяет структуру взаимодействий, а нелинейные функции отклика $f_i(p_i)$ тип взаимодействий. Исследование уравнений (1) , в частности, показывает, что при определенных ограничениях на матрицу W, у системы существует возрастающая на регулярных траекториях функция Ляпунова энтропийного типа:

$$H(p) = \sum_{i=1}^{n} \int_{\hat{p}_i}^{p_i} \frac{\hat{f}_i dx}{f_i(x)} \qquad (2)$$

Эта функция не только позволяет провести полный качественный анализ полученной системы, но и дает возможность получить практически все существующие энтропийные характеристики и меры расстояния между траекториями системы (вероятностными распределениями). Основные результаты исследований системы (1) и соответствующие ссылки приведены в работах (Пых, 2010, 2011). Так, например, показано, что энтропия Больцмана-Шеннона получается из (2) при логарифмической функции отклика $f_i(p_i) = (1 - \ln p_i)^{-1}$. Установлено соотношение определяющее производство энтропии в системе. Подчеркнем, что полученная энтропийная характеристика (2) позволяет существенно расширить применение принципа Джейнса о максимуме информационной энтропии ко всем системам с нелинейными парными взаимодействиями, включая экологические.

3. Выводы

Очевидно, что при решении прикладных задач точное определение элементов матрицы взаимодействий и вида нелинейных функций отклика в каждом конкретном случае является сложной, а иногда и нерешаемой задачей. Вместе с тем, методы качественного анализа динамических систем позволяют существенно продвинуться на пути создания теории систем с нелинейными парными взаимодействиями. К этим методам, в первую очередь, следует отнести результаты современных исследований по энтропийному анализу, информационной геометрии и нелинейному регрессионному анализу. Подчеркнем, что широкий спектр приложений системы (1) определяет необходимость разработки такой теории. Отметим также, что уже полученные в настоящее время результаты, дают возможность решить «обратную» задачу, то есть определить на основе известной энтропийной характеристики изучаемого процесса, функции отклика системы и структуру матрицы взаимодействий. Решение такой задачи, в свою очередь, позволяет поставить в соответствие любой известной энтропийной характеристике некоторое множество систем уравнений типа (1), что представляет значительный прикладной интерес.

Литература

Пых Ю.А. Термодинамические характеристики репликаторных систем с нелинейными парными взаимодействиями //Тр.ИСА РАН.-2010.-Т.54.-С.33-48.

Пых Ю.А. Энтропийные характеристики макросистем с нелинейными парными взаимодействиями // ДАН. -2011. -Т.440.- №4. -С.453-455.

Bialek W, Ranganathan R. Rediscovering the power of pairwise interactions. arXiv: 0712.4397v1[q-bio.QM]. -2007.

МОДЕЛИ КЛАССИФИКАЦИЙ ПОЧВ

В.А. Рожков

Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, Москва
rva39@mail.ru

Классификация как информационная система мыслимого многообразия почв, может также выполнять функции модели такого многообразия, если используется два взаимно дополняющих друг друга аспекта – таксономия и мерономия (рис. 1).

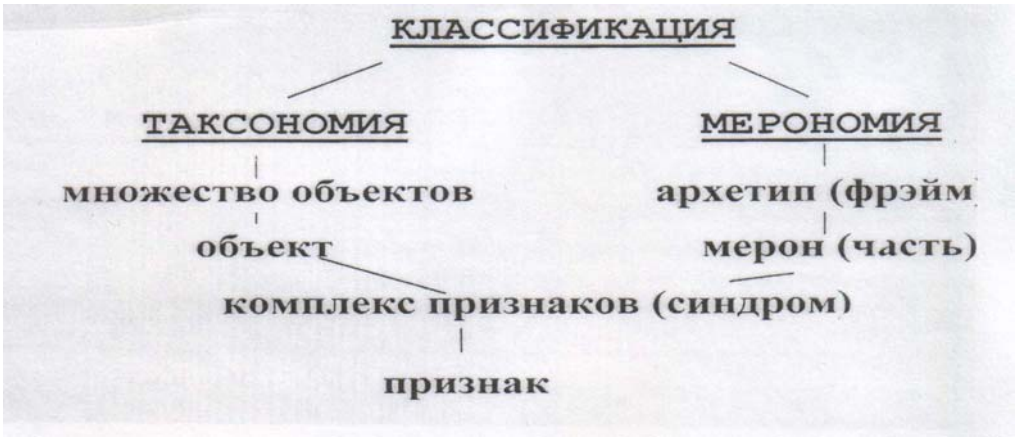


Рисунок 1 - Двойственность понятия классификации.

Таксономия – исследует структуру таксонов, связанных родовидовыми отношениями; мерономия – структура частей и/или признаков, связанных между собою ассоциативными отношениями. Архетипу в мерономии соответствует обобщенный образ, состоящий из характерных частей - меронов, имеющих вполне определенное описание совокупностью показателей, и обладающих свойством целостности. Каждому архетипу в мерономии соответствует свой таксон в таксономии. В конечном счете, объекты таксономии и мерономии представляются совокупностями признаков или отдельными признаками. Выбор признаков определяет целевую ориентацию классификации.

Примером иерархической модели *интенсиональной (сущностной, естественной)* классификации служит факторная классификация Е.Н. Ивановой и Н.Н. Розова (Рожков, 2012). На фрагменте этой классификации (рисунок 2) она охватывает все возможное множество почв, включая еще неизвестные, и исчерпывающим образом раскрывает содержательный смысл классификации исследуемого объекта, включая ее прогностические возможности.

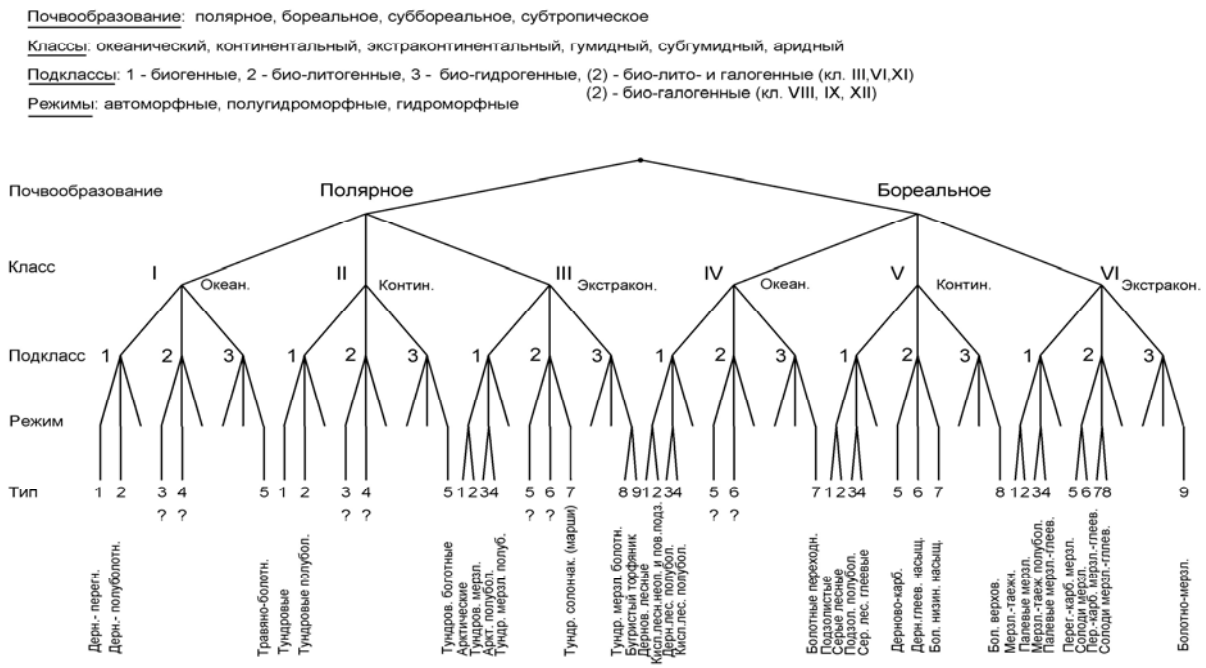


Рисунок 2 - Фрагмент факторной классификации Е.И. Ивановой и Н.Н. Розова.

К моделям таксономических (*экстенсиональных)* относятся численные классификации, являющихся способом организации и анализа эмпирических данных. В принципе к таковым относятся и все известные конструкции, названные классификациями почв, но выполняющими лишь частичное упорядочение их списков (рисунок 3).

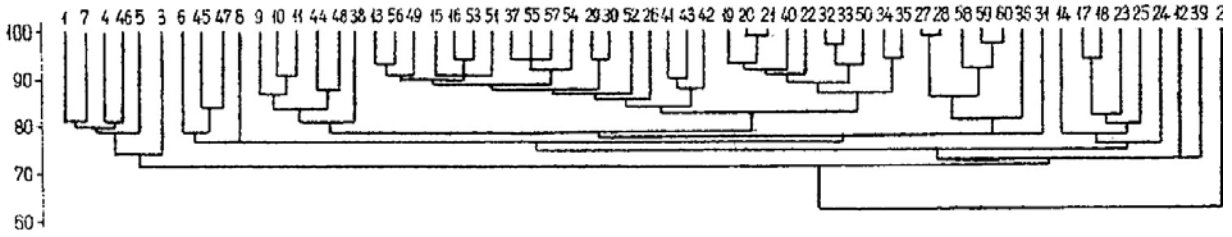


Рисунок 3 - Дендрограмма почв в пространстве признаков.

Список почв на дендрограмме:
1-подзолистые, 2-болотно-пожзолистые, 3-дерново-карбонатные, 4-серые лесные, 5-бурые лесные, 6-то же глеевые, 7-подзолисто-бурые лесные, 8-то же глеевые, 9-луговые подбелы, 10-лугово-черноземные (амурских прерий), 11-луговые темные, 12-чернозёмы, 13-лугово-черноземные, 14-каштановые, 15-лугово-каштановые, 16-луговые, 17-бурые полупустынные, 18-лугово-бурые, 19-серо-бурые, 20-такыровидные, 21-такыры, 22-песчаные пустынные, 23-серозёмы, 24-луговые пустынь и полупустынь, 25-серокоричнивые, 26-коричневые, 27-желтозёмы, 28-краснозёмы 29-торфяные болотные верховые, 30-то же низинные, 31-солоди, 32-солонцы автоморфные, 33-то же полугидроморфные, 34-солончаки автоморфные, 35-то же гидроморфные, 36-аллювиальные дерновые кислые, 37-то же насыщенные, 38-дерново-глеевые, 39-серые лесные глеевые, 40-лугово-пустынные, 41-лугово-серозёмные, 42-лугово-серокоричневые, 43-лугово-коричневые, 44-лугово лесные серые, 45-желтозёмы глеевые, 46-подзолисто-желтозёмные, 47-то же глеевые, 48-лугово-болотные, 49-болотные пустынь и полупустынь, 50-солонцы гидроморфные,

51-аллювиальные дерновые насыщенные, 52-аллювиальные дерновые опустынивающиеся карбонатные, 3-аллювиальные луговые насыщенные, 54-то же карбонатные, 55-аллювиальные лугово-болотные, 56-аллювиальные болотные, иловато0перегнойно глеевые, 57-аллювиальные болотные иловато-торфяные, 58-горно-луговые, 59-горно-луговые чернозёмовидные, 60-горно-луговые степные.

Для таксономической классификации применимы любые математические, логические и информационные методы анализа данных, но мерономический анализ имеет свою специфику. На рисунке 4 показана структура задач таксономических классификаций.

Рисунок 4 - Структура задач численной классификации почв
(СИП – система информативных признаков).

ПОПУЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЕЛОПЛЕЧЕГО ОРЛАНА НА САХАЛИНЕ И НИЖНЕМ АМУРЕ

Романов М. С. [1], Мастеров В. Б.[2]

[1]*Институт математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия*
michael_romanov@inbox.ru
[2]*Московский государственный университет, Москва, Россия*
haliaeetus@yandex.ru

Аннотация: Моделирование динамики популяций белоплечего орлана на Сахалине и нижнем Амуре с помощью матричной и стохастической моделей указывает на их вероятное сокращение (λ = 0.984, 0.990), а также на низкую выживаемость особей в течение первого года жизни (0.157, 0.229).

1. Введение

Матричная популяционная модель, построенная ранее для Сахалина по данным в 2004-2007 гг. (Романов, Мастеров, 2008) была существенно развита и дополнена. 1. Получены новые данные о продуктивности и территориально-возрастном составе популяции за 5 сезонов (2008-2012). 2. Для оценки выживаемости взрослых особей использована модель старения Вейбулла и аллометрические уравнения, связывающие выживаемость и скорость старения с массой тела. 3. Расширен географический охват модели за счет включения в нее нижнего Приамурья. Для каждого из регионов была построена отдельная модель, что дало возможность сравнить сахалинскую и амурскую популяции.

2. Методы и материалы

Основным инструментом моделирования является матричная модель Лесли (Caswell, 2000). Модельная популяция состоит из 7 возрастных классов: ювенильные особи (птенцы), 5 классов молодых особей возрастом 1, 2…5 лет, единый класс взрослых особей (Романов, Мастеров, 2008). Помимо детерминистской матричной модели, была построена также стохастическая модель, которая позволяет сымитировать популяционную динамику с элементами случайности. Для обеих популяций имеется по 9 значений продуктивности популяции, которые при моделировании перебираются случайным образом, что имитирует случайную последовательность лет с различными кормовыми, погодными и прочими условиями. Моделирование выполнялось в среде R (R Development Core Team, 2013).

3. Результаты

Данные о продуктивности и территориально-возрастной структуре популяции получены в ходе полевых работ в летний период каждого сезона исследований. Для оценки выживаемости взрослых особей была использована модель Вейбулла, представляющая смертность возрастных групп как сумму случайной смертности и смертности, связанной со старением. Коэффициенты уравнения определены для близкого вида — белоголового орлана (Ricklefs, 2000) и скорректированы с учетом разницы в массе тела между белоголовым и белоплечим орланом и разницы между выживаемостью популяций в неволе и в природе. В модели полученные значения зависимой от возраста выживаемости заменены единым значением, дающим эквивалентную численность взрослых особей на момент размножения (условно можно назвать ее средней выживаемостью). Для белоплечего орлана в природе она равна 0.04802. Выживаемость в течение первого года жизни определяли по соотношению ювенильных и молодых особей, исходя из предположения, что максимальная смертность наблюдается в течение первого года жизни.

Таблица 1 – Результаты моделирования

Параметры	Сахалин	Нижний Амур
Входные параметры		
Выживаемость взрослых	0.952	0.952
Выживаемость молодых	0.981	0.981
Продуктивность	0.217	0.232
Результаты моделирования		
Скорость роста популяции, λ	0.984	0.990
Выживаемость в течение первого года	0.149	0.169
Период сокращения вдвое	44 года	70 лет

Моделирование показало, что в обеих популяциях $\lambda < 1$, что означает сокращение численности. При данных темпах сокращения (табл. 1) сахалинская популяция сократится вдвое за 44 года, амурская — за 70 лет. Стохастическое моделирование показывает, что даже при благоприятной череде сезонов шансы на стабильность в течение 20 ближайших лет практически отсутствуют. В последнюю декаду в популяциях отмечается уменьшение доли молодых особей, что можно объяснить низкой выживаемостью в течение первого года жизни: согласно расчетам, на Сахалине она составляет 0.157, на Амуре — 0.229.

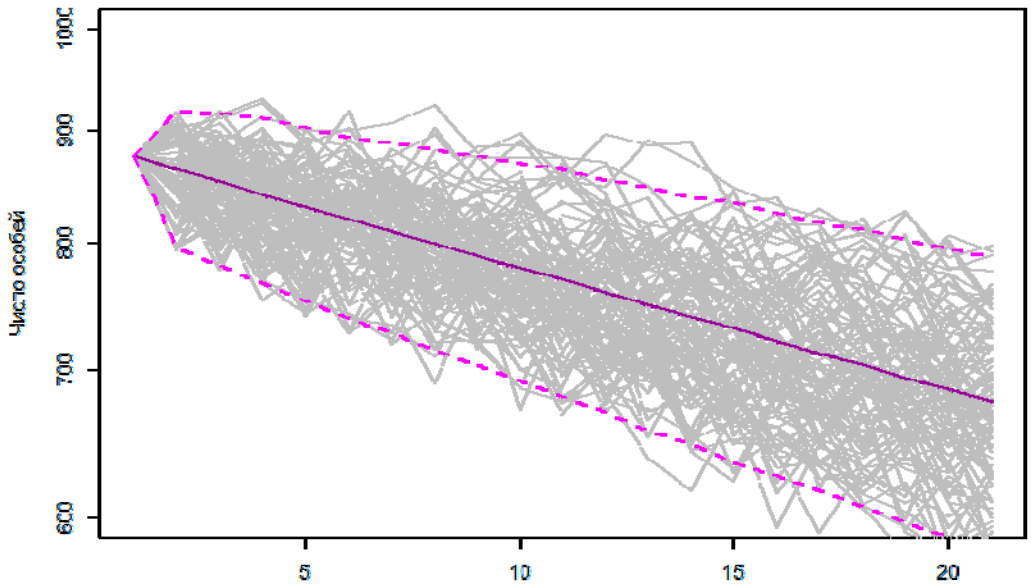


Рисунок 1 - Стохастическое моделирование динамики численности популяции на Сахалине. Показано 100 траекторий (из общего числа 10 000).Сплошная линия — среднее арифметическое, штриховой пунктир — интервал, охватывающий 95% траекторий

Литература

Романов М. С., Мастеров В. Б. Матричная модель популяции белоплечего орлана *Haliaeetus pelagicus* на Сахалине. Математическая биология и биоинформатика, 2008, том 3, №2, с.36-49.

Caswell, H. 2000. Matrix population models. 2-nd, revised ed. Sinauer, Sunderland, Massachusetts, USA. 710 pp.

R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2013. URL http://www.R-project.org. ISBN 3-900051-07-0.

Ricklefs, R. E. 2000. Intrinsic aging-related mortality in birds. Journal of Avian Biology 31: 103-111.

ПРОБЛЕМЫ ОПИСАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАЗЛОЖЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ В МОДЕЛЯХ КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА

Рыжова И.М.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
iryzhova@mail.ru

Аннотация: обсуждается неопределенность прогнозов отклика почв на глобальные изменения климата, обусловленная дискуссионностью вопроса о температурной чувствительности разложения органического вещества почв. На основе простой трехкомпонентной модели круговорота углерода проведена оценка неопределенности прогнозов в зависимости от выбора гипотезы о температурной чувствительности разных фракций органического вещества почв.

Почвы являются одним из наибольших резервуаров углерода в биосфере. Запас почвенного углерода в 2 раза больше чем в атмосфере и в 3 раза превышает его запас в растительном покрове. Даже небольшие изменения запасов почвенного углерода могут существенно повлиять на концентрацию атмосферного CO_2. По современным оценкам, глобальная эмиссия CO_2 из почвы составляет 98±12 Пг в год, с ежегодным увеличением на 0.1 Пг, связанным, как предполагают, с ростом температуры (Subke, Bahn, 2010). Прогнозы изменений климата в XXI веке, полученные на основе моделей, описывающих взаимодействия углеродного цикла и климата, характеризуются высокой неопределенностью (Friedlingstein et al.,2006; Smith et al., 2008). Наряду с другими источниками, существенный вклад в неопределенность климатических прогнозов вносит дискуссионный вопрос о температурной чувствительности органического вещества почв. В результате многочисленных исследований были получены противоречивые данные о температурной чувствительности разных фракций органического вещества почв. На их основе были сформулированы четыре взаимоисключающих гипотезы:

1.Разложение лабильного и устойчивого органического вещества одинаково чувствительно изменению температуры;

2. Разложение устойчивого органического вещества более чувствительно к изменению температуры, чем лабильного;

3.Разложение лабильного органического вещества более чувствительно к изменению температуры, чем устойчивого;

4. Скорость разложения устойчивого органического вещества не чувствительна к температуре в области 5-35^o С.

Возможные причины противоречивости результатов, в первую очередь, объясняются сложностью проблемы. Они обсуждаются в обзорах (Smith et al.,2008; von Lützow, Kogel-Knabner, 2009;). В соответствии с кинетической теорией, температурная чувствительность увеличивается с ростом устойчивости субстрата. Но в почве «наблюдаемая» температурная чувствительность может отличаться от теоретической из-за воздействия комплекса факторов окружающей среды (Davidsons, Janssens, 2006). В связи с этим трудно определить, какая из гипотез реализуется в почве в зависимости от сочетания разных условий. Выбор гипотезы при описании температурной чувствительности разложения органического вещества почв имеет большое значение при моделировании углеродного цикла, так как от этого зависит степень проявления обратной связи между климатическими изменениями и почвой.

Для того, чтобы оценить неопределенность прогнозов в зависимости от выбора гипотезы о температурной чувствительности, мы построили простую модель, в которой органическое вещество почвы представлено тремя компонентами: лабильным, медленным и пассивным. Инициализация модели проведена на основании результатов гранулодесиметрического фракционирования органического вещества черноземов Приволжской

лесостепи (Травникова и др.,2005). Для проверки модели использованы данные о запасах углерода в черноземах луговых степей Европейской территории России. Для описания зависимости скорости разложения от температуры выбрана широко известная функция Q10, так как она чаще других используется в глобальных моделях (Friedlingstein et al.,2006). С ростом температуры изменяется продуктивность растительного покрова и, следовательно, поступление органического вещества в почву. Прогнозы изменения чистой первичной продуктивности с увеличением температуры также характеризуются значительной неопределенностью (Голубятников, Денисенко,2009). Поэтому для оценки неопределенности прогнозов, обусловленной только выбором гипотезы о температурной чувствительности скорости разложения органического вещества почв, поступление углерода в почву с растительными остатками задано постоянным, соответствующим современной продуктивности луговых степей. По прогнозам согласно модели климата ИВМ РАН, глобальное потепление к концу 21 века составит от 2 до 4 градусов. Расчеты были проведены для сценария, по которому увеличение температуры к 2100 г. составит 2^oC. Они продемонстрировали, что даже при наиболее благоприятном сценарии прогнозы отклика почв на глобальное потепление существенно различаются в зависимости от выбора гипотезы о температурной чувствительности скорости разложения органического вещества. Потери запаса углерода черноземами луговых степей к 2100 г. составят 3.3% при выборе гипотезы о нечувствительности разложения устойчивого органического вещества к изменению температуры. Они увеличатся до 8.3% в случае выбора наиболее часто используемой в глобальных моделях гипотезы об одинаковой температурной чувствительности разложения всех компонентов органического вещества почвы при значении параметра $Q_{10}=2$. Потери достигают максимального значения в 13% при выборе согласующейся с кинетической теорией гипотезой о большей температурной чувствительности разложения устойчивых компонентов, чем лабильных.

Анализ современного состояния проблемы свидетельствует о том, что для уменьшения неопределенности прогнозов, связанных с проблемой описания температурной чувствительности органического вещества почв в моделях круговорота углерода экосистемного и глобального уровней, необходимы изменения в концептуальной основе современных моделей. Новые концептуальные модели должны в явном виде включать микробный пул, что позволит учесть адаптацию микроорганизмов к изменяющимся условиям, а также механизмы защиты органического вещества от разложения в результате взаимодействий с минеральными компонентами и физической защиты в составе микроагрегатов.

Литература

Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А. Влияние климатических изменений на растительный покров Европейской России //Изв. РАН. Сер. Геогр.-2009.-№2.-С.57-66.

Травникова Л.С., Рыжова И.М., Силева Т.М., Бурякова Ю.В. Исследование органического вещества черноземов Приволжской лесостепи методами физического фракционирования // Почвоведение. 2005.- №4.- С.430-437.

Davidson E.A., Janssens I.A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change// Nature. 2006.-v.440.-p. 165–173.

Friedlingstein P, Cox P, Betts R et al. Climate-carbon cycle feedback analysis:results from the (CMIP)-M-4 model intercomparison// Journal of Climate.-2006.-v. 19.-p. 3337–3353.

Smith P., Fang C., Dawson J.J.C., Moncreiff J.B. Impact of global warming on soil organic carbon// Advances in Agronomy. 2008.-v. 97.-p. 1–43.

Subke J., Bahn M. On the ‘temperature sensitivity’ of soil respiration: Can we use the immeasurable to predict the unknown?// Soil Biology & Biochemistry. 2010.-v. 42.-p. 1653-1656

von Lutzow M., Kogel-Knabner I. Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition – what do we know?// Biology and Fertility of Soils. 2009.-v. 46.-p. 1–15.

МОДЕЛЬ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР С УЧЕТОМ ИХ ЧЕРЕДОВАНИЯ В РАМКАХ ФЕРМЕРСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Пашаев А.Б. [1], Сабзиев Э.Н. [2], Эюбова С.М. [3]

[1]*Институт Кибернетики НАН, Баку, Азербайджан*
adalat.pashayev@gmail.com
[2]*Компания Kiber Ltd, Баку, Азербайджан*
elkhan@kiber.az
[3]*Институт Почваведения и Агрохимии НАН, Баку, Азербайджан*
svetlana@kiber.az

Аннотация: Исследована задача оптимального планирования выращивания сельскохозяйственных культур в рамках одного фермерского хозяйства с учетом их чередования. Построена математическая модель принятия решений с учетом расходов на выращивание культур, ожидаемой продуктивности, ожидаемых цен на продукцию, оптимального предшественника.

1. Введение

Рациональное размещение сельскохозяйственных культур во времени и пространстве позволяет оптимально использовать агроклиматические ресурсы региона, а также биологические особенности выращиваемой культуры.

Потенциал природных ресурсов территории размещения сельскохозяйственных угодий складывается из агрономических свойств почв, рельефа местности и климата.

Почва характеризуется многими свойствами, из которых наиболее важные это гранулометрический состав, мощность гумусового горизонта, реакция почвенной среды, содержание гумуса и питательных веществ. В основном именно эти свойства в сочетании с гидротермическим режимом территории обусловливают продуктивность почв и их пригодность для возделывания определенных культур.

Известно, что для получения высоких урожаев и увеличения плодородия почвы необходимо соблюдение определенных условий чередования культур (Воробьев, 1979; Кирюшин, 1996; Бельтюков Л.П. и др. 2001).

Таким образом, возникает задача об оптимальном планировании выращивания сельскохозяйственных культур в рамках фермерского хозяйства с учетом их чередования. Практика показывает, что прогнозы экономистов о тенденциях рынка на один - следующий год, часто бывает достаточным для принятия правильного решения.

В данной работе строится математическая модель оптимального планирования выращивания сельскохозяйственных культур в рамках фермерского хозяйства с учетом их чередования и в соответствии с рыночным прогнозом на следующий сезон.

2. Построение математической модели

Пронумеруем через $j = 1, 2, ..., m$ все сельскохозяйственные культуры, которые могут быть выращены в данном фермерском хозяйстве. Пронумеруем отдельные поля фермерского хозяйства, которые выделены для отдельных сельскохозяйственных культур через $i = 1, 2, ..., n$, где n - общее количество всех полей хозяйства. Площадь участка i обозначим через S_i.

Ставится задача выбора культуры выращивания во всех полях с учетом ожидаемых рыночных цен и лучших предшественников. Для каждого *i, j*, будем полагать $\delta_{ij} = 1$ если выращивание *j*-ого растения на *i*-том участке выгодно, а в противном случае $\delta_{ij} = 0$. Сформулируем основные соотношения и условия в соответствии с постановкой задачи.

A. Условие ограниченного рыночного сбыта. Обозначим через U_{ij} -урожайность j-ой культуры при выращивании на поле i. Пусть анализ рынка показывает, что не следует выращивать j-ю культуру больше заданного объема Z_j. Тогда должно выполняться равенство

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_{ij} S_i U_{ij} \le Z_j, \qquad j = 1, 2, ..., m. \tag{1}$$

B. Условие минимальности расходов. Пусть, для каждой культуры j процесс выращивания сопряжен с присущими ей затратами. Обозначим через R_{ij} все расходы на выращивание j-ой культуры на единичной площади поля i.

Тогда условие минимальности расходов запишется в виде

$$\sum_{j=1}^{m} \sum_{i \in \Lambda_j^{\xi}} \delta_{ij} S_i R_{ij} \to \min \qquad \text{или} \qquad \Re = \sum_{i=1}^{n} S_i \sum_{j \in \aleph_i^{\xi}} \delta_{ij} R_{ij} \to \min. \tag{2}$$

C. Условие максимальности прибыли по хозяйству. Закупочную цену j-ой культуры обозначим через $\wp_j$. Тогда доход по всему хозяйству определиться по формуле

$$\wp = \sum_{j=1}^{m} \wp^j = \sum_{j=1}^{m} \wp_j \sum_{i \in \Lambda_j^{\xi}} \delta_{ij} S_i U_{ij} \qquad \text{или} \qquad \wp = \sum_{i=1}^{n} S_i \sum_{j \in \aleph_i^{\xi}} \delta_{ij} \wp_j U_{ij}.$$

Следовательно, прибыль от реализации по выращенным культурам будет:

$$M = \wp - \Re \equiv \sum_{i=1}^{n} S_i \sum_{j \in \aleph_i^{\xi}} \delta_{ij} \wp_j U_{ij} - \sum_{i=1}^{n} S_i \sum_{j \in \aleph_i^{\xi}} \delta_{ij} R_j,$$

а условие получения максимальной прибыли запишется в виде

$$M = \wp - \Re \equiv \sum_{i=1}^{n} S_i \sum_{j \in \aleph_i^{\xi}} \delta_{ij} \left(\wp_j U_{ij} - R_j \right) \to \max. \tag{3}$$

Таким образом, задача оптимального планирования выращивания сельскохозяйственных культур в рамках одного фермерского хозяйства сводится к определению чисел δ_{ij}, при которых выполнялись бы условия (1), а функционалы (2) и (3), соответственно принимали минимальное и максимальное значения. Следует заметить, что с математической точки зрения, задача (1)-(3) является задачей линейного программирования и может быть решена, численными методами (Еремин и др. 1976).

Заключение

Во всех развитых странах фермеры получают поддержку (дотации, налоговые льготы и т.д.). Проведенные исследования показали, что фермерам в виде поддержки можно предлагать планирование (выбора) выращивания сельскохозяйственных культур с учетом множества факторов, в том числе чередования культур.

Литература

Бельтюков Л.П. и др. Влияние предшественников на урожай пшеницы. Земледелие. 2001, №6, С.43.

Воробьев С.А. Севообороты интенсивного земледелия, М., 1979. 368 С.

Еремин И.И., Астафьев Н.Н. “Введение в теорию линейного и выпуклого программирования”. –М.; «Наука», 1976, 192 С.

Кирюшин В.И. Экологические основы земледелия. М., «Колос», 1996, 366 С.

ОПИСАНИЕ ЗАМКНУТЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РАМКАХ ПОДХОДА ГИБКОГО МЕТАБОЛИЗМА

Салтыков М.Ю. [1], Барцев С.И.[2]

[1]*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*
saltykoff.mixail@yandex.ru
[2] *Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*
bartsev@yandex.ru

Аннотация: Подход гибкого метаболизма представляется наиболее перспективным в описании замкнутых экологических систем. Отличием данного подхода от традиционного представления об организмах как о химических автокатализаторах является учет способности организмов изменять пропорции потребляемых веществ. Преимуществом такого подхода является способность снять ряд парадоксов возникающих при описании экологических систем в рамках традиционных моделей.

В настоящее время в связи с усилением влияния человека на биосферу приобрела актуальность задача оценки устойчивости природных экосистем. Так как достоверную эмпирическую оценку устойчивости конкретной экосистемы можно получить только в эксперименте, приводящем к разрушению этой экосистемы, достижение заявленной цели исключительно экспериментальными методами не представляется возможным. Единственным способом оценки устойчивости экосистем является исследование их теоретических моделей, построенных с опорой на данные экспериментов. Однако традиционные модели экосистем не годятся для описания сложных и в особенности замкнутых экосистем. В частности в рамках таких моделей устойчивость описываемой экосистемы падает с увеличением числа видов (May, 1971), в то время как в природе более распространена противоположная зависимость (Ives, Carpenter, 2007). Кроме того, было показано, что в рамках традиционных моделей не возможно замыкание экосистемы более чем по одному элементу (Bartsev, 2004).

Одной из причин несоответствия зависимости «сложность-устойчивость» в традиционных моделях экосистем и в реальных экосистемах может являться используемая в моделях аналогия с химическими реакциями – каждый организм рассматривается как автокатализатор, потребляющий питательные вещества в строго заданной пропорции, что позволяет называть их моделями с жестким метаболизмом. Очевидно, что живой организм система более сложная, чем автокатализатор и может быть способна к потреблению питательных веществ в изменяющейся со временем пропорции. Было показано (Pelletier, 2000), что введение в модель простой незамкнутой экосистемы адаптации хищника к изменению распространенности жертв значительно повышает устойчивость модели по сравнению со случаем жесткого метаболизма. Потенциал подхода адаптивного или гибкого метаболизма в разрешении парадоксов традиционных моделей при описании замкнутых экосистем был показан в работах (Салтыков, Барцев, Ланкин, 2012) и (Saltykov, Bartsev, Lankin, 2012).

Первой целью данной работы было строгое доказательство увеличения устойчивости экосистемы с ростом числа описываемых видов в рамках моделей гибкого метаболизма. Устойчивость определялась как размер области устойчивых решений в пространстве параметров модели. Размер области устойчивых решений оценивался статистически с использованием свободного программного пакета Scilab. Второй целью работы являлось совершенствование использования подхода гибкого метаболизма для описания экосистем, замкнутых по нескольким биогенным элементам, начатого в работах (Bartsev, 2004) и (Saltykov, Bartsev, Lankin, 2012).

Литература

Ives A.R., Carpenter S.R., Stability and Diversity of ecosistems // Science. – 2007. – 317. – P.58-62.

May R.M. Stability in multi-species community models // Mathematical Biosciences. – 1971. – 12. – P. 59-79.

Pelletier J.D. Are large complex ecosystems more unstable? A theoretical reassessment with predator switching // Mathematical Biosciences. – 2000. – 163. – P. 91-96.

Bartsev S.I. Stoichiometric constraints and complete closure of long-term life support systems // Advances in Space Research. – 2004. – vol. 34 – pp. 1509-1516.

Салтыков М.Ю., Барцев С.И., Ланкин Ю.П. Зависимость устойчивости моделей замкнутых экосистем от числа видов // Журнал СФУ серия Биология. – 2011. - том 4. – номер 2. – стр. 197-208.

Saltykov M.Yu., Bartsev S.I., Lankin Yu.P., Stability of Closed Ecology Life Support Systems (CELSS) models as dependent upon the properties of methabolism of the described species // Advances in Space Research. – 2012. – vol. 49. – issue 2. – pp. 223-229.

ГИС ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЗА РАСТИТЕЛЬНЫМ ПОКРОВОМ В ЗОНЕ САЯНО-ШУШЕНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Самбуу А.Д.,[1] Аюнова О.Д. [1]

[1] *Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Со РАН, Кызыл, Россия*
sambuu@mail.ru

Аннотация: озеровидная часть Саяно-Шушенского водохранилища является одной из наиболее крупных водных акваторий в пределах Республики Тыва, подверженной деструктивному воздействию человека. Дестабилизирующее влияние крупных гидротехнических сооружений с подпорами воды более 15 метров изучено довольно хорошо для крупных рек (Волга, Кама, Днепр и др.) на расстоянии до 100 км вдоль по течению и полосе до 5–10 км вглубь обоих берегов реки. В то же время влияние на пойменные и долинные экосистемы высокоподпорных плотин, особенно для горных территорий изучено недостаточно. По истечении более 20 лет, после строительства ГЭС, стали визуально проявляться негативные процессы в экосистемах долины реки Енисей, появилась возможность оценить некоторые нарушения в растительном покрове.

Исследования проводились в Улуг-Хемской котловине Тувы, где расположена озеровидная часть верхнего бьефа Саяно-Шушенского водохранилища. С начала заполнения водохранилища (1979 г.) выделяется два периода: собственно наполнение (1979–1990 гг.) и, начиная с 1991 г., когда было отмечено максимальное заполнение чаши водоема до нормального подпорного уровня (НПУ) 540 м., по настоящее время – период эксплуатации. Водохранилище имеет сезонный характер регулирования.

Климат Тувы резко континентальный с коротким, но жарким летом, продолжительной и малоснежной зимой, с малым количеством осадков, длительными засухами. Абсолютная высота Улуг-Хемской котловины, входящей в состав Центрально-Тувинской котловины, колеблется от 550 до 700 м.

Целью работы является изучение изменения растительности травяных экосистем в зоне затопления Саяно-Шушенского водохранилища с использованием ГИС.

Выявление, оценка, мониторинг их состояния и рациональное использование ресурсов – важная научная и практическая задача. К сожалению, за последнее время научные исследования биоразнообразия данной территорий незначительны. Однако накопленных данных достаточно для обобщений и обоснования перспективных направлений дальнейшей работы. Информацию по трансформации растительного покрова содержат научные публикации, ведомственные материалы: землеустройства пастбищ и другие источники. Для целей мониторинга множество имеющейся и вновь поступающей атрибутивной и графической информации по состоянию растительного покрова можно эффективно анализировать с помощью компьютеров и специализированных программ, в частности по созданию географических информационных систем (ГИС). Нами разработана методика создания проектов региональных ГИС, основу которых составляют обзорные карты масштаба (1:100000 – 25000) цифровые карты растительности прибрежной зоны озеровидной части водохранилища. Полигональные покрытия цифровых карт связаны с базами данных, содержащими количественные показатели, характеризующие растительные сообщества, а также с текстовыми файлами и имиджами. Закономерности распределения этих показателей могут быть визуализированы на картах с использованием легенд, а также в диаграммах и графиках.

В результате исследований впервые получены региональные (в административных границах Республики Тыва) обобщенные крупномасштабные карты растительности, включенные в проекты информационных систем. Связанная с этой картой база данных содержит сведения о видовом составе, фитоценотическом разнообразии для обозначенных на ней полигонов, индексы принадлежности последних к единицам районирования и другие

показатели. Полная легенда этой карты содержит более 150 типов комплексов растительности, тогда как для показа зональной растительности и типов поясности или высших единиц геоботанического районирования достаточно 5–10 подразделений легенды, обозначенных индексами и цветом. Следовательно, карта решает не только задачу выявления типологического разнообразия комплексов растительности, но и отображения крупных макро- и мезоструктур растительного покрова. Для наглядности расчленения растительного покрова на структуры разного уровня в легенде выделены единицы геоботанического районирования. Внутри этих подразделений перечислены основные зональные и другие типы комплексов растительности. Поэтому для отображения на карте зональных закономерностей в распределении растительности достаточно выделить в легенде цветом или штриховкой ведущие для данной зоны (подзоны) типологические категории. Типы комплексов растительности неплакорных местообитаний сгруппированы в следующих подразделениях: заросли кустарников; болота; растительность речных долин и др. Отдельно показана растительность гор. ГИС позволяет не только анализировать и наглядно отображать установленные закономерности дифференциации растительного покрова, зональные и подзональные рубежи, но и выявлять ареалы перечисленных в легенде типов комплексов растительности.

Проект ГИС «Карта растительного покрова прибрежной зоны озеровидной части Саяно-Шушенского водохранилища» может быть модифицирован в двух вариантах – для комплексной оценки динамики растительного покрова и для мониторинга биоразнообразия. Первый вариант интересен в связи с решением проблемы выделения территорий трансформированных фитоценозов. Второй вариант предполагает рациональное структурирование имеющейся в ГИС информации следующим образом: покрытие обзорной цифровой карты растительности будет разделено на отдельные части, соответствующие листам топографических карт масштаба 1:100000. Для каждого листа будут подготовлены полигональное покрытие, отображающее распределение комплексов растительности; линейные покрытия (координатная сетка, гидрография, дороги); точечные покрытие для фиксации видового состава сообществ, фитоценозов, для геоботанических описаний и т.д., а также для привязки текстовых файлов и имиджей. В целом, проект ГИС «Растительный покров прибрежной зоны озеровидной части Саяно-Шушенского водохранилища» будет представлен следующим образом:

– основу проекта составит обзорная крупномасштабная (1:100000) цифровая карта растительности в виде единого полигонального покрытия, связанного с таблицами атрибутов, включающими для каждого полигона показатели: порядковый номер, периметр, площадь, индексы принадлежности к единицам районирования, соотношение фитоценозов (в %), запасы фитомассы и др. Выбирая тот или иной показатель, можно через легенду отобразить на карте закономерности его распределения;

– дополнительно в проект будет введено единое покрытие координатной сетки, ячейки, которой будут соответствовать листы топографических карт масштаба 1:100000. Это покрытие может быть наложено на покрытие обзорной крупномасштабной карты. Таким способом пользователь может найти интересующий его участок территории и выбрать его для подробного ознакомления;

– выбранный участок будет представлен в границах соответствующего листа топографической карты масштаба 1:100000. Этому листу будут приведены в соответствие полигональные, линейные и точечные покрытия, связанные с базами данных по видовому и фитоценотическому разнообразию, откуда пользователь сможет извлечь интересующую его информацию. Анализ содержащихся в базах данных показателей открывает возможность для паспортизации территории в границах листов топографической карты масштаба 1:100000, т. е. на регулярной основе.

Поскольку проект ГИС допускает постоянное дополнение и корректировку при сохранении старых версий, в проект будет включаться текущая информация о состоянии

видового и фитоценотического разнообразия данного района. Исследования позволят дать рекомендации по организации мониторинга биоразнообразия и состояния биоресурсов на региональном уровне.

Литература

Иванов И.И. Методы исследования: Дис. ... канд. техн. наук. - М., 1982. - 212 с.
Прохоров И.В. Исследование процессов.- М.: Наука, 1978. - 321с.

ОСНОВНЫЕ СТРАТЕГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ БИОГЕОЦЕНОЗАМИ ЮЖНОЙ ТАЙГИ

Сандлерский Р.Б.[1], Пузаченко Ю.Г.[1]

[1]*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*
srobert_landy@mai.ru,
jpuzak@mail.ru

Аннотация: рассматривается сезонное варьирование организованности (меры согласованности пространственного варьирования) термодинамических переменных для основных типов растительности южно-таежного ландшафта: лесов, лугов и верховых болот. Те термодинамические переменные, с которыми наиболее тесно связана мера организации фактически являются целевыми функциями работы системы. Оценивается влияние погодных условий на степень организации.

В сообщении рассматриваются термодинамические характеристики биогеоценозов южной тайги юга Валдайской возвышенности (Центрально-лесной заповедник), рассчитанные по двадцати сценам мультиспектральной съемки Landsat с 1986 по 2009 годы с пространственным разрешением 30х30 м (Сандлерский, Пузаченко, 2007). Термодинамические переменные: составляющие баланс поглощенной солнечной энергии (вт/м^2) – эксергия (вт/м^2), связанная энергия (вт/м^2) и приращение внутренней энергии (вт/м^2); структурные характеристики системы, характеризующие ее неравновесность: приращение информации (нат) и энтропия отраженной солнечной радиации (нат); тепловой поток (температура ^{o}C) системы (вт/м^2), и вегетационный индекс (вт/м^2) в каждый момент времени могут быть по-разному связаны друг с другом. Чем выше связь между переменными, тем более подобно (организованно) в различных точках пространства осуществляется функционирование термодинамической системы. Соответственно, чем более организована система, тем более эффективно осуществляется ее работа. Таким образом, оценка организованности работы термодинамической системы может быть использована для выделения так называемых целевых функций системы – термодинамических переменных, на поддержание которых направлено ее функционирование.

Мерой организации для нормальной совокупности может быть определитель корреляционной матрицы, который можно рассчитать в рамках метода главных компонент (факторного анализа). Если все переменные независимы, то определитель равен единице, в противном случае он меньше ее. Если какие-либо две переменные абсолютно коррелируют, то определитель равен нулю. Чем больше связь в системе, тем меньше определитель. Логарифм от определителя умноженный на минус единицу по смыслу тождественен информации существующей в системе (Кульбак, 1967). Для выделения «целевых» функций рассматривалась связь меры организации с термодинамическими переменными и оценивалась ее зависимость от погодных условий.

В таблице 1 приведены параметры распределения меры пространственной организованности термодинамической системы для ландшафта в целом и для обобщенных типов растительности. Средние меры организации в различных вариантах растительности близки, однако экстремумы и коэффициенты вариации различны. Организация максимальна для леса и болота и минимальна для луга, но при этом коэффициенты вариации во времени максимальны для леса и минимальны для болота. Минимальная организованность наблюдается в феврале, когда система наиболее близка к равновесию. С апреля по май организованность растет в целом в ландшафте, в лесу и на луге, достигая максимума в конце июня, и затем снижаясь. Болота имеют более высокую организованность, чем лес и луг весной и осенью (подобно изменению во времени приращения информации), и относительно низкую организованность летом. Коэффициент вариации во времени организованности для болот в бесснежный период минимален.

Таблица 1 – Статистические параметры организации (нат)

Период	Тип	Параметры			
		Среднее	Минимум	Максимум	Коэффициент вариации
В целом	Ландшафт	20.9	12.0	25.8	15.6
	Лес	21.2	10.2	26.3	19.1
	Болото	21.3	11.4	24.4	13.7
	Луг	20.9	11.0	25.5	16.4
Бесснежный период	Ландшафт	21.6	15.5	25.8	12.8
	Лес	22.6	15.8	26.3	13.2
	Болото	22.2	17.4	24.4	7.5
	Луг	21.6	15.2	25.5	12.4

Мера организованности для ландшафта в целом в наибольшей степени положительно связана с приращением информации, индексом биологической продуктивности и температурой, что позволяет определить «целевую» функцию системы, как максимизацию неравновесности преобразования солнечной энергии, производства биологической продукции и теплового потока в атмосферу. Максимальной организованностью обладают леса, и для них же максимальна зависимость организованности от варьирования термодинамических переменных тех же, что и для ландшафта в целом. Организованность лугов минимальна, но корреляционные связи подобны таковым для леса. В отличие от этих типов у болот индекс продуктивности слабо связан с организованностью, а другие корреляции значительно меньше. Оценка зависимости организованности от прихода солнечной радиации, дня от начала года и погодных условий показала, что организованность термодинамической системы в пространстве, в значительной степени определяется календарными фазами саморазвития растительности. Сравнение этих оценок по типам показало, что функционирование жизненной формы мхов и трав в меньшей степени, чем у деревьев определяется фенологией. Оценка связи организованности с погодными условиями показывает общую тенденцию ее увеличения с увеличением температуры и осадков, соответственно увеличение значения этих переменных удаляет систему от равновесного состояния. Однако это влияние не велико и проявляется в основном на фоне сезонной автохтонной фенологической обусловленностью динамики организации.

Анализ позволил выявить три типа термодинамических систем с принципиально различными стратегиями использования солнечной энергии: лесные сообщества максимизирующие поглощение солнечной энергии и ее затраты на эвапотранспирацию; луговые сообщества максимизирующие неравновесность и биологическую продуктивность в течение бесснежного периода; верховые болота за счет быстрой реакции на изменение режима увлажнения и теплообеспеченности в переходные периоды максимизируют неравновесность и производство биологической продукции, поддерживая их на постоянном уровне в течение всего бесснежного периода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ № 12-05-00060-а, 13-05-12003-офи_м.

Литература

Кульбак С. Теория информации и статистика. М.: Наука. 1967. 406 с.

Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г. Термодинамика биогеоценозов на основе дистанционной информации // Журн. общ. биолог. 2009. Т. 70. № 2. С. 121-142

СТРАТЕГИЯ ОСВОЕНИЯ НАСЕКОМЫМИ КОРМОВЫХ ОБЪЕКТОВ В ОЧАГЕ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ: АНАЛИЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТОЧЕНЫХ ПРОЦЕССОВ

Секретенко О.П.[1,2], Ковалев А.В.[2], Суховольский В.Г.[1,2]

[1]*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия*
sekretenko@ksc.krasn.ru
[2]*Международный научный центр исследования экстремальных состояний организма при Президиуме КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия*
sunhi@nm.ru
soukhovolsky@yandex.ru

Аннотация: методами пространственной статистики изучены закономерности размещения на кормовом объекте яиц черного пихтового усача (*Monochamus urussovi* Fisch.) и тополевой моли-пестрянки (*Litchocolletis populifoliella* Tr.). Показано, что репродуктивная стратегия этих насекомых включает оптимизацию пространственного размещения потомства на стадии откладки яиц, направленную на уменьшение конкуренции между будущими личинками и преодоление защитной реакции кормового растения.

1. Введение

У насекомых забота родительского поколения о потомстве характерна не только для общественных видов (муравьи, пчелы, осы), но также для фитофагов с неперекрывающимися поколениями, у которых выбор самкой места размещения яйца часто однозначно определяет объем и качество корма, доступного потомку. Уменьшение конкуренции личинок за корм достигается равномерностью размещения яиц (Исаев и др., 1988). Еще одной стороной взаимодействия насекомых является преодоление устойчивости растения к их повреждающему воздействию, проявляющейся в выработке токсичных соединений (Бахвалов и др., 2010). После некоторого критического объема повреждения негативная реакция растения ослабляется за счет истощения защитных ресурсов. Предполагается, что самки откладывают яйца достаточно далеко одно от другого для уменьшения конкуренции будущих личинок за корм, но при этом их локальная плотность достаточно велика для преодоления защитной реакции дерева. Методами пространственной статистики (Gelfanf et al., 2010) на примере двух видов насекомых-фитофагов было проверено, согласуются ли предположения об оптимизации размещения потомства родительским поколением с характеристиками наблюдаемого расположения яиц на кормовых растениях.

2. Объекты и методы

Жуки черного пихтового усача в точке откладки каждого яйца оставляют на коре дерева хорошо видимый след - насечку (Исаев и др., 1988). Появляющиеся личинки выедают под корой в лубе компактную площадку вблизи насечки средней площадью 50 кв.см. В очаге массового размножения были сделаны цифровые фотографии участков столов 11 поврежденных усачом деревьев пихты сибирской. Координаты 317 насечек определены на развертках боковых поверхностей стволов с компенсацией искажений, возникших из-за цилиндричности стволов и геометрической аберрации, вносимой фотокамерой.

Тополевая моль-пестрянка откладывает яйца, приклеивая их на листья. Личинки при выходе из яйца не появляются на поверхности, а питаются тканью внутри листа, образуя «мину» - полость в листовой паренхиме с центром в месте прикрепления яйца. Листья тополя бальзамического отбирались в городских насаждениях г. Красноярска во время массового лёта тополевой моли. В пределах каждого листа определялись координаты всех яиц. Исследовано 32 листа тополя, общее число яиц составило 635 шт.

3. Результаты и их обсуждение

Для описания размещения яиц рассчитаны эмпирические парные корреляционные функции (ПКФ), характеризующие, как в среднем изменяется с увеличением расстояния от некоторого произвольно выбранного яйца плотность других яиц. В случае их независимого размещения ПКФ была бы равна единице для любых расстояний (Gelfand et al, 2010). Расчеты показали, что на расстояниях от 0 до 3.6 см для усача и от 0 до 8 мм для тополевой моли значения ПКФ увеличиваются от нуля до единицы, при больших расстояниях (4–10 см для усача, 8–15 мм для моли) превосходят единицу. Это дает основания моделировать размещение яиц с помощью пространственного точечного процесса Гиббса, учитывающего взаимодействие между точками. Параметры функций взаимодействия были оценены по данным наблюдений в двух вариантах – в предположении однородности поверхности кормового объекта, а также считая, что отдельные области в разной степени пригодны для питания личинок. Методом статистического моделирования тестировались гипотезы согласия наблюдаемых данных и полученных моделей трех видов. На уровне значимости 0.05 отклонены гипотезы о согласии с натурными данными модели стационарного пуассоновского процесса, описывающего «случайное» независимое размещение яиц. Не отклоняется гипотеза о согласии модели однородного процесса Гиббса и данных по размещению как яиц усача, так и тополевой моли. Модель неоднородного процесса Гиббса согласуется с данными по размещению яиц усача и не согласуется с данными по моли.. Результаты свидетельствуют в пользу того, что самками тополевой моли учитываются в процессе откладки яиц как конкуренция, так и кооперация личинок. Так как данным о размещении яиц усача соответствуют и однородная, и неоднородная модели Гиббса, следует признать, что самки усача учитывают эффект конкуренции, однако некоторое группирование яиц может объясняться как кооперативным эффектом, так и неоднородностью ресурса.

4. Заключение

Использование характеристик пространственного распределение яиц позволяет выявить особенности репродуктивной стратегии у скрытоживущих насекомых. На примере черного пихтового усача и тополевой моли показано, что существует стратегия откладки яиц, позволяющая уменьшить конкуренцию за корм между будущими личинками за счет уменьшения возможности перекрытия областей питания отдельных личинок. Установлено, что яйца на кормовом объекте располагаются так, что в ближайшей окрестности каждого из них, как правило, количество других яиц значимо меньше, чем это было бы при их независимом распределении. Их размещение может быть описано моделью Гиббса с функцией взаимодействия, характеризующей постепенное уменьшение интенсивности «расталкивания» с расстоянием. Критическая величина расстояния «расталкивания» яиц, при достижении которой зависимость в их расположении становится несущественной, согласуется с размером площади питания, необходимой для выживания одной личинки. Гипотеза об учете самками в процессе откладки яиц кооперативного эффекта, связанного с коллективным преодолением насекомыми защитной реакции дерева, может считаться подтвержденной для тополевой моли и не отклоняется в случае пихтового усача, для которого этот вопрос остается открытым и нуждается в дальнейшем исследовании.

Работа поддержана РФФИ (грант 11-04-00173).

Литература

Бахвалов С.А., Колтунов Е.В., Мартемьянов В.В. Факторы и экологические механизмы популяционной динамики лесных насекомых-филлофагов. - Новосибирск: изд-во СО РАН, 2010. - 299 с.

Исаев А.С., Рожков А.С., Киселев В.В. Черный пихтовый усач *Monochamus urussovi* (Fisch.). - Новосибирск: Наука, 1988. - 272с.

Gelfand A.E., Diggle P.J., Fuentes M., Guttorp P. (eds) Handbook of spatial statistics. - Boca Raton FL: CRC Press, 2010. - 619 p.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ (НП) С ПОЧВОЙ

Семенова Н.Н.[1,2], Орлова Н.Е.[1], Орлова Е.Е.[1], Бакина Л.Г.[3]

[1]*СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия*
agro@bio.pu.ru
[2]*ГНУ ВИЗР Россельхозакадемии,* Санкт-Петербург, Россия
vizrspb@mailru.com
[3]*НИЦЭБ РАН,* Санкт-Петербург, Россия
bakinalg@mail.ru

Аннотация: рассматриваются некоторые типы математических моделей динамики содержания органического углерода почвы и особенности их использования при нефтезагрязнении. На основе этих моделей предлагается способ оценки скорости минерализации органического углерода почвы, генетически происходящего от нефти. Показано, что на эти скорости влияет уровень загрязнения, но не то в какой почве (первично или вторично загрязненной) происходит процесс.

Введение

Аварии при транспортировке и добыче нефти являются одним из серьезных антропогенных факторов загрязнения окружающей среды, в том числе почв. При этом НП существенным образом влияют на все аспекты функционирования почвенного ценоза и в частности на параметры, определяющие его устойчивость. Известно, что в большей степени эти параметры регулируются органическим веществом почв, и в особенности гумусовыми веществами как наиболее динамически и химически активной субстанции почвы. Известно также, что содержание органического углерода в почве достоверно увеличивается даже при минимальных загрязнениях и эта разница может сохраняться достаточно долго.

Традиционно динамические модели экологических систем используются для оценки негативных последствий влияния различного рода антропогенных воздействий на трех иерархических уровнях: локальном, региональном и глобальном. Математическую модель, описывающую воздействие на экологическую систему на уровне почвенного ценоза, следует отнести к низшему иерархическому уровню, однако такая модель необходимый элемент при изучении негативной роли НП и на более высоких уровнях. В данном сообщении рассматриваются модели именно этого уровня. Целью данной работы являлось определение различий в относительных скоростях минерализации органического углерода при первичном и вторичном загрязнениях, а также влияния на эти скорости уровней загрязнения.

Материалы и методы

Для проведения эксперимента была выбрана хорошо окультуренная дерново-подзолистая суглинистая почва на карбонатной морене, характеристика которой представлена в работе (Бакина, 2012). Образцы почвы для модельного эксперимента (5 точек отбора с делянки) отбирались с глубины 5 см в конце вегетационного сезона. Для создания первичного загрязнения нефть вносили в незагрязненную почву; контролем служила почва без нефти. Повторное загрязнение создавали внося нефть в почву, уже загрязненную нефтью в условиях полевого эксперимента с изначальным уровнем загрязнения ~ 5,0%; контролем служила та же загрязненная почва, но без повторного внесения нефти. Были выбраны два уровня загрязнения – 1 % и 5 %. К моменту закладки опыта ранее загрязненная почва прошла 4летний цикл самовосстановления.

Методы исследования представляют собой синтез аналитических методов определения элементного состава гуминовых кислот и методов построения математических динамических моделей. Предполагалось, что процесс минерализации общего углерода почвы, происходит согласно кинетике первого порядка по крайней мере в начальный период процесса (около2 лет) (Бакина, 2012).

Результаты и их обсуждение

Построенная линейная модель ставит скорости минерализации органического углерода в зависимость от наличия соответствующего типа углерода в почве. Кроме того, в начальный период процесса минерализации перераспределение между углеродом собственно почвенным (являющимся функцией времени $C_{soil,ij}(t)$) и углеродом генетически связанным с нефтью ($C_{oil,ij}(t)$) также происходит по линейному закону, причем здесь j=1,2 означают первично и вторично загрязненную почвы, а i=1,5 -уровни загрязнения; [Бакина, 2012]. В нашей модели такие линейные связи являются функциями времени, а их параметризация осуществляется на основе экспериментального материала в предположении незначительного, также линейного возрастания во времени. При этом четко определяется нелинейный характер этой зависимости от уровня загрязненности. Используя при определении кинетики части почвенного углерода, связанного с нефтезагрязнением, метод малого параметра, получим следующую систему дифференциальных рекуррентных уравнений для первых двух членов разложения в ряд по малому параметру μ функции $C_{oil,ij}(t)$:

$$\begin{cases} \dfrac{dC^0_{oil,ij}}{dt} = \dfrac{K^j_i}{K^j_i+1}(1-\lambda^j_i)C_{sum,ij}(0)e^{-\lambda^j_i t} - \dfrac{K^j_i}{K^j_i+1}C^0_{oil,ij} \\ \dfrac{dC^1_{oil,ij}}{dt} = \dfrac{t\lambda^j_i}{K^j_i+1}C_{sum,ij}(0)\,\mathrm{e}^{-t\lambda^j_i} - \dfrac{t}{K^j_i+1}\dfrac{dC^0_{oil,ij}}{dt} - \dfrac{K^j_i}{K^j_i+1}C^1_{oil,ij} \end{cases}$$

$$j=1,2;\ \mathrm{i}=1,5; \quad C_{sum,ij} = C_{soil,ij} + C_{oil,ij}; \quad C_{soi,ij} = (K^j_i + \mu t)C_{oil,ij} \qquad (1)$$

$$C_{oil,ij}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \mu^k C^k_{oil,ij}; \quad C_{sum,ij}(t) = C_{sum,ij}(0)\,\mathrm{e}^{-t\lambda^j_i}.$$

где параметр K^j_i характеризует начальное распределение между почвенным углеродом и углеродом НП, а λ^j_i - относительную скорость минерализации общего углерода почвы $C_{sum,ij}(t)$.

Таблица 1. Сравнение содержания углерода, генетически связанного с НП в почвах, загрязненных нефтью, полученного расчетными и аналитическим методами через год после начала зксперимента; % от почвы

Уровень загрязненности	Расчет по уравнениям (1)	Расчет по эмпирическим уравнениям	Аналитический метод определения
Первичное загрязнение			
+1% нефти	1,23	1,02± 0,03	0,96± 0,03
+5% нефти	1,94	1,86± 0,02	1,83± 0,03
Повторное загрязнение			
+1% нефти	1,45	1,53± 0,04	1,39± 0,04
+5% нефти	2,49	2,58± 0,05	2,51± 0,03

Таблица 1 показывает, как согласуются результаты, полученные данным методом, с аналитическим определением органического углерода генетически связанного с нефтью и его же определением расчетным путем по эмпирическим моделям, полученным в работе Бакиной (2012) для той же почвы. Учитывая хорошую согласованность расчетов, сделанных по эмпирическим и детерминированным моделям, можно сделать следующие выводы.

Выводы

1. Предложенный метод является более общим, чем построение эмпирических моделей, и дающим такую же точность.
2. Для определения динамики органического углерода генетически связанного с нефтью, достаточно определить два члена разложения в ряд по малому параметру.

3. На скорость минерализации органического углерода генетически связанного с нефтью нелинейно влияет уровень загрязнения и не влияет в первично или во вторично загрязненной почве происходит процесс.
4. Необходимо апробировать данный метод для почв другого типа и гранулометрического состава.

Литература

Бакина Л.Г. Роль фракций гумусовых веществ в почвенно-экологических процессах// Диссертация на соискание степени доктора биологических наук: - СПб, 2012

СБАЛАНСИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПЕСТИЦИДОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Семенова Н.Н.[1,2], Сухорученко Г.И.[2], Долженко О.В.[2], Зациорский А.С. [1,2]

[1]*СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия*
nnsemenova@yandex.ru
[2]*ГНУ ВИЗР РАСХН, Санкт-Петербург, Россия*
vizrspb@mail333.com

Аннотация: предлагается два подхода к математической постановке и решению задачи сбалансированного применения химических средств защиты растений (ХСЗР). Первый подход основан на использовании обобщений детерминированных динамических моделей основных компонент агробиоценоза. В основе второго - лежит метод анализа иерархий (МАИ). Разработанная компьютерная программа PESTOPTIMA опирается на синтез этих двух подходов.

Введение

Проблема определения оптимальной тактики внесения средств химической защиты растений (ХСЗР) – пестицидов, крайне сложна и далека от окончательного решения. Как правило, задача оптимального подбора пестицидов ставится в экономической плоскости: как выбрать препарат по цене таким образом, чтобы затраты на его приобретение окупались полученной прибавкой урожая, т.е. возникает проблема определения экономического порога вредоносности. В свете введенного К.В. Новожиловым (Новожилов. 1997) понятия экологического порога, подбор экологически безопасного, и, в то же время, эффективного пестицида оказывается задачей практически неразрешимой, так как количественный эквивалент экологического порога получить весьма затруднительно в силу неопределенности и отдаленности экологических последствий применения пестицидов и трудностей экономической их оценки.

Однако, вводя ограничения на некоторые аспекты взаимодействия ХСЗР с компонентами агробиоценоза (например, ограничиваясь локальными взаимодействиями) и конкретизируя способ их применения, можно получить унифицированные методы нахождения их доз, приближающихся к оптимальным. Назовем их сбалансированными. В данном случае эффективность и безопасность оценивается с точки зрения той локальной концентрации пестицидов в определенных компонентах агробиоценоза, которая может воздействовать как на вредоносные, так и на способствующие поднятию урожайности организмы (Семенова и др., 1999).

Решение задачи оценки безопасности применения ХСЗР с привлечением экспертного подхода была осуществлена нами с использованием МАИ (Семенова и др., 2012) и построением программы PESTLOAD, при этом эффективность и безопасность оценивается уже с привлечением качественных методов. В сообщении предлагается развитие этого подхода для создания тактики сбалансированного применения ХСЗР.

Материалы и методы

Математическая постановка задачи нахождения оптимальной дозы ХСЗР строится в рамках определения их локальных концентраций на основе обобщений детерминированных динамических моделей основных компонент агробиоценоза и должна быть конкретизирована способом применения ХСЗР. Таким образом, задача сводится к нахождению решения соответствующего уравнения, удовлетворяющего определенным неравенствам. Экспертный подход на основе МАИ реализован в компьютерной программе PESTOPTIMA, которая является логическим продолжением программы PESTLOAD. В программе ранжировка пестицидов производится с использованием качественных сравнений в двух вариантах: по действующему веществу (д.в.) и по препаратам.

Разработанные алгоритмы апробировались применительно к ассортименту инсектицидов, применяемых в агробиоценозах пшеницы в Саратовской области (левобережная часть) и в агробиоценозах картофеля в Северо-Западном регионе.

Результаты и их обсуждение

С использованием стандартного набора доступных параметров, были получены неравенства, определяющие сбалансированную дозу внесения пестицида. Следовательно, возможно оценивать применимость пестицидов, исходя из их физико-химических свойств. Была также выделена область этих параметров, при которых такая доза может быть найдена. При определении границ области использовались сценарии, дающие наибольший и наименьший риск проникновения пестицидов в грунтовые воды [4].

В таблице приведены рассчитанные (верхняя цифра) и рекомендованные в данных климатических условиях (нижняя) дозы фосфорорганических инсектицидов Базудин Г(100г/кг) и Дурсбан Г(100г/кг) с д.в. диазинон и хлорпирифос соответственно и неоникотиноида Актара ВДГ (250г/кг) с д.в. тиаметоксам для почв Ленинградской области при борьбе с проволочником, дающих наименьшую экологическую опасность и заданную (не ниже 80%) эффективность их применения. Для инсектицида Дурсбан Г(100г/кг) при заданных почвенных условиях всегда существует норма расхода пестицида, обладающая пролонгированностью действия, равной 2/3 от вегетационного периода, причем в конце периода вегетации содержание инсектицида не будет превосходить ПДК. Для Базудина Г(100г/кг) разрешимость такой задачи зависит от наличия чувствительной к данному инсектициду почвенной биоты и от набора почвенных условий. С учетом большого разброса экспериментальных данных, наибольшая неопределенность в возможности определения оптимальной, по выбранным критериям, дозы наблюдается для неоникотиноидов. Для пестицида на основе тиаметоксама примерно в 50% случаев такую дозу найти нельзя.

Таблица 1. Дозы внесения пестицидов (кг/га)

	Типы почв (Ленинградская область)			
	Дерново-среднеподзолистая супесчаная	Дерново-сильноподзолистая супесчаная	Дерново-подзолистая суглинистая	Дерново-подзолистая глеевая глинистая
Базудин_Г (100г/кг)	2/2	1.1/2	2.1/2	3.6/2
Дурсбан Г (100г/кг)	1/1	0.5/1	1.2/1	1.9/1
Актара_ВДГ (250г/кг)	0.6/0.6	0.5/0.6	0.7/0.6	0.8/0.6

Использование программы PESTOPTIMA показало, что в отличии от определения наиболее оптимального для борьбы с проволочником в данных почвенно-климатических условиях набора пестицидов по д.в., хорошо согласующегося с полученными аналитически, определение такого набора по препарату на первый план выдвигает неоникотиноиды.

Выводы

Оценка пестицидов, полученная с использованием аналитически-графического метода, соответствует в большей степени оценкам на основе программы PESTOPTIMA при работе с вариантом оценки по д.в. пестицидов.

Алгоритм, заложенный в программу PESTOPTIMA, позволяет осуществить синтез качественных (экспертный подход) и количественных (детерминированно-статистический

подход) оценок, необходимых при определении сбалансированного применения ХСЗР и может быть использован для дифференциации их доз в точном земледелии.

Литература

Новожилов К.В. Защита растений - фитосанитарная оптимизация растениеводства. Сб. тр. Iого Всероссийского съезда по защите растений. С.-Петербург, 1997. С. 35-45.

Семенова Н.Н., Новожилов К.В., Петрова Т.М., Терлеев В.В. Детерминированные модели поведения пестицидов в почве. Методология построения, структура, принципы, использования. СПб.- Пушкин: ВИЗР РАСХН. 1999. 92с

Семенова Н.Н., Новожилов К.В., Сухорученко Г.И. Оценка локального риска применения пестицидов с использованием метода анализа иерархий// Вестник защиты растений 2012. №3. С. 3-9.

Jury W.A., Dennis D.F., Farmer W.J. Evaluation of pest groundwater pollution potential from standard indices of soil - chemical adsorption and biodegradation// J. Envir. Qual. 1987. V. 16. 4. P. 422-4

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИЛУЧШИХ СРЕДОВЫХ ВЛИЯНИЙ В ЭКОСИСТЕМЕ «МОЛОЧНОЕ СТАДО»

Сидорова В.Ю.[1], Попов Н.А.[2]
[1]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования специалистов «Калининградский институт переподготовки кадров агробизнеса», г.Калининград, Российская Федерация*
gdi20071@yandex.ru
[2]*Всероссийский государственный научно-исследовательский институт животноводства Россельхозакадемии , п. Дубровицы Московской области, Российская Федерация*
genetic-pna@yandex.ru

Аннотация: Для практики животноводства важен своевременный и тщательный анализ имеющийся информации, позволяющий выделять актуальные направления производственной деятельности, особенности и закономерности развития экобиосистем – экологически чистых популяций животных. Создание устойчивой и объемной генетико-технологической модели позволяет иметь удобный инструмент мониторинга стад, с учетом генетических, технологических, экономических и социальных ресурсов. Модель не является биологическим законом, она исследует наилучшие варианты оптимального использования генотип-средового соотношения на практике

Ведение

В современных условиях рынка условия существования животных определяются совокупностью экологических факторов – элементов среды. Ученым и специалистам, а также практикам-животноводам необходимы мощные, удобные, гибкие и простые в использовании инструменты обзора результатов своего труда, в частности, эффективного мониторинга молочных стад.

К настоящему времени были предприняты попытки описать закономерности общего влияния генетических и технологических условий (факторов) на эффективность деятельности сельскохозяйственных производств. Большинство исследований было направлено на раскрытие либо генетических, либо средовых особенностей изучаемого вопроса. Первая попытка описания генетико-математического процесса принадлежит Ф. Гальтону (1889), который ввел коэффициент линейной регрессии наследования количественных признаков. Г. Юл (1906) и В. Вайнберг (1910) предприняли попутку объяснить действие коррелятивных связей через менделеевские закономерности наследования, В. Иоганссен (1935) показал отклонения признака родителей от популяционной средней, в следствие как генетических, так и средовых влияний.

Дальнейшая разработка математических методов в биологии связана с именами Д. Лаша (1945), К. Мазера (1949), Ф. Добржанского (1950), Э. Гинзбурга, З. Никоро (1960), Н. Плохинского (1964), Л. Эрнста (1973), Е. Меркурьевой (1983), C. Henderson (1986), Н. Басовского (1990), В. Кузнецова (1996-2000), Н. Попов (2008) и др. Разработки этих и некоторых других авторов продвигались в сторону определения генетических факторов популяций, а средовые рассматривались ими в незначительной степени.

Некоторые современные ученые делали попытки развития аграрной теории с учетом исторических тенденций и современных представлений. Были определены теоретические основы эффективности сельхозпредприятий при учете многоукладности экономики АПК, проведена оценка различных форм хозяйствования, определены рейтинги эффективных производителей, изучены формы организации сельскохозяйственных производств и вопросы природного биоразнообразия и породного районирования. Между тем так и не были определены оптимальные размеры сельхозпредприятий с учетом их модульности, а вопросы

генетического анализа популяций в условиях рыночной экономики (менеджмента в животноводстве) не рассматривались авторами вообще.

Объекты и методы.

Исследования проведены в период 1987-2007 годов в хозяйствах малой и средней производственной мощности Московской области Российской Федерации и пригородной зоны города Бишкек Кыргызской Республики СНГ. В обработку включены стада Голштинской ассоциации США, расположенные в зонах традиционных областей распространения породы. Всего было изучено более 24 тысяч коров голштинской черно-пестрой породы. При проведении исследований использовались общепринятые методы зоотехнического анализа, математико- статистического анализа, экономико-статистического анализа, методы разработки целевых комплексных программ, методы моделирования и перспективного прогнозирования, среди которых метод сравнения, группировок, индексный метод, метод системного анализа, методы вариационного, ковариационного, регрессионного анализов, экспериментальный метод и некоторые другие, характеризующие разведение молочного скота в условиях малых и средних хозяйств по наиболее существенным признакам.

Полученные результаты и их обсуждение.

Многолетний анализ (Weigel, 2002) молочной продуктивности подконтрольных стад Голштинской ассоциации США в количестве 4,5 млн коров, средний удой которых равнялся 8578 кг молока жирностью 3,74%, общим выходом молочного жира 321 кг и молочного белка 278 кг, показал, что основными факторами, определяющими изменчивость удоя коров голштинской породы являются кормление и оптимум системы содержания. На их долю приходится 35%, на генотип животного 25%, на состояние здоровья 25%, на год и сезон отела 15%. Американская модель (Weigel, 1994) была взята за основу. Вместе с тем наши исследования основных – наиболее затратных факторов, показали, что между закономерностями внутри большого массива животных и малого стада существуют различия, которые необходимо изучить. В американской модели процентно-долевого влияния на производство молока вызывала сомнение низкая величина генетических факторов, по сравнению с величиной негенетических. Между тем известно, что генетические факторы являются основополагающими при улучшении стад: перекорм скота низкой продуктивности не способствовал получению дополнительного молока, так как величина взаимосвязи между удоем и потребляемыми кормовыми единицами в этом случае равнялась -0,8. В условиях рыночной экономики доля приобретаемых кормов, или получаемых от использования собственного кормопроизводства, устанавливается с учетом региональных особенностей - цен на аренду земли и реализацию молока, на уровне 20%. Разделение фактора «кормление и содержание» на два фактора: «кормление», и «содержание» с достоверно не различающимися величинами 15% и 20%, показало преобладание генетической основы в селекции молочного скота, к тому же с ними стало проще оперировать, так как у одних собственников скота есть проблемы с кормлением скота, но нет их с содержанием животных. Вместе с тем был найден новый фактор влияния, определяющий эффективность деятельности предприятия – человеческий фактор, или творческое и добросовестное отношение к труду. Он включил в себя такие понятия, как повышение продуктивности скота на ферме без применения селекционно-племенных мероприятий, эффективное использование квот, льгот, дотаций и субсидий, экономный менеджмент, устройство и эксплуатацию подсобных производств. Все лечебные мероприятия на ферме состояли из сезонных санитарно-профилактических прививок, а если животное было поражено тяжелой болезнью, его не лечили, а выбраковывали из стада. Таким образом затраты на оздоровление животных имели относительно постоянную

величину, переходящую из сезона в сезон. Генетико-технологическая модель успешного предприятия, занятого в производстве молока, приняла вид: **0,25 g + 0,20 x + 0,15 y + 0,20 k + 0,20 w = 1,** где g – генотип, x – кормление, y – содержание, k – оздоровление, w – человеческий фактор. Все основные ***факторы*** оказались равнозначно важны для малого производства. Вместе с тем у различных собственников скота имелись различные специфические проблемы; их особенности высветил второй информативный уровень генетико-технологической модели процентно-долевого влияния на производство молока – ***составляющие*** основных факторов.

Выводы.

Определение основных факторов эффективной деятельности молочной фермы и их составляющих в единой модели позволяет наиболее полно ознакомиться с проблемами и ресурсами хозяйства. Форма модели устойчива, за счет оптимального числа факторов, конечна, за счет ограниченного числа основных факторов, и объемна за счет неограниченного числа составляющих. Генетико-технологическая модель проста и удобна в использовании, она позволяет отслеживать динамику изменения параметров факторов с целью их своевременной корректировки. По существу, генетико-технологическая модель – это система, включающая использование новых технологий для программ развития стад, среди которых - увеличение жирно- и белковомолочности, обильномолочности, направленного выращивания молодняка, ранней оценки быков-производителей, работы с коровами-рекордистками и коровами-долгожительницами. Любые из них могут стать направлениями дальнейшей работы по совершенствованию стада или внедрения технологий по преобразованию условий разведения молочного скота.

Литература

Weigel, K.A. Cow longevity: how traits enhance of reduce a cow's live/ K. A. Weigel. - Hoard's Dairyman, 2002, March, № 25:244.

Weigel, K.A. Adjustment for heterogeneous variance in genetic evaluations for conformation of United States Holsteins/ K.A. Weigel, T.J. Lawor. - J. Dairy Sci., 1994, 77: 1691-1701.

ИЗМЕРЕНИЕ И ОЦЕНИВАНИЕ ВИДОВОГО РАЗНООБРАЗИЯ: ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Смирнов В.Э.[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математических проблем биологии Российской академии наук, г. Пущино, Россия*
vesmirnov@rambler.ru

Аннотация. В работе излагается унифицированный подход, инкорпорирующий идеи разных авторов и решающий основные проблемы получения и сравнения оценок видового разнообразия. Приводится пример приложения этого подхода к геоботаническим данным Воронежского заповедника.

Измерение и оценка биоразнообразия является главной задачей многих мониторинговых и природоохранных проектов (Magurran, 2004). Простейшая, наиболее интуитивно понятная и ключевая мера разнообразия – видовое богатство (число видов в ценозе, на территории, за период времени и т.п.). Однако с теоретической точки зрения видовое богатство – весьма проблемная мера по двум основным причинам. Во-первых, наблюдаемое число видов крайне чувствительно к размеру выборки, площади исследования, числу учтенных особей или присутствию видов. Поскольку большинство видов встречаются редко, данные по биоразнообразию «страдают» неполнотой из-за неучтенных видов. Как следствие, видовое богатство, подсчитанное по эмпирическим данным, является смещенной (в сторону уменьшения) оценкой истинного видового богатства. Во-вторых, видовое богатство не учитывает информацию о видовых обилиях. Все виды – как редкие, так и обычные – получают равный «вес». Но включение в меры разнообразия информации об обилиях необходимо, например, при исследованиях некоторых (не всех, конечно) экосистемных функций, поскольку редкие виды обычно не вносят большой вклад в биомассу, продуктивность, аккумуляцию элементов минерального питания и прочие важные экосистемные свойства.

Существует обширная литература, посвященная этим проблемам. В недавно опубликованной работе Colwell et al. (2012) обобщили и развили идеи разных лет, создав единую теоретическую (статистическую) основу, объединяющие различные методы для анализа видового богатства. Авторы разработали две группы методов для двух основных типов данных, собираемых для измерения биоразнообразия: 1) модели и оценки на основе распределения Пуассона для данных, где элементы выборок – особи (individual-based data); 2) модели и оценки на основе распределения Бернулли для данных, где элементы выборок – единицы учета, такие как геоботанические описания (sample-based data). Сущность всей методологии состоит в следующем: ожидаемое число видов находится для референтной выборки либо интерполяцией (разрежением), если референтная выборка меньшего размера, чем наблюдаемая, либо экстраполяцией, если референтная выборка большего размера, чем наблюдаемая. В результате строится кривая разрежения числа видов от размера выборки в 1 элемент до наблюдаемого числа элементов, которая далее переходит (экстраполяцией) в асимптотическую кривую видового богатства, продолжающуюся до желаемого размера выборки. Интеграция в унифицированный подход методов разрежения и экстраполяции создают единый теоретический каркас для получения различных оценок видового богатства и статистических выводов на их основе.

В работе Chao et al (2013) представлено дальнейшее развитие методологии, ее распространение на меры разнообразия, учитывающие обилия. Авторы предложили асимптотические оценки для чисел Хилла (Hill, 1973) – индексов Шеннона и Симпсона – и показали их связь с аналитическими оценками, получаемыми методами разрежения и экстраполяции по эмпирической выборке.

В наиболее полном виде идеи и методы описанного подхода реализованы в последней (9.1.0) версии свободно распространяемой программы EstimateS (Colwell, 2013). Для проведения отдельных расчетов возможно использование среды статистического программирования R (R Develeopment Core Team, 2012).

Данный подход и упомянутые программные средства были успешно применены к анализу динамики и текущего состояния видового богатства растительности Воронежского заповедника (Смирнов, 2012; Смирнов и др., 2013). Проведенный анализ показал, как различные (подчас неожиданные) факторы могут смещать оценки видового богатства. Для выявления и коррекции такого влияния необходимо проводить статистическое моделирование и анализ современными методами как в рамках представляемого подхода, так и другими, относящимися к процедурам монте-карловского типа (бутстреп, рандомизационные тесты и т.п.).

Для динамики разнообразия растительности Воронежского заповедника данная методика позволила получить сравнимые оценки видового разнообразия за три периода проведения исследований, причем за каждый период было доступно разное число геоботанических описаний. Показано, что за 80 лет, прошедших с начала заповедания, видовое богатство растительности в целом сохранилось на прежнем уровне, видовая насыщенность уменьшилась. При оценке текущего состояния разнообразия основных типов растительных сообществ (также представленных разным числом описаний) выявлены наиболее бедные и богатые типы, что не было очевидно из результатов обычной обработки полевых данных. Интерполяция и экстраполяция выстроили сходную последовательность сообществ по возрастанию/уменьшению видового богатства, но на разных его уровнях. Метод интерполяции дал меньшие значения видового богатства по сравнению с методом экстраполяции. Результаты статистического моделирования методом экстраполяции в целом оказались близки к максимальным, а методом интерполяции – к минимальным оценкам богатства, полученным из полевых наблюдений (если рассматривать всю совокупность типов сообществ для заповедника).

Работа проводилась при поддержке РФФИ, проект № 13-04-02181-а.

Литература

Смирнов В.Э. Статистическое оценивание некоторых параметров видового разнообразия по проблемным экологическим данным // Математическая биология и биоинформатика: IV Международная конференция, г. Пущино, 14-19 октября 2012 г. Доклады / Под ред. В.Д.Лахно. – М.: МАКС Пресс. – С.204-205.

Смирнов В.Э., Ханина Л.Г., Бобровский М.В. Сравнительная оценка видового богатства растительных сообществ средствами статистического моделирования // Современные концепции лесной экологии: сборник материалов Первой Всероссийской школы-конференции по лесной экологии (Томск, 25-30 августа 2013 г.) / Под ред. С.П. Кулижского, О.В. Смирновой, М.В. Бобровского, С.В. Лойко. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2013. – С. 142-148.

Chao, A., N.J. Gotelli, T.C. Hsieh, E.L. Sander, K.H. Ma, R.K. Colwell, and A.M. Ellison. Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies // Ecological Monographs. – 2013. Online early.

Colwell, R.K. EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 9. User's Guide and application. 2013. URL: http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates/.

Colwell, R. K., A. Chao, N. J. Gotelli, S.-Y. Lin, C. X. Mao, R. L. Chazdon, and J. T. Longino. Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation, and comparison of assemblages // Journal of Plant Ecology. – 2012. – Vol. 5. – P. 3-21.

Hill, M. Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences // Ecology. – 1973. – Vol. 54. – P. 427-432.

Magurran, A.E. Measuring biological diversity. – Blackwell, Oxford, UK. – 2004. – 256 pp.

R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2012. URL: http://www.R-project.org/.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НИТРИФИКАЦИИ И ОКИСЛЕНИЯ ОГАНИЧЕСКОГО СУБСТРАТА В СИСТЕМЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ

Смирнов Н.В.

Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН (ИПМИ КарНЦ РАН), Петрозаводск, Российская Федерация

fresh.87@mail.ru

Аннотация. Предложена математическая модель взаимосвязанных процессов нитрификации и окисления активным илом легко биоразложимых органических веществ. На основе методов теории чувствительности находятся характеристики параметрической идетифицируемости модели и определяется подмножество идентифицируемых с достаточной точностью параметров модели. Уточняются значения параметров, найденных методом сканирования.

Введение

Очистка сточных вод является одной из наиболее важных задач рационального природопользования. В 1986 г. группой исследователей под руководством М. Хенце (M. Henze) была предложена модель процесса биоочистки (ASM1) (Henze et. al., 1986), которая несёт методологический характер и задает направления дальнейших исследований. На основе модели (Henze et. al., 1986), используя компартментальный подход, авторами в (Кириллов и др., 2013) предложена модель процесса биоочистки с пороговыми функциями в правых частях. В данной работе, в отличии от работы (Кириллов и др., 2013), для более адекватного описания процесса биоочистки предлагается модель с переменной структурой. Решается задача параметрической идентификации.

Математическая модель и параметрическая идентификация

В работе рассмотрен аэротенк-смеситель, который точки отбора проб разделяют на компартменты. Для описания процесса биоочистки предложена система дифференциальных уравнений (1). Причём выбор уравнений из системы (1) для каждого компартмента обусловлен спецификой процесса биоочистки и очистных сооружений г. Петрозаводска.

$$
\begin{aligned}
&\dot{S}_S = Q(S_S^{in} - S_S) - \frac{\mu_H}{Y_H} f(S_S, K_S) f(S_O, K_{O,H}) \frac{1}{1+e^{10^6(\frac{c+\delta}{S_S}-1)}} X_H,\\
&\dot{S}_{NH} = Q(S_{NH}^{in} - S_{NH}) - \frac{\mu_A}{Y_A} f(S_{NH}, K_{NH}) f(S_O, K_{O,A}) \frac{S_{NH}/(S_S - c)}{K_\alpha + S_{NH}/(S_S - c)} X_A,\\
&\dot{X}_H = Q(X_H^{in} - X_H) + \left(\mu_H f(S_S, K_S) f(S_O, K_{O,H}) \frac{1}{1+e^{10^6(\frac{c+\delta}{S_S}-1)}} - b_H \right) X_H, \qquad (1)\\
&\dot{X}_A = Q(X_A^{in} - X_A) + \left(\mu_A f(S_{NH}, K_{NH}) f(S_O, K_{O,A}) \frac{S_{NH}/(S_S - c)}{K_\alpha + S_{NH}/(S_S - c)} - b_A \right) X_A,\\
&\dot{S}_S = -\frac{1}{1+e^{10^6(\frac{c+\delta}{S_S}-1)}} X_H, \qquad \dot{X}_H = \beta \frac{V_{cv}}{V_{il}} X_H,
\end{aligned}
$$

где Q – суммарный расход смеси ила и сточной воды, V_{cv} и V_{il} – расходы сточной воды и активного ила, соответственно.

Обозначения: S_O – растворённого кислорода. Концентрации на входе и выходе из

компартмента, соответственно: S_S^{in}, S_S – растворённых органических веществ; S_{NH}^{in}, S_{NH} – растворённого азота в аммонийной форме; X_H^{in}, X_H – гетеротрофных микроорганизмов; X_A^{in}, X_A – автотрофных микроорганизмов.

Параметры: K_S – константа полунасыщения гетеротрофов органическими веществами; K_{NH} – константа полунасыщения автотрофов аммонием азота; $K_{O,H}$ – константа полунасыщения гетеротрофов кислородом; $K_{O,A}$ – константа полунасыщения автотрофов кислородом; Y_H – константа перехода массы органического субстрата в биомассу гетеротрофов; Y_A – константа перехода массы аммония азота, в биомассу автотрофов; b_H – скорость распада гетеротрофов; b_A – скорость распада автотрофов; μ_H – максимальная скорость роста гетеротрофов; μ_A – максимальная скорость роста автотрофов, β – скорость роста гетеротрофов за счёт окисления субстрата, не являющегося легко биоразложимой органикой.

Используя методы теории чувствительности (Brun et. al., 2002), находятся характеристики идетифицируемости параметров (меры чувствительности рассматриваемого функционала к изменению параметров, индексы коллинеарности и меры детерминантов) и подмножество параметров, идентифицируемых с достаточной точностью. На основе (Chai, 2008) решается задача параметрической идентификации. В связи с нехваткой экспериментальных данных использован метод сканирования, результатом которого является вектор параметров, минимизирующий функционал $J = \sum_{i=1}^{n_y} sc_i (y_i - y_i^m)^T (y_i - y_i^m)$, где y_i, y_i^m – экспериментальные и модельные данные, соответственно, sc_i – величина обратная к средней концентрации y_i в конкретном компартменте. Значения параметров уточнены с помощью функций чувствительности.

Выводы

Для описания процесса биоочистки в проточной биосистеме предложена математическая модель с переменной структурой, учитывающая окисление органики, аммония азота и динамику биомассы активного ила. Выбор тех или иных уравнений предложенной модели в каждом конкретном компартменте обусловлен спецификой процесса биологической очистки.

По имеющимся экспериментальным данным найдены характеристики параметров, определяющие возможность идентификации подмножества параметров. С использованием методов теории чувствительности уточнены значения параметров, полученные методом сканирования.

Литература

Кириллов А. Н., Рейсс Т. В., Смирнов Н. В. Математическое моделирование процессов нитрификации и окисления органических веществ в проточной биосистеме // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». - 2013. - № 4 (133). - С. 105-109.

Brun R., Kühnii M., Gujer W. et al. Practical identifiability of ASM2d parameters – systematic selection and tuning of parameter subsets. //Water Research. - 2002. - № 36. - P. 4113-4127.

Chai Q. Modeling, Estimation, and Control of Biological Wastewater Treatment Plants. Doctoral Theses at NTNU 2008:108 at HiT, Porsgrunn. Telemark University College. - 2008.

Henze M., Grady C. P. L., Gujer W. et al. Activated sludge model no. 1. Scientific and Technical Report 1, IAWPRC Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment Processes. IAWPRC, London. - 1986.

E2E-МОДЕЛИ: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ НАУКИ В ЗАДАЧАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Суховольский В.Г.

Институт леса им.В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия
soukhovolsky@yandex.ru

Аннотация. В настоящей работе рассматриваются возможности описания и моделирования экологических процессов с помощью методов экономических наук. Обсуждаются условия, при выполнении которых возможно эффективное использование E2E-моделей, границы применимости экономического подхода к описанию экологических процессов.

Как экономика, так и экология изучают, в сущности, одно и то же: закономерности распределения редких ресурсов в системе (Самуэльсон, 1993). Однако существуют различия в подходах и методах, используемых в этих науках.

Объекты, описываемые в экономике, характеризуются наличием у них свободы выбора поведения и стремлением к максимизации полезности результатов выбранных решений. Доступность используемых ресурсов в экономике характеризуется таким универсальным показателем, как цена.

При описании экологических объектов предполагается их либо детерминированное, либо хаотическое поведение, регулируемое системами положительных и отрицательных обратных связей, сводящих к минимуму возможности описания свободного поведения особей и популяций в экосистемах и описание выбора ими стратегий, минимизирующих риски гибели особей и популяций.

Тем не менее, возможно описать процессы, происходящие в экосистемах, с точки зрения экономических теорий и моделей (Суховольский, 2004). В частности, подход, связанный с использованием «леонтьевских» матриц «затраты - выпуск» и мультипликатора Кейнса, развивает B.Fath и его коллеги для описания потоков вещества и энергии в пищевых пирамидах и цепях (Chen et al., 2011).

В настоящей работе рассматриваются возможности описания с помощью экономических подходов таких экологических процессов, как рост растений, потребление корма животными, распределение кормового ресурса между популяциями в сообществе с учетом доступности и качества этого ресурса, вариации видового состава и видового обилия в экосистеме.

Для описания этих процессов вводятся экологические аналоги модели оптимального экономического роста (Solow, 2007), модели оптимального выбора товаров потребителями (Хикс, 1988), модель распределения богатств в обществе (Парето, 1997; Mandelbrot, 2004), модель оптимизации биржевого портфеля брокерами на фондовой бирже (Markowitz, 1959).

Обсуждаются условия, при выполнении которых возможно эффективное использование E2E-моделей, границы применимости экономического подхода к описанию экологических процессов.

Работа поддержана РФФИ (грант № 11-04-00173).

Литература

Самуэльсон П.А. Экономика. М.: Алфавит, 1993. – 430 с.

Solow R. The last 50 years in growth theory and the next 10 // Oxford Review of Economic Policy. - 2007. - V. 23. N 1. - P. 3–14.

Хикс Д. Стоимость и капитал. - М.: Прогресс, 1988.- 488 с.

Парето В. Компендиум по общей социологии //Антология мировой политической мысли: В 5 т. М., 1997. Т. II. С. 59—67.

Мандельброт Б. Фракталы, случай и финансы. - М.- Ижевск: РХД, 2004. – 256 с.

Суховольский В.Г. Экономика живого. Новосибирск: Наука, 2004. – 140 с.
Chen S, Fath B.D., Chen B. Information-based Network Environ Analysis: A system perspective for ecological risk assessment// Ecological Indicators. – 2011. - v. 11. - p. 1664–1672.
Markowitz H.M. Portfolio Selection. Efficient diversification of investments. - N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1959. – 356 p.

ПЕРМАНЕНТНЫЕ ВСПЫШКИ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ: АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ДИНАМИКИ

Суховольский В.Г.[1], Тарасова О.В.[2], Красноперова П.А.[2]

[1]*Институт леса им.В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия*
soukhovolsky@yandex.ru
[2]*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*
olvitarasova2010@yandex.ru

Аннотация. Предложена математическая модель популяционной динамики видов лесных насекомых, дающих перманентные вспышки массового размножения; оценено влияние регулирующих и модифицирующих факторов на популяционную динамику таких видов.

Настоящая работа посвящена анализу популяционной динамики видов, дающих перманентные вспышки массового размножения. Для перманентных вспышек массового размножения на кривых популяционной динамики лесных насекомых практически отсутствует фаза стабильно–разреженной плотности: из фазы депрессии с минимальной плотностью особей популяция сразу же переходит в фазы подъема численности и максимума вспышки (Исаев и др, 2001). В этом случае во временном ряде популяционной динамики наблюдаются устойчивые циклические колебания плотности.

В качестве объектов анализа рассмотрены популяции серой лиственничной листовертки Zeiraphera griceana Hbn. в швейцарских Альпах (рисунок 1) и непарного шелкопряда Lymantria dispar L. на территории Южного Урала.

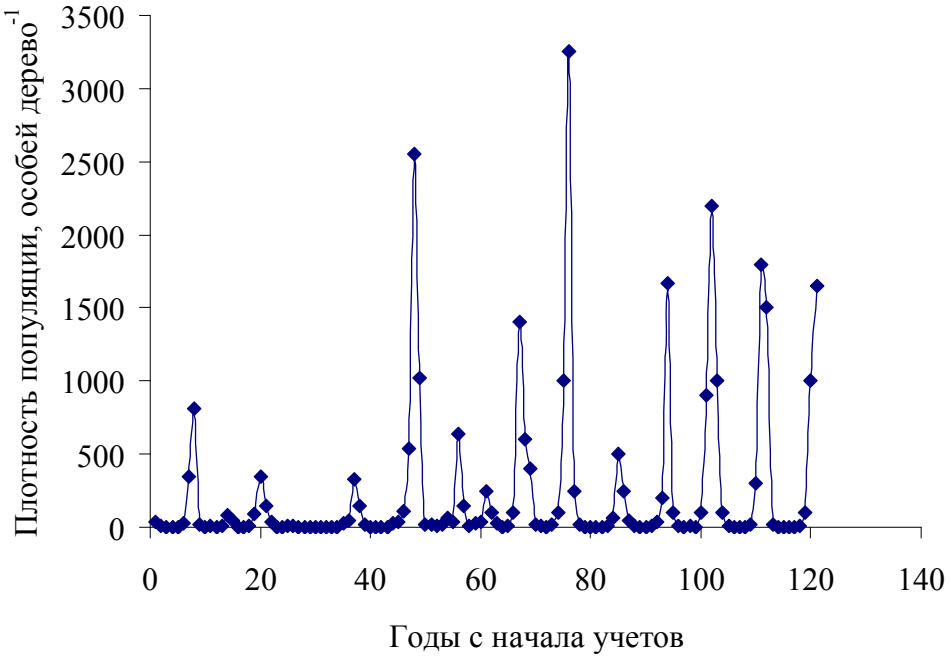


Рисунок 1 - Динамика численности серой лиственничной листовертки.

В задачи работы входили: анализ особенностей популяционной динамики и характера циклических колебаний плотности популяций, дающих перманентные вспышки массового размножения, исследование связей между погодными показателями и характеристиками плотности популяций, оценка изменчивость типа вспышек у этого эруптивного вида.

Проведенный анализ показал, что закономерности популяционной динамики и развития вспышек массового размножения видов, дающих перманентные вспышки, хорошо объясняются, исходя из представлений о ведущей роли плотностно-зависимых факторов в

регуляции динамики. Погодные факторы также оказывают определенное влияние на изменение плотности популяций этих видов, однако их воздействие существенно меньше воздействий плотностно-зависимых факторов и лесорастительных условий. В связи с этим представляется, что фактором, определяющим именно перманентный тип вспышки массового размножения, является быстрая регенерация кормовых ресурсов – листьев березы или хвои лиственницы после их повреждения гусеницами насекомых и восстановление устойчивых фенологических циклов онтогенеза листвы (Пономарев и др, 2012; Baltensweiler et al., 1977).

На основе изученных закономерностей популяционной динамики предложена математическая модель популяционной динамики видов, дающих перманентные вспышки массового размножения и даны оценки влияния регулирующих и модифицирующих факторов на популяционную динамику таких видов.

Для вида с перманентными вспышками массового размножения достаточно просто прогнозировать будущее поведение популяции. Уже только информация о плотностях популяции непарного шелкопряда в течение двух лет позволяет достаточно точно оценить будущую плотность популяции и тенденции ее изменения в течение следующих двух - трех лет. «Вклад» погодных факторов для популяции непарного шелкопряда на Южном Урале составляет 10-15% от общего воздействия регулирующих и модифицирующих факторов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 11-04-00173-а).

Литература

Исаев А.С., Хлебопрос Р.Г., Недорезов Л.В., Кондаков Ю.П., Киселев В.В., Суховольский В.Г. Популяционная динамика лесных насекомых. М.: Наука, 2001. - 374 с.

Пономарев В.И., Ильиных А.В., Гниненко Ю.И., Соколов Г.И., Андреева Е.М. Непарный шелкопряд в Зауралье и Западной Сибири. Екатеринбург: УрО РАН, 2012.- 320 с.

Baltensweiler W., Benz G., Boney P., Delucci V. Dynamics of larch bud moth population // Ann. Rev. Entomol. – 1977. - V.22. P. 79–100.

«МИНИМАЛИСТИЧНАЯ» МОДЕЛЬ ВОДНОГО РЕЖИМА РАСТЕНИЯ

Топаж А.Г. [1], Гурин П.Д.[1]
[1] *Агрофизический НИИ Россельхозакадемии, Санкт-Петербург, Россия*
topaj@hotmail.ru

Аннотация: Предложен оригинальный алгоритм физиологически-обоснованного описания водного стресса в растении. Он учитывает интегральные эффекты влияния недостатка влаги на интенсивность процессов ассимиляции (через регуляцию проводимости устьиц) и на физический распад листовой биомассы. Показано, что включение в модель только двух этих механизмов позволяет обеспечить адекватное поведение модельного растения в условиях засухи различной интенсивности, то есть является достаточным уровнем описания для стандартной модели агроэкосистемы.

1. Введение

Вода служит фундаментальным условием обеспечения нормальной физиологической активности и транспортных процессов в растении и является основным лимитирующим фактором в растениеводстве. Адекватное описание водного стресса и его влияния на рост и развитие растений выступает необходимым условием при построении математических моделей продукционного процесса как дикорастущих, так и сельскохозяйственных растений, то есть как в экологическом, так и в агроэкологическом моделировании. А требование универсальности и потенциальной адаптируемости для широкого спектра почвенно-климатических условий обуславливает необходимость построения соответствующих моделей на феноменологическом уровне описания, то есть без использования эвристических регрессионных соотношений, допускающих только логическую, но не физическую интерпретацию (Полуэктов и др., 2000).

Анализ существующих моделей роста растений показывает, что как количество рассматриваемых эффектов влияния водного стресса на рост и развитие растений, так и число существующих подходов к их математическому описанию исключительно велико (Saasendran et al., 2008). При этом в большинстве из них превалирует именно эмпирический (регрессионный) подход. Задача стоит в создании такого алгоритма имитации водного стресса, в котором достаточная точность и прозрачность описания достигалась бы с помощью минимального количества рассмотренных феноменов (принцип «бритвы Оккама»). В анонсируемой работе описывается прототип подобной модели, разработанной в лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического НИИ.

2. Материалы и методы

Традиционно, наибольшее внимание в моделях продуктивности уделяется описанию негативного влияния водного стресса на процессы ассимиляции, в основном - на уменьшение интенсивности фотосинтеза и газообмена. Взаимосвязь водного режима и газзобмена осуществляется через понятие устьичной проводимости. С помощью устьиц растение одновременно управляет двумя процессами жизнедеятельности: через них поступает углекислота, необходимая для обеспечения процесса фотосинтеза и, в то же время, происходит испарение (транспирация) водяного пара. При этом оказывается невозможным контролировать потоки углекислого газа и воды раздельно – для их транспорта используется один и тот же канал, перекрываемый одними и теми же клапанами. Последнее дает широкие возможности для построения физиологически-обоснованной модели влияния водного стресса (то есть недостаточного уровня транспирации) на замедление темпов фотосинтеза. Принципиальная цепочка причинно-следственных связей выглядит следующим образом: снижение доступности почвенной влаги ведет к уменьшению корневого поглощения - недостаточный транспорт влаги из корневой системы не позволяет растению обеспечить

потенциальную интенсивность транспирации – снижение транспирации до допустимого уровня обеспечивается закрытием устьиц листьев – повысившееся устьичное сопротивление замедляет транспорт углекислоты из прилистного пространства к реакционным центрам листа – дефицит углекислого газа лимитирует нетто-ассимиляцию первичных углеродных соединений в процессе фотосинтеза. Математические модели всех перечисленных явлений записываются в виде поточно-балансовых уравнений энерго-массообмена. Они достаточно хорошо обоснованы и изучены. Определенные трудности для замыкания полученной системы уравнений вызывает только установление зависимости между водным потенциалом растения (определяющим интенсивность корневого поглощения) и устьичной проводимостью. Во многих реализациях, например в классической работе (Полуэктов и др., 1997) принята гипотеза о том, что устьичное сопротивление явно зависит от водного потенциала. Однако, многочисленные экспериментальные исследования доказывают, что определяющим фактором в управлении устьицами выступают не гидравлические, а гормональные сигналы, а прямой причинно-следственной связи между потенциалом листа и степенью открытия устьиц нет. Тогда для замыкания системы уравнений «транспирации - корневое поглощение» можно воспользоваться «телеономическим» подходом, основанном на идее, предложенной в (Mäkelä et al, 1996). При этом динамика устьичного сопротивления (транспирации) ищется как решение вариационной задачи о максимизации интегральной ассимиляции за засушливый период. Несмотря на простоту исходных посылок, указанный подход позволяет получить достаточно нетривиальные результаты, в частности, объяснить широко известный эффект полуденной депрессии фотосинтеза.

Более того, в рамках той же формализации оказывается возможным не только описать негативное влияние засухи на ассимиляцию, (то есть, в конечном счете, на прирост биомассы), но и получить простейшую модель завядания и некроза, то есть физического распада сформировавшихся ранее листьев. Основная гипотеза здесь заключается в рассмотрении специального порогового значения для величины водного потенциала растения – уровня «минимального комфорта». При этом, если гипотетическая величина потенциала листа, вычисленная из системы уравнений водного баланса растения, оказывается меньше этого порога (условия сильной засухи), то в модели производиться искусственное «отторжение» такой части имеющейся листовой биомассы, чтобы обеспечить оставшимся листьям возможность существования в минимально допустимых условиях. Подобный принцип «пожертвовать частью, чтобы обеспечить выживание целого» вполне согласуется с наблюдаемым в реальности поведением растения в условиях сильной засухи.

3. Результаты и выводы

Кратко описанный выше метод моделирования водного режима растения реализован и исследован в рамках прикладной модели продукционного процесса растений AGROTOOL. Верификация полученной модели для различных почвенно-климатических условий и сельскохозяйственных культур позволяет сделать следующие выводы:

- Механизм влияния степени влагообеспеченности растения на темпы фотосинтеза через устьичную проводимость оказывается достаточным для полного описания негативного влияния засухи на процессы ассимиляции (роста растений).
- Для растений, произрастающих в аридных регионах, эффект замедления или даже полного прекращения ростовых процессов не может адекватно отразить всю степень негативного влияния сильной засухи на продукционный процесс. В этом случае необходимо заложить в модель явный эффект некроза и завядания накопленной зеленой биомассы. Предложенный подход, основанный на рассмотрении критической величины потенциала листа, позволяет описать данные явления с приемлемым уровнем правдоподобия.

Учет двух описанных факторов позволяет построить подмодель водного режима растения, способную отразить влияние недостаточных условий влагообеспеченности с уровнем точности, достаточным для построения комплексной модели экосистемы.

Литература

Полуэктов Р.А., Опарина И.В., Топаж А.Г., Миршель В. Адаптируемость динамических моделей агроэкосистем к различным почвенно-климатическим условиям, // Математическое моделирование, 2000. т. 12, № 11, стр. 3–16.

S. A. Saseendran, L. R. Ahuja, L. Ma, D. Timlin, C. O. Stöckle, K. J. Boote and G. Hoogenboom. Current Water Deficit Stress Simulations in Selected Agricultural System Models. In: Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes. Advances in Agricultural Systems Modeling Series 1. 2008. ASA, CSSA, SSSA, 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA. P. 1-38.

Полуэктов Р.А., Кумаков В.А., Василенко Г.В. Моделирование транспирации посевов сельскохозяйственных растений. // Физиология растений. 1997 г., № 1-2, с. 68-72.

Mäkelä A, Berninger F, Hari P. 1996. Optimal control of gas exchange during drought: Theoretical Analysis. Annals of Botany 77: P. 461-467

СПОСОБЫ ОБОСНОВАНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ПОПУЛЯЦИИ ЛЕММИНГОВ

Тращеев Р.В.[1], Саранча Д.А.[2]

[1]*Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Россия*
tslav85@mail.ru
[2]*Вычислительный центр им. А.А.Дородницына РАН, Москва, Россия*
saran@ccas.ru

Аннотация: Предложен комплексный метод исследований, включающий в себя полный набор операций, объединяющий формальные и неформальные методы, имитационные и аналитические подходы. Метод позволяет строить и обосновывать аналитические модели на базе исходной имитационной модели.

1 Метод комплексных исследований

Эколого-биологическая область может считаться одним из лидеров в поисках эффективных способов применения точных методов в междисциплинарных исследованиях. Уже первые модели А.Лотки и В.Вольтерра показали свою эффективность в решении биологически значимых задач. Но ограниченные возможности аналитических (докомпьютерных) методов не позволили развить этот успех.

Появление «системной динамики» Дж.Форрестера (Форрестер, 1978) – метода создания имитационных моделей существенно увеличило возможности междисциплинарных взаимодействий. Имитационная технология позволяет учитывать практически все пожелания экспертов в количественной и/или качественной форме, обеспечить необходимый уровень детализации, эффективно подойти к пониманию сути описываемого явления и выражению этого понимания в форме математической модели.

Но с помощью чисто имитационных средств затруднительно получить удовлетворительное описание изучаемого явления, выделить его ведущие механизмы даже при создании идеальных условий для междисциплинарных взаимодействий. Привлекательно выглядит сочетание имитационных и аналитических подходов.

Поиск способов реализации таких сочетаний привел к формированию комплексных исследований (КОИС) [Глушков, 2013], включающих в себя полный набор операций:

- Сбор и анализ исходной биологической информации;
- Построение детальной имитационной модели в диалоге с экспертами, и анализ её свойств;
- Построение и обоснование аналитической модели на основе аппроксимации вычислительных экспериментов с имитационной моделью, анализ её свойств;
- Формирование имитационной системы – набора взаимосвязанных моделей разной степени детализации, включающей в себя упрощенные - аналитические модели;
- Формулирование на основе этих моделей гипотез о ведущих механизмах исследуемого явления.

2 Модель растительность – лемминги – песцы

Данный метод был реализован при построении модели растительность – лемминги – песцы (РЛП) (Саранча, 1997, Saranchа, 2012).

В результате вычислительных экспериментов с моделью РЛП были получены разнообразные динамические режимы, характерные для тундры колебания численности леммингов и песцов.

Неудовлетворенность традиционным окончанием исследований имитационных моделей – прогнозом динамических характеристик модели при различных сценариях внешних воздействий (Саранча, 1997), и стремление приблизиться к пониманию механизмов формирования динамики численности тундровых животных привели к созданию модели популяции леммингов (Форрестер, 1978), определяющей характер колебаний численности животных тундрового сообщества. Это дало возможность обосновать в качестве упрощенной модели одномерное разностное уравнение, связывающее численности леммингов (ведущего блока в модели РЛП) в двух соседних годах (Саранча, 1997).

Разностное уравнение позволило определить в исходной имитационной модели области параметров, обеспечивающие динамические режимы изменения численностей популяций близкие к наблюдаемым в природе. И сформулировать гипотезы о ведущих механизмах, определяющих колебания численности тундровых животных.

Литература

Саранча Д.А. Количественные методы в экологии. Биофизические аспекты и математическое моделирование. М.: МФТИ, 1997. 283 с.

Форрестер Дж. Мировая динамика. М.: Мир, 1978. 234 с.

Глушков В.Н., Саранча Д.А. Комплексный метод математического моделирования биологических объектов // А и Т. 2013. N 2. С. 94-108.

D. A. Sarancha, O. P. Lyulyakin, R. V. Trashcheev. Interaction of simulation and analytic methods in modelling of ecological and biological objects. "Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling", 2012, Vol. 27, No. 5, pp. 479–492.

ПРИНЦИПЫ СТРУКТУРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НАЗЕМНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ ВИДОВОГО БОГАТСТВА РАСТЕНИЙ ДЕЛЬТЫ АМУ-ДАРЬИ)

Трофимова Г.Ю.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия
t_g_yu@mail.ru

Аннотация: сокращение речного стока, поступавшего в дельту Аму-Дарьи через створ Саманбай, привело к изменениям в структуре экосистемы дельты и её функционировании. Анализ изменений в структуре видового богатства растений дельты Аму-Дарьи с 1947 по 1989 г. позволил выявить принципы конкуренции и сосуществования, лежащие в основе структурной устойчивости флоры наземной экосистемы дельты.

На основе анализа гидрологических данных по створам дельты Аму-Дарьи была выделена последовательность временных периодов (1944–1960, 1961–1970, 1971–1977, 1978–1981, 1982–1989 гг.), которой соответствует убывающая последовательность средних значений речного стока (Трофимова, 2008). Каждый выделенный период был рассмотрен как зона нормальной жизнедеятельности (зона оптимума) для некоторого конечного набора видов растений. Видовое богатство растений и видовое богатство травянистых растений дельты Аму-Дарьи были описаны формулами 1 и 2 (Трофимова, 2009):

$$\frac{T_1+T_2}{H_1+H_2}=\frac{T_1}{T_2}, \qquad (1)$$

$$\frac{\min(H_1,H_2)}{\max(H_1,H_2)}\approx\frac{2}{3}, \qquad (2)$$

где T_1 – число полудревесных видов растений в периоде, T_2 – число древесных видов растений в периоде, H_1 – число одно- и двулетних видов трав в периоде, H_2 – число многолетних видов трав в периоде.

Формулы 1 и 2, являющиеся структурными инвариантами, оставались неизменными на протяжении 1947–1981 гг. Следовательно, структурно-функциональная организация видового богатства растений дельты Аму-Дарьи обладала устойчивостью на протяжении 1947–1981 гг. Динамика структурных составляющих флоры дельты Аму-Дарьи (формула 1) представлена на рисунках 1 и 2 (Трофимова, 2012). Кривые зависимостей видового богатства древесных растений и видового богатства полудревесных растений по разным периодам демонстрируют колебания сосуществования (рисунок 1). Кривые зависимостей видового богатства одно- и двулетних травянистых растений и видового богатства многолетних травянистых растений (формула 1) по разным периодам демонстрируют конкурентные колебания (рисунок 2).

Видовому богатству травянистых растений дельты Аму-Дарьи, обладающему структурной устойчивостью (формула 2), также соответствуют конкурентные колебания и колебания сосуществования между структурными составляющими H_1 и структурными составляющими H_2 . Для доказательства представим видовое богатство травянистых растений каждого периода в виде $M_1 \bigcup M_2$, где M_1 – множество травянистых галофитов и солеустойчивых эфемеров и эфемероидов, а M_2 – множество остальных видов трав. В каждом множестве по каждому периоду определим число видов одно- и двулетних трав, обозначенное через $H_1(M_i), i=1,2$, и число видов многолетних трав, обозначенное через $H_2(M_i), i=1,2$. Динамика структурных составляющих $H_1(M_i), i=1,2$ и $H_2(M_i), i=1,2$ представлена на рисунках 3 и 4 (Трофимова, 2012).

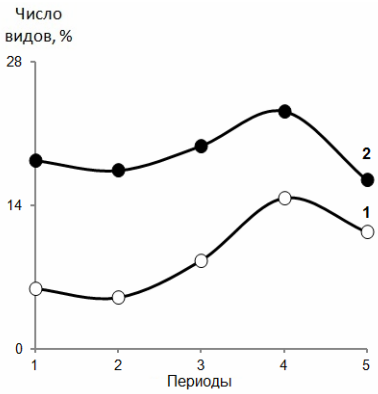


Рисунок 1 - Динамика древесных и полудревесных видов растений:
$1 - T_1; 2 - T_2$.

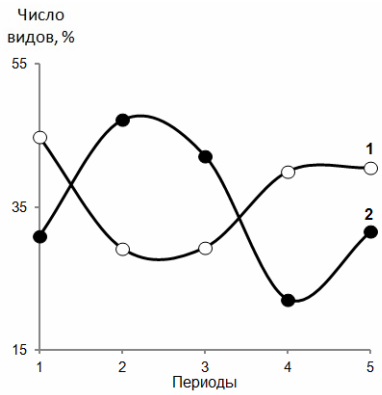


Рисунок 2 - Динамика одно- и двулетних видов трав и многолетних видов трав:
$1 - H_1; 2 - H_2$.

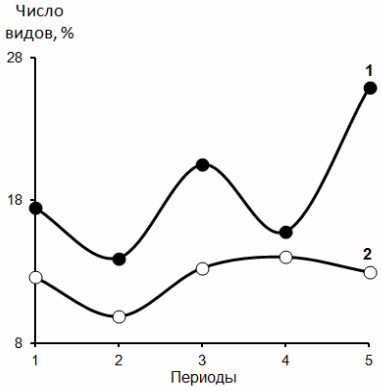


Рисунок 3 - Динамика многолетних видов трав множества M_1 и одно- и двулетних видов трав множества M_2:
$1 - H_2(M_1); 2 - H_1(M_2)$.

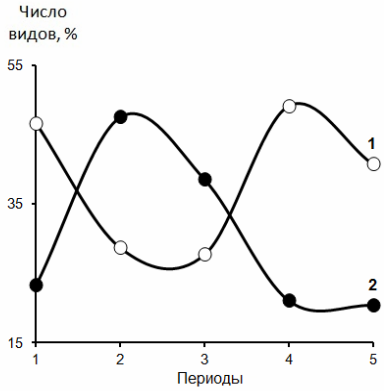


Рисунок 4 - Динамика одно- и двулетних видов трав множества M_1 и многолетних видов трав множества M_2:
$1 - H_1(M_1); 2 - H_2(M_2)$.

Кривые зависимостей $H_1(M_2)$ и $H_2(M_1)$ демонстрируют колебания сосуществования на протяжении 1947–1977 гг. (рисунок 3). Кривые зависимостей $H_1(M_1)$ и $H_2(M_2)$ демонстрируют конкурентные колебания на протяжении 1947–1981 гг. (рисунок 4).

Вывод: впервые в наземной экосистеме структурная устойчивость флоры подтверждена законом конгруэнтного притяжения, сформулированным Г.Е.Михайловским (Михайловский, 1988) для водных экосистем: «…система, взаимодействие в которой сводится лишь к отталкиванию (принцип конкурентного исключения Гаузе) не может быть устойчивой и обречена на гибель. Для её стабилизации должны существовать и противоположные силы (принцип сосуществования)».

Литература

Михайловский Г.Е. Описание и оценка состояний планктонных сообществ. - М.: Наука, 1988. - 214 с.

Трофимова Г.Ю. Влияние речного стока Аму-Дарьи на количество кормовых видов растений в её дельте // Геогр. и природные ресурсы. - 2008. - № 1. - С.169-174.

Трофимова Г.Ю. Структурная устойчивость и стабильность флоры дельты Аму-Дарьи в условиях изменяющегося гидрологического режима территории (1947-1989 гг.) // Изв. Самарского научного центра РАН. - 2012. - Т. 14, № 1(7). - С.1864-1867.

Трофимова Г.Ю. Структурные инварианты видового богатства растений // ДАН. - 2009. - Т. 26, № 3. - С.427-429.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ БИОСФЕРЫ НА АНТРОПОГЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛОБАЛЬНОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА

Тарко А.М. [1], Усатюк В.В.[2]

[1]*ВЦ РАН, Москва, Россия*
tarko@himki.net
[2]*СУНЦ МГУ, Москва, Россия*
usatyuk@mail115.com

Аннотация: Разработана пространственная модель глобального биогеохимического цикла углерода в системе атмосфера–биота суши–океан с учётом антропогенных воздействий. Блок наземной биоты описывает динамику параметров продукционного процесса, вегетационных характеристик растительного покрова, газо- и водообмена в системе атмосфера–растительность–почва. Блок океана описывает динамику газообмена и продукционного процесса морской биоты в системе атмосфера–океан. Блок антропогенных воздействий описывает эмиссию CO_2, обусловленную хозяйственной деятельностью человека. При исследовании пространственно-временной динамики концентрации атмосферного CO_2 выявлено наличие паттернов распределения концентрации CO_2 над районами суши, занятыми высокопродуктивными лесными экосистемами. Проведены вычислительные эксперименты по изучению зависимости характеристик паттернов от вариации климатических параметров и антропогенной нагрузки.

Представленная в работе модель является расширенной версией модели глобального цикла углерода, изложенной в предыдущих работах авторов (Тарко, Усатюк 2013). Модель описывает продукционные процессы наземных и водных экосистем, с учётом сезонного хода климатических параметров и антропогенных воздействий. Модель состоит из 4 блоков: наземной биоты, океана, атмосферного переноса и антропогенных воздействий. Основное пространственное разрешение 4°×5° географической сетки, шаг по времени 1 сутки.

Блок наземной биоты рассчитывает интенсивности продукционного процесса растительного покрова и почвенного дыхания, динамику массы разных фракций биомасы растений, водный режим верхнего слоя почвы. Поверхность суши разбита на ячейки 4°×5°. Каждая ячейка занята типом экосистемы согласно классификации (Базилевич, Родин 1967). "Тип" экосистемы задаёт фенологическое поведение, определяя виды функций и диапазоны значений. Растительный покров характеризуется количеством углерода на единицу площади в биомассе листьев, стволов, корней, ассимилятов, гумусе, влажностью почвы. Для каждой ячейки моделируются физиологические процессы растений: фотосинтез и накопление ассимилятов, дыхание, рост и отмирание органов, эвапотранспирация, приток углерода в почву и почвенное дыхание. Климат характеризуется суточными значениями температуры и влажности воздуха, количеством осадков, скоростью ветра, концентрацией CO_2 в воздухе, облачностью, длительностью светового дня, интенсивностью света на поверхности земли.

В блоке океана используется модель глобального цикла углерода в системе атмосфера-океан (Перванюк, Тарко 2001). Поверхность Мирового океана разделена на неравные области, разбиение основано на современной картине океанических течений. По глубине океан разбит на 3 слоя (ВКС, термоклин, глубинный слой). Рассчитываются газообмен на границе атмосфера-океан, накопление и перенос углерода между слоями и областями океана, а также продукционные процессы морской биоты (Алексеев и др. 1998).

Блок атмосферного переноса рассчитывает перераспределение CO_2 в атмосфере, для чего используются данные полей скоростей и переноса масс воздуха, рассчитываемые на модели общей циркуляции атмосферы и океана (Пархоменко 1988).

Блок антропогенных воздействий имитирует антропогенные потоки CO_2 в атмосферу, для чего используются данные о годичном потреблении топлива в разных странах, вырубке лесов и эрозии почв. В модели интенсивность антропогенных выбросов CO_2 неоднородна по пространству, но в каждой точке постоянна по времени в течение года.

Идентификация блока наземной биоты проводилась в 2 этапа. Сперва подбирались функции, задающие фенологические процессы, путём сравнения результатов моделирования выбранных экосистем с натурными данными из работы (Цельникер и др. 1993). На этапе настройки единой модели использовались глобальные карты продуктивности и запасов фитомассы (Базилевич, Родин 1967), (Базилевич и др. 1968) и зависимости из (Тарко 2005).

Исследование пространственно-временной динамики концентрации CO_2 в атмосфере выявило наличие специфических паттернов над некоторыми регионами; это характерные изменения динамики, устойчивые к ограниченной вариации климатических параметров. Паттерны выделены на карте значений локальных годичных минимумов концентрации CO_2 (рис.1, слева), и карте времени достижения локальных годичных минимумов (рис.1, справа).

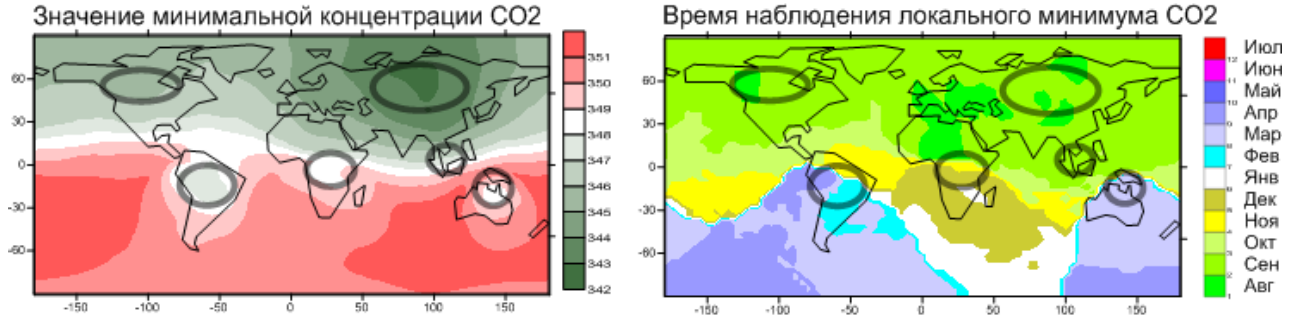


Рисунок1 - Динамика концентрации CO_2 на карте распределения значений локальных годичных минимумов концентрации CO_2 (слева) и карте времени достижения локальных годичных минимумов (справа). Значения концентрации CO_2 соответствуют модельному году 1990.

Наиболее быстрое снижение концентрации CO_2 происходит в области 50°-60°СШ, абсолютное значение минимума достигается над таёжными регионами Сибири и Канады в конце июля–начале августа. Последующая картина распределения концентрации в целом подчиняется общему правилу, что значение локального минимума концентрации CO_2 строго возрастает при продвижении на юг, а время его достижения увеличивается примерно на 1 месяц на каждые 20°-30° широты. Это правило нарушается в районах переменно-влажных лесов Южной Америки, Африки, Индокитая и Индонезии, что хорошо видно на картах значений локальных минимумов и времени дистижения минимумов (рис.1). Также, в области 40°-60°СШ минимум концентрации над районами Атлантического океана наступает на 2-4 недели позже, чем над континентальными районами Америки и Европы. Величина отставания зависит от поля скоростей воздушных масс. Эффект подтверждается данными измерений концентрации CO_2 в атмосфере на станциях мониторинга. Вычислительные эксперименты показали, что указанные паттерны сохраняются при ограниченном изменении климатических параметров. Характеристики паттернов, величина минимума и время его достижения, определяются интенсивностью продукционного процесса растительности суши.

Влияние антропогенных выбросов на динамику концентрации CO_2 проявляется в основном как “сдвиг вверх” локального значения концентрациив течение всего года. Для ряда регионов рассчитана величина "антропогенного сдвига".

Литература

Тарко А. М., Усатюк В. В. Моделирование глобального биогеохимического цикла углерода с учётом сезонной динамики и анализ динамики концентрации CO_2 в атмосфере // ДАН, 2013, том 448, № 6, с. 1–4

Базилевич Н.И., Родин Л.Е. Картосхемы продуктивности биологического круговорота главнейших типов растительности суши // Изв.Всесоюзного Географического о-ва.- 1967.- Т. 99.- N 3.- С. 190-194.

Базилевич Н.И., Дроздов А.В., Родин Л.Е. Продуктивность растительного покрова Земли, общие закономерности размещения и связь с факторами климата // Журн.общ.биол.-1968.-Т.29.-N3.-С.261-271.

Цельникер Ю.Л., Малкина И.С., Ковалев С.Н., Чмора С.Н., Мамаев В.В., Молчанов А.Г. Рост и газообмен CO_2 у лесных деревьев. М.: Наука. - 1993. - 253 С.

Пархоменко В.П. Верификация климатической модели.- М.: ВЦ АН СССР.- 1988.- 34 С.

Тарко А.М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. — М: Физматлит. 2005. — 232 с.

Перванюк В.С., Тарко А.М. Моделирование глобального цикла углерода в системе атмосфера - океан // Математическое моделирование, Т. 13, № 11, 2001. С.13-22.

Алексеев В.В., Рустамов Н.А., Нефедова Е.И. Модель сезонной динамики биомассы планктонного сообщества в океане // Журнал общей биологии. 1998, Т. 59, № 5, С. 498-511

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОШИБОК СРЕДНИХ МНОГОЛЕТНИХ И СРАВНЕНИЕ МНОГОЛЕТНИХ ДИНАМИК ПОКАЗАТЕЛЕЙ В ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ОПЫТАХ

Фрид А.С.

Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии. Москва. Россия
asfrid@mail.ru

Аннотация: ошибки средних многолетних в длительных полевых опытах имеют два источника и, соответственно, две составляющие варьирования: пространственное, определяемое различиями условий на делянках-повторностях опыта, и временно́е, определяемое различиями условий опыта в разные годы. Рассматриваются модели оценки этих составляющих и предлагается модель получения суммарной ошибки средних многолетних.

При анализе данных длительных полевых опытов возникает несколько возможных задач: оценить устойчивость эффектов доз факторов опыта (удобрений, мелиорантов, обработок и др.), оценить связи факторов опыта с изменением свойств почвы, сравнить многолетние средние для вариантов, выявить наличие многолетних трендов и т.д. Формулирование этих задач и предложения по их решению имеются в работах Щербы С.В., Томилова В.П., Короневского В.И., Ваулина А.В., Цыгуткина А.С. и др.

Основным камнем преткновения явилась оценка ошибок средних многолетних. Это связано с тем, что в реальных временны́х рядах мы имеем дело с наложением нескольких источников варьирования: природных длиннопериодных циклов в десятки и сотни лет, короткопериодных колебаний погодных условий, изменений сортов культур, технологий обработки почвы, агроистощения или повышения обеспеченности растений питательными веществами (при отрицательном или положительном их балансе), смены систем защиты растений, почвоутомления и т.д. На все это накладываются ежегодные колебания, как природного, так и антропогенного характера (Дмитриев, 1976). В результате ошибка многолетнего среднего для варианта опыта определяется не только пространственным варьированием между делянками-повторностями, но и варьированием между годами, то есть временны́м, причём хорошо известно, что, например, урожайности разных лет коррелируют между собой, а следовательно не могут образовывать выборку независимых величин. Значит, рассчитывать дисперсию между годами надо не обычным способом, а с помощью математического аппарата временны́х рядов.

Однако предложенные ранее подходы никак не учитывают этого обстоятельства и обобщают дисперсии разных лет как для независимых друг от друга выборок. Но даже при таком подходе существуют по крайней мере две группы предпосылок для обобщения, приводящих к разным оценкам, которые теоретически совпадают только при сильных упрощениях ситуации (если объёмы выборок во все годы опыта равны, что возможно, и если все ошибки средних для разных лет тоже равны, что невозможно). Расчёты для реальных опытов, проведённые нами, показали значительные расхождения разных способов обобщения ошибок средних (таблица 1), то есть неоднозначность таких оценок.

Примечание. 1-й способ обобщения ошибок средних предполагает, что для разных лет генеральные средние разные, а дисперсии одинаковые; 2-й способ – выборки разных лет принадлежат одной и той же генеральной совокупности. То же в таблице 2.

Таблица 1. Статистическое обобщение средних урожайностей и их ошибок за период 1944-1966 гг. для вариантов длительного опыта

Вариант	Зерновые единицы, ц/га			Кормовые единицы, ц/га		
	Среднее арифметическое	Способ обобщения ошибок средних		Среднее арифметическое	Способ обобщения ошибок средних	
		1	2		1	2
Контроль	23.3	0.40	0.16	28.4	0.49	0.20
NP	28.2	0.38	0.18	35.6	0.47	0.22
NP+K_x	33.1	0.78	0.22	41.5	0.91	0.32

На самом деле, обобщённые таким образом ошибки средних за годы опыта являются оценками пространственного варьирования, а оценки временно́го варьирования должны учитывать ковариации во временном ряду. Теоретическая формула для последней оценки относится к стационарным рядам. Чтобы приблизиться к ним, следует по крайней мере удалить временно́й тренд (даже незначимый), а затем оценить ковариации по некоторой части длины временно́го ряда. Однозначно зафиксировать эту часть длины ряда тоже не всегда удаётся, что и в этом случае создаёт неопределённость оценок.

Кроме того, следует отметить, что делянки-повторности для варианта не всегда оказываются случайными реализациями одной и той же временно́й динамики. Поэтому приходится сначала оценивать временну́ю составляющую ошибки средних многолетних для отдельных делянок, а только потом обобщать их для вариантов опыта.

Способ оценки суммарно́й ошибки средних многолетних для вариантов, включающей и пространственное и временно́е варьирование, нам не известен. Наше предложение – взять за основу формулу сложения дисперсий при отборе индивидуальных образцов с аналитическими повторениями (Джессен, 1985), где индивидуальным образцам соответствуют делянки-повторности, а аналитическим повторениям – годы опыта. Тогда после ряда преобразований получаем для суммарной ошибки

$$m\sum^2 = (1-\frac{n_{повт}}{N_{инд}})\cdot m_{дел}^2 \cdot m_{врем} + m_{врем}^2$$

где $m_{дел}$ и $m_{врем}$ – ошибки пространственного и временно́го варьирования, $n_{повт}$ – число повторностей в варианте, $n_{врем}$ – число лет опыта, $N_{инд}$ – количество всех делянок опыта. Результаты расчёта показаны в таблице 2.

Таблица 2. Суммарные ошибки средних многолетних урожайностей для вариантов длительного опыта

Вариант	Зерновые единицы, ц/га			Кормовые единицы, ц/га		
	Среднее арифметическое	Способ обобщения ошибок средних		Среднее арифметическое	Способ обобщения ошибок средних	
		1	2		1	2
Контроль	23.3	2.2 (34)	0.77 (11)	28.4	3.7 (63)	2.8 (90)
NP	28.2	2.9 (64)	2.4 (89)	35.6	4.2 (74)	3.6 (92)
NP+K_x	33.1	4.0 (20)	2.0 (74)	41.5	5.4 (42)	3.7 (85)

Обозначение. В скобках показана доля (%) временно́го варьирования в квадрате суммарной ошибки m_{Σ}^2.

Сравнение многолетних динамик показателей, как для отдельных делянок, так и для средних по вариантам возможно несколькими способами: методом сопряжённых выборок со статистической оценкой средней разности, методом оценки уровня сходства, сравнением

регрессионных моделей временных трендов с использованием и без использования суммарной ошибки средних многолетних.

Литература

Джессен Р. Методы статистических обследований. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 480с.
Дмитриев Е.А. Использование статистических методов при проведении режимных наблюдений // Принципы организации и методы стационарного изучения почв. – М.: Наука, 1976. – С.302-412.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ И РЕШЕНИИ НЕКОТОРЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ОБЩЕЙ БИОЛОГИИ.

Фрисман Е.Я.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт комплексного анализа региональных проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКАРП ДВО РАН), г. Биробиджан, Россия
frisman@mail.ru

Аннотация: Данное сообщение посвящено анализу роли математического моделирования при формировании и развитии базовых концепций общей биологии: теории естественного отбора, синтетической теории эволюции, теории экологического регулирования популяционной динамики. Обсуждаются некоторые подходы к синтезу популяционно-генетических и экологических идей, результаты анализа и моделирования популяционной динамики некоторых конкретных видов животных, обитающих в Дальневосточном регионе

В 1798 г Томас Мальтус опубликовал работу Essay on the Principle of Population, в которой привел обоснование модели, описывающей рост численности населения земли по геометрической прогрессии со знаменателем, названным в последствии мальтузианским параметром. Эта работа не только послужила основой для многих демографических и мировоззренческих концепций, но и стимулировала развитие основополагающих биологических теорий.

Так Чарльз Дарвин приводит и подробно анализирует модель Мальтуса в первой части своей знаменитой книги: On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favored Races in the Struggle for Life**,** а затем использует ее в качестве одного из обоснований своей концепции естественного отбора. Создатели синтетической «генетической» теории эволюции Р. Фишер, С. Райт, Дж. Холдейн и С.С. Четвериков, напрямую применяли модель Мальтуса, полагая мальтузианский параметр зависимым от генотипа, а основоположники теоретической экологии (динамической теории экосистем) Пьер Ферхюльст и Вито Вольтерра (а также Г.Ф. Гаузе) рассматривали модель Мальтуса, в которой этот параметр являлся функцией численности популяции (или нескольких численностей взаимодействующих популяций).

Таким образом, были сформулированы базовые концепции общей биологии, связанные с эволюцией и динамикой экосистем. Однако полного синтеза экологических и генетических представлений и концепций нет до сих пор. В данном сообщении мне бы хотелось обсудить некоторые подходы к синтезу генетических и экологических идей, а также результаты анализа и моделирования популяционной динамики некоторых конкретных видов животных, обитающих на Дальнем востоке России.

Эти исследования начинались во времена активного развития интересных отечественных школ математической биологии в Москве, Пущено и Ленинграде. Руководителями этих школ были яркие исследователи и организаторы науки: академик Н.Н. Моисеев, профессора А.М. Молчанов, Р.А. Полуэктов, Ю.М. Свирежев.

В Новосибирске была своя школа математических биологов, отчасти руководимая выдающимися людьми А.А. Ляпуновым и И.А. Полетаевым, но фактически созданная и выпестованная профессором В.А. Ратнером. Из этой школы вышли современные директора институтов СО РАН (Института цитологии и генетики и Института биофизики) академики Н.А. Колчанов и А.Г. Дегерменджи.

Во Владивостоке руководителем школы математической биологии был А.П. Шапиро, талантливый математик, выпускник Ленинградского университета. В начале 70–х годов прошлого века А.П. Шапиро сделал параллельно с исследователем Р.Мэем (уроженцем

Австралии, инженером по образованию, ставший физиком-теоретиком, а впоследствии британским экологом, лордом и Президентом Королевского научного общества Великобритании), важное открытие, связанное со сложной динамикой популяции, описываемой весьма простыми математическими моделями.

Данное сообщение посвящено анализу роли математического моделирования при формировании и развитии базовых концепций общей биологии: теории естественного отбора, синтетической теории эволюции, теории экологического регулирования популяционной динамики. Обсуждаются некоторые подходы к синтезу популяционно-генетических и экологических идей, а также результаты анализа и моделирования популяционной динамики некоторых конкретных видов животных, обитающих в Дальневосточном регионе. Приводятся результаты математического моделирования, объясняющие эволюционные закономерности возникновения сложных колебательных и хаотических режимов динамики численности, возрастной и генетической структуры экологически лимитированных популяций. Обосновываются и иллюстрируются биологически содержательные выводы, полученные в ходе моделировании динамики популяций важных промысловых видов животных Дальнего востока: пятнистого оленя, северного морского котика, маньчжурской белки и других.

Показано, что в отсутствии промысла характер динамики численности популяции определяется величиной репродуктивного потенциала и наличием ресурсов жизнедеятельности (прежде всего кормовых запасов). При небольшом и среднем репродуктивном потенциале колебания численности фактически отражают (с некоторым запаздыванием) колебания пищевых запасов. Такую динамику мы наблюдаем у кабана, изюбря и некоторых других копытных**.** При большом репродуктивном потенциале колебания численности становятся резче и определяются, в основном, плотностно-зависимыми факторами, а колебания запасов корма играют фоновую роль. Типичный пример белка и колонок.

Ведение промысла снижает остроту колебаний, связанную с повышенной плотностью, но сохраняет колебания, связанные с изменением в кормовой базе. Поскольку интенсивность промысла зависит от уровня численности, промысел может как «раскачивать» вынужденные колебания, так и приводить к резкому падению численности популяции вплоть до ее полного вырождения. Много примеров такого рода динамики промысловых запасов можно найти в статистике промыслового рыболовства.

На основе разработанных моделей может быть поставлена и исследована задача оптимизации размера промыслового изъятия из популяции. В ходе таких исследований показано, что оптимальная интенсивность промысла не должна превышать степени природного экологического лимитирования популяции. Даны количественно обоснованные нормы изъятия для каждой промысловой популяции на текущий сезон и рассчитаны такие лимиты, которые обеспечивают максимально возможный уровень изъятия при сохранении запаса устойчивости популяций при возможных неблагоприятных внешних воздействиях. Развитие данных подходов приведет к созданию новых стратегий использования промысловых биоресурсов и постепенному переходу от идеологии промысла к хозяйственному природопользованию.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ДВО РАН (конкурсные проекты 12-I-П28-02, 12-I-ОБН-05, 12-II-СО-06-019) и РФФИ (региональный проект 11-01-98512-р_восток_а).

КЛЕТОЧНО–АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ СООБЩЕСТВА ДВУХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ РАЗНЫХ ЖИЗНЕННЫХ ФОРМ

Фролов П.В., Зубкова Е.В., Комаров А.С.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физико–химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Российская Федерация
frolov@ecomodelling.ru,
elenazubkova2011@yandex.ru,
as_komarov@rambler.ru

Аннотация: рассмотрена модель взаимодействия популяций растений разных жизненных форм: дерновинного злака с фитогенным полем и наземноползучего многолетника без него (фитогенное поле равно размеру особи). Проведены компьютерные эксперименты по исследованию воздействия фитогенного поля на удержание территории популяциями и влияния уничтожения части популяций на численность особей каждого вида отдельно и при их взаимодействии.

1. Введение

Разработанная решетчатая модель позволила провести качественную и количественную оценку особенностей самоподдержания популяций растений с учетом параметров семенного и вегетативного размножения, а также исследовать влияние неоднородности местообитания на успешность захвата территории тем или иным видом. При построении модели в качестве прототипов модельных растений были выбраны наземно-ползучий многолетник вербейник монетчатый или луговой чай (*Lysimachia nummularia* L.) и дерновинный злак щучка дернистая или луговик дернистый (*Deschampsia caespitosa* (L.) P. Beauv.) (Маевский, 2006). Нашей целью в работе было выявить с помощью математической модели, влияние случайного уничтожения особей на устойчивость сообщества двух видов. Фитогенное поле (ФП) в модели задается в соответствии с определением А.А. Уранова (1965, стр. 251) - «Фитогенное поле – это часть пространства, в пределах которого среда приобретает новые свойства, определяемые присутствием в ней данной особи растения». Мы определяем фитогенное поле как детерминированный или вероятностный запрет занятия проростками одного вида некоторого соседства особи другого вида.

2. Объекты моделирования

Вербейник монетчатый – многолетнее травянистое наземно-ползучее растение ацентрической биоморфы (Жукова, 2012) с нейтральным проявлением ФП во внешней его зоне. Онтогенез вербейника изучен М.М. Паленовой (1997). Щучка – травянистое, многолетнее поликарпическое растение, плотнодерновинный злак неявнополицентрической биоморфы (Л.А. Жукова, 2012) с явно выраженным, мощным проявлением ФП во внешней зоне, выраженным в виде «кольца» вокруг живых побегов, в котором не происходит поселения большинства видов трав, в их числе и вербейника монетчатого (Ермакова, Жукова, 1967).

3. Описание модели

Шаг моделирования = 1 год; размер ячейки = 20 х 20 см; размер решетки = 100 х 100 ячеек; одна ячейка не может быть занята более, чем одним видом одновременно; ФП вербейника не учитывается; ФП щучки может занимать дополнительные ячейки.

4. Результаты моделирования

Вначале было проведено исследование самоподдержания популяции каждого из видов по отдельности при постепенном увеличении доли уничтожения элементов популяции

на каждом шаге моделирования. Численность вербейника монетчатого при отсутствии уничтожения быстро увеличивается и, достигая пика на сороковом шаге, в дальнейшем удерживается на стабильно высоком уровне (с незначительными колебаниями). Колебания связаны со случайностью заселения и конечностью размеров модельной решетки. При увеличении доли модельных растений, гибнущих на каждом шаге, рост численности становится более замедленным и плавным; при условии гибели на каждом шаге 45% элементов популяции вербейника монетчатого, популяция погибает к двадцатому шагу моделирования. При этом гибель особей в популяции превышает появление новых растений в результате вегетативного разрастания.

При моделировании развития щучки отмечается волнообразная динамика численности с несколькими пиками. Каждый последующий пик по амплитуде меньше предыдущего до выхода на плато. При гибели части особей пики сглаживаются, причем чем больше гибель, тем быстрее происходит сглаживание. Это можно объяснить тем, что долго живущая особь щучки занимает территорию около 30 лет. После их естественной смерти освободившиеся узлы решетки заселяются молодыми растениями. Возрастная волна размывается, т.к. при случайном заселении особи в различной степени реализуют свои возможности вегетативного расселения. При гибели на каждом шаге 20% элементов популяции вегетативное расселение не может скомпенсировать гибель, и популяция щучки погибает к десятому шагу.

При отсутствии случайного уничтожения и семенного возобновления, щучка при наличии ФП полностью вытесняет популяцию вербейника из моделируемого сообщества к тридцатому шагу. Это связано с тем, что щучка имеет более длинный срок жизни и дольше удерживает занимаемое пространство. В результате для возобновления вербейника не хватает места. При случайном уничтожении хотя бы 5% особей обеих популяций, вербейник к сотому шагу моделирования не вытесняется щучкой, так как освобождающихся после уничтожения мест достаточно для самоподдержания популяции, пусть и не на высоком уровне. При случайном уничтожении 15% обеих популяций на каждом шаге площадь занятая растениями популяции вербейника стабильно превышает площадь занятую популяцией щучки к сотому шагу. При случайном уничтожении 30% обеих популяций на каждом шаге, популяция щучки полностью погибает к десятому шагу.

При отсутствии фитогенного поля у щучки к сотому шагу обе популяции продолжают существование. Быстрый рост площади занятой вербейником объясняется вегетативным размножением и быстрым (на 2-м шаге) образованием генеративных особей, дающих семенное возобновление популяции. Площадь, занятая щучкой увеличивается постепенно (до 6 шага) за счет увеличения диаметра уже существующих особей, с 6 шага моделирования особи щучки переходят к генеративному размножению и площадь, занимаемая ею, начинает превышать площадь, занятую вербейником. При случайном уничтожении 5% покрытия обеих популяций на каждом шаге моделирования происходит уменьшение разницы в занимаемой видами площади. При случайном уничтожении 10% покрытия обеих популяций на каждом шаге, к сотому шагу площадь покрытия вербейника стабильно превышает площадь покрытия щучки, а при случайном уничтожении 15% покрытия обеих популяций на каждом шаге, популяция щучки полностью погибает к пятому шагу моделирования.

5. Обсуждение результатов

Более быструю, по сравнению с вербейником, гибель популяции щучки можно объяснить отсутствием у этого вида вегетативного размножения и относительно большей длительностью прегенеративного периода. По экспериментальным данным (Паленова, 1997) цветение и плодоношение особей вербейника начинается на втором году жизни а у особей щучки только на шестом году (Жукова, 1995). Таким образом, в зависимости от

биологических особенностей, критические для самоподдержания моделируемой популяции значения уничтожения особей различны и зависят от особенностей их онтогенеза.

Выявленный в ходе модельного эксперимента факт, что внешние воздействия на экосистему, приводящие к гибели 10 – 15 % особей обоих видов ежегодно, способствуют формированию устойчивых пространственных структур популяций щучки и вербейника, объясняется более быстрым омоложением популяций обоих видов, в следствии освобождения территории для развития растений из семян. Такое омоложение популяций приводит к возникновению устойчивого динамического равновесия численности особей обеих видов.

Литература

Жукова Л.А., Ермакова И.М. Изменение возрастного состава луговика дернистого на пойменных и материковых лугах Московской области // Онтогенез и возрастной состав популяций цветковых растений. М.: Наука. 1967. С. 114–131.

Жукова Л.А. Концепция фитогенных полей и современные аспекты их изучения // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1(6). С. 1462–1465.

Жукова Л.А. Популяционная жизнь луговых растений. Йошкар-Ола, 1995. 224 с.

Маевский П.Ф. Флора средней полосы европейской части России. Москва: Товарищество научных изданий КМК. 2006. 600 с.

Паленова М.М. Онтогенез Лугового чая – вербейника монетчатого (*Lysimachia nummularia* L.) // Онтогенетический атлас лекарственных растений. Йошкар–Ола, МарГУ, 1997. Т. 1. С. 196–201.

Уранов А.А Фитогенное поле // Проблемы современной ботаники. 1965. Т.1. С. 251–254.

БИОКЛИМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШЮТТЕ ОБЫКНОВЕННОГО (*LOPHODERMIUM PINASTRI* (SCHARD.) CHEV.*)* В СОСНОВЫХ ЛЕСАХ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

Чебакова Н.М. , Кузьмина Н.А., Парфенова Е.И., Сенашова В.А., Кузьмин С.Р.

Институт леса СО РАН, Красноярск, Россия
lyeti@ksc.krasn.ru

Аннотация: построена конвертная биоклиматическая модель шютте обыкновенного (*Lophodermium pinastri (Schard.)* Chev.), болезни сосны обыкновенной, и спрогнозировано его возможное распространение к 2020 г. в Средней Сибири в связи с изменениями климата

Введение

Болезни *Pinus sylvestris* L., вызываемые грибами, зависят от внешней среды, определяемой, в том числе, климатическими факторами, и поэтому ареалы распространения болезней будут перемещаться вслед за климатическими трендами в связи с изменением климата. Для оценки изменения ареалов биологических объектов необходимы биоклиматические модели, связывающие их характеристики с важными климатическими показателями, характеризующими условия тепло- и влагообеспеченности местообитаний.

Нашей целью было построить биоклиматическую модель шютте обыкновенного *(Lophodermium pinastri (Schard.)* Chev.), болезни сосны обыкновенной, и спрогнозировать его возможное распространение к 2020 г. в Средней Сибири в связи с изменениями климата.

Методы и результаты

Для построения модели были собраны данные о проявлениях болезни шютте обыкновенного, оцененной от 1 балла до 4 баллов, в разные годы с 1997 по 2010 гг. в 38 питомниках Красноярского края в лесостепной и южнотаежной зонах. Для характеристики климатических условий питомников были собраны данные за эти же годы по близлежащим метестанциям. Методом ординации была получена биоклиматическая модель климаареала шютте обыкновенного в Средней Сибири, которая является моделью конвертного типа и детерминирует климатические границы распространения шютте обыкновенного на основе его базовых требований для жизне-деятельности: требований к теплу, устойчивости к холоду, и условиями влагообеспеченности, характеризуемыми соответственно тремя климатическими показателями: температурами самого теплого (июль) и холодного (январь) месяцев и показателями увлаженения – годовым количеством осадком и относительным показателем увлажнения (отношение температуры июля к годовому количеству осадков).

Климаареалы распространения заболеваний шютте обыкновенным, определнные из ординаций, ограничиваются: температурами зимы (-5) – (-35)^{o}C, температурами лета 5-23^{o}C, условиями увлажнения – 250-700 мм годовых осадков и 2.5-6 индекса увлажнения. Условия для проявления сильных заболеваний 3-4 степени следующие: температуры летом 17.5- 21^{o}C, 450-550 мм годовых осадков и 3.5-4.5 индекса увлажнения. Температуры января, видимо, не детерминируют условия вспышек болезни.

Для нахождения статистических связей между степенью заболевания сосны шютте обыкновенным в питомниках Красноярского края и климатическими факторами был использован суммарный показатель проявления болезни в каждом году, зафиксированной во всех 38 питомниках в течение 1997-2010 гг. Такой интегральный показатель дает среднюю картину заболевания по региону при одинаковых изменениях климата, выраженных в положительных или отрицательных отклонениях от нормы, или аномалий (рис. 1). Наиболее тесная прямая связь степени проявления шютте обыкновенного прослеживается с осадками за два года, наиболее полно учитывающими условия зимнего периода, которая описывается уравнением:

Степень заболевания = -17.8 + 1.66*(дельта осадков за два года в см),
где значимый коэффициент детерминации R^2 = 0.46 при p<0.0075 и критерии Фишера F(1, 12), равном 10.3 при объеме выборки n=14.

Наиболее информативными являются показатели, характеризующие летние условия: температура июля – сумма осадков за два года, учитывающая осадки предыдущего холодного периода (зимы), и также пара температура июля – индекс увлажнения.

Коэффициенты корреляции аномалий температур июля и января со степенью заболевания несущественные и незначимые (рис.1).

Для прогнозов распространения и вспышек заболеваний шютте обыкновенным на территории Красноярского края и Хакасии мы использовали сценарий изменения климата HadCM3 B1, Хадли Центра, Великобритания (www.data-ipcc.ch). В соответствии с данным умеренным сценарием температура июля прогнозируется на 1-2°C выше температуры за базовый период 1960-1990 гг. к югу от 60°C с.ш.; температура января на 2°C выше севернее 55°с.ш. и ниже на 1°C южнее этой широты. Годовое количество осадков увеличится на 10% на всей территории Средней Сибири, и только на границе Тывы и Монголии отмечается небольшое пятно 10%-ого уменьшения.

Результаты

Сопряжением модели с умеренным сценарием изменения климата к 2020 году Хадли Центра, HadCM3 B1, Великобритания, получена карта возможного распространения этого патогенна и его вспышек в ближайшем будущем.

Модельная электронная карта для 2020 г. показывает современный климаареал шютте обыкновенного (рис.2 А) и расширение ареала существования патогенна по условиям климата в 1.4 раза, а ареала возможности возникновения суровых вспышек заболевания в 2.3 раза, что говорит о повышении риска заболеваемости в ближайшее десятилетие (рис. 2 Б). Модельные результаты также показывают продвижение ареала шютте обыкновенного на север в новые регионы, где патоген пока не зарегистрирован в питомниках Красноярского края. Возможно, к 2050 г. и особенно к концу века ареал его существенно расширится, что может стать дополнительной проблемой для выживания и продвижения сосны обыкновенной на север, которое также прогнозируется при текущем потеплении климата.

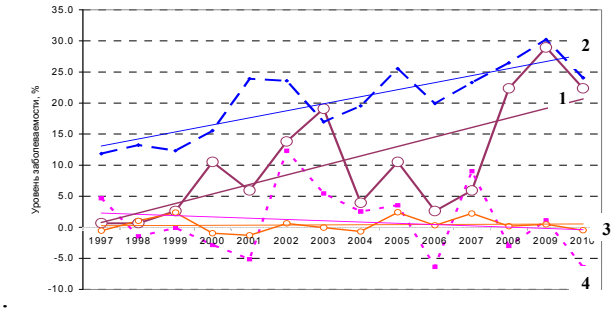


Рисунок 1. Тренды: заболевания шютте обыкновенным, % (1); аномалий средней суммы осадков за два года (2), аномалий температуры июля (3) и аномалий температуры января (4)

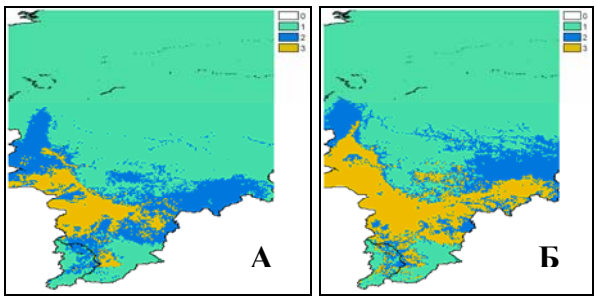


Рисунок 2. Ареал шютте и вспышки, смоделированные в современном климате (А) и в 2020 г. (Б) по сценарию HadCM3 B1. Обозначения. 1 – вне ареала; 2 – площади с заболеваниями любой степени поражения (ареал шютте обыкновенного), 3 – вспышки с высокой 3-4 степенью поражения

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 11-04-00246

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНКУРЕНЦИИ В СМЕШАННЫХ ЛЕСАХ: СТРУКТУРА МОДЕЛИ И ЕЕ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ

Шанин В.Н.[1], Шашков М.П.[1], Иванова Н.В.[2], Рочева Л.К.[3], Москаленко С.В.[1], Безрукова М.Г.[1], Mäkipää R.[4], Бобкова К.С.[5], Манов А.В.[5], Комаров А.С.[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук, Пущино, Российская Федерация*
shaninvn@gmail.com
[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математических проблем биологии Российской академии наук, Пущино, Российская Федерация*
[3]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Пущинский государственный естественно-научный институт, Пущино, Российская Федерация*
[4]*Finnish Forest Research Institute (Metsäntutkimuslaitos), Vantaa, Finland*
[5]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар, Российская Федерация*

Аннотация: предложена новая модель корневой конкуренции между деревьями в смешанных древостоях, учитывающая вертикальную неравномерность в распределении корней древесных растений разных видов и варьирование условий местообитания.

1. Структура модели

Имитируемое пространство в модели представлено квадратной решеткой, разделенной на ячейки одинакового размера. Каждое дерево характеризуется точным координатным положением в этой решетке, а зона распространения его корневой системы представлена набором ячеек. На первом этапе алгоритм определяет площадь питания каждого дерева на основе двух параметров: средней (*l_avg*) и максимальной (*l_max*) дальности распространения корней, которые являются видоспецифичными параметрами, зависящими от диаметра ствола. Далее рассчитывается общая площадь, занимаемая корневой системой каждого дерева на основе параметра *l_avg* (как площадь круга с $R=l_avg$).

На следующем этапе определяются конкретные ячейки, занятые корневой системой дерева. При этом суммарная площадь всех ячеек должна быть равна рассчитанной на первом этапе площади, занятой корневой системой дерева. Также при определении занятых корнями дерева ячеек учитываются 3 ограничения: (1) занимаемая корневой системой конкретного дерева ячейка не может отдаляться от ствола далее, чем на рассчитанное для этого дерева расстояние *l_max*; (2) все ячейки, формирующие зону почвенного питания дерева, должны представлять собой непрерывный связный контур; (3) возможно наличие внутри потенциальной зоны питания дерева ячеек, в которые корни не могут проникнуть (например, ячейки, занятые стволами других деревьев или крупными каменными глыбами, относительно глубокие микропонижения, и т.п.). Для расчета очередности включения новых ячеек в зону питания, для каждой из них рассчитывается параметр *p*, зависящий о расстояния до ствола дерева, массы корней других деревьев и количества элементов минерального питания в текущей ячейке. Параметр *p* рассчитывается для каждой ячейки, которая еще не входит в зону распространения корней дерева, но потенциально может быть в нее включена. Ячейки с наибольшим значением *p* будут включены в зону питания первыми.

2. Параметризация модели

Параметризация модели была проведена на основе данных, полученных в полевых экспериментах. Были установлены ключевые зависимости и собраны количественные

данные по дальности распространения корней и связи данного показателя с характеристиками местообитания. Регрессионный анализ позволил установить характер зависимости (логистическая функция) и ее параметры для разных видов деревьев: сосны обыкновенный (*Pinus sylvestris* L.), ели европейской (*Picea abies* (L.) H. Karst.), березы повислой и пушистой (*Betula pendula* Roth; *Betula pubescens* Ehrh.). Сравнение коэффициентов регрессионных уравнений, полученных для разных видов, продемонстрировало разницу в их жизненных стратегиях. Также установлена зависимость дальности распространения корневых систем от типа леса и рассчитаны соответствующие корректирующие множители.

Для определения параметров вертикального распределения подземной биомассы были отобраны образцы корней древесных растений в смешанных и одновидовых древостоях на двух пробных площадях. Отбор образцов осуществлялся в одно- и многовидовых парцеллах в пределах каждой пробной площади. Для этого выбирались 6 пар деревьев, где каждая пара включала либо особи одного вида, либо двух разных видов. На линии, соединяющей стволы деревьев в каждой паре, закладывались 3 почвенных колонки (две – на расстоянии 2 м от стволов каждого из деревьев и третья – посередине). Отбор образцов из колонок осуществлялся до глубины, в которой сосредоточена большая часть массы корней (50 см для пробной площади №1 и 30 см для пробной площади №2). Монолиты помещались в пакеты и сохранялись в холодильнике (Fahey, Hughes, 1994) при температуре -4ºС все время, пока шел их разбор (не более 1 месяца). При разборе почва из монолитов последовательно просеивалась через сита с размером ячейки 1 и 0.4 мм; из почвы, оставшейся на сите, вручную выбирались корни (Kalliokoski et al., 2010), которые далее сортировались на живые и отмершие. Корни отмывались от почвы, помещались в пенициллиновые пузырьки и просушивались до достижения воздушно сухой массы при температуре +70ºС (Helmisaari et al., 2009).

Показано, что средняя масса тонких корней в образцах из двувидовых парцелл выше, чем в образцах из одновидовых парцелл. Также показано, что в парцеллах с участием ели значительная масса тонких корней (более 50%) тяготеет к верхним горизонтам почвы, однако различия между разными парами несущественны. Также с глубиной растет доля мортмассы тонких корней. Ранее было показано, что связь между биомассой корней и глубиной имеет характер экспоненциальной кривой (Starr et al., 2012). На основе полученных данных, а также опубликованных данных других авторов были рассчитаны параметры данного уравнения.

Благодарим к.б.н. В.Э. Смирнова (ИМПБ РАН), Dr. R. Sievänen и, Dr. T. Kalliokoski (Finnish Forest Research Institute) за консультации. За предоставленную возможность и помощь в сборе образцов благодарим Государственный природный заповедник «Кологривский лес» и лично А.Ю. Терентьева и Е.В. Терентьеву. Также мы хотели бы поблагодарить за предоставленное оборудование лабораторию физико-химии почв ИФХиБПП РАН и лично А.Д. Темралееву и лабораторию археологического почвоведения ИФХиБПП РАН и лично к.б.н. А.В. Борисова. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-04-31635).

Литература

Fahey T.J., Hughes J.W. Fine root dynamics in a northern hardwood forest ecosystem, Hubbard Brook Experimental Forest, NH. J Ecol 82(3), 1994, 533-548.

Helmisaari H.-S., Sah S., Aro L. Fine roots on intensive forest ecosystem monitoring plots FIP4, FIP10 and FIP11 on Olkiluoto island in 2008. Finnish Forest Research Institute, Working Report 2009-127, 2009, 33 pp.

Kalliokoski T., Pennanen T., Nygren P., Sievänen R., Helmisaari H.-S. Belowground interspecific competition in mixed boreal forests: fine root and ectomycorrhiza characteristics along stand developmental stage and soil fertility gradients. Plant Soil 330, 2010, 73-89.

Starr M., Helmisaari H.-S., Merilä P. Modeling rooting depth and distribution from incomplete profile root biomass data [Poster report]. ISRR 2012: "Roots to the Future“ 26-29 June 2012 Dundee, Scotland.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИИ С НЕПЕРЕКРЫВАЮЩИМИСЯ ПОКОЛЕНИЯМИ В ПЕРИДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СРЕДЕ ОБИТАНИЯ

Шлюфман К.В. [1]

[1] *Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия*
Shlufman@mail.ru

Аннотация: Исследовано явление мультистабильности в рекуррентном уравнении Рикера с периодическим параметром с периодом 2. Определены два типа деления фазового пространства сосуществующими аттракторами.

Многие биологические виды имеют периодические жизненные циклы. Среди них выделяются такие виды, у которых точно определен период размножения и смежные поколения не перекрываются. Модели динамики таких популяций достаточно широко представлены в работах (Ricker, 1954, 1973), (Андреев, 1972), (Гинзбург, 1974), (Гиммельфарб, 1974), (Скалецкая, 1979), (Ризниченко, 1993). Если предположить, что условия среды обитания этих видов имеют периодический характер изменений от поколения к поколению и численность последующего поколения зависит от численности предыдущего поколения, то в этом случае динамику численности одновозрастной популяции можно описать с помощью периодического рекуррентного уравнения (Zhou Zhan, 2003), (Ryusuke Kon, 2005), (Sacker, 2007), (Ласунский, 2012)

$$x_{n+1} = \mathrm{F}_n(x_n), \tag{1}$$

где $\mathrm{F}_n : \mathrm{X} \to \mathrm{X}$, $\mathrm{F}_{n+p} = \mathrm{F}_n$ для любых $n \in Z^+$, p - минимальный период ($p > 1$), X - топологическое пространство; $x_n \in \mathrm{X}$ и интерпретируется как численность n - го поколения.

Конкретизируя F моделью Рикера: $\mathrm{F}(x) = x \cdot \exp(\alpha - \beta \cdot x)$, и выражая периодичность рекуррентного уравнения (1) через периодический параметр: $\mathrm{F}_n(x) = x \cdot \exp(\alpha_n - \beta \cdot x)$, $\alpha_{n+p} = \alpha_n$ для любых $n \in Z^+$ приходим к периодическому рекуррентному уравнению (Ашихмина, 2004), (Sacker, 2007), (Elaydi, 2008), (Sacker, 2010),

$$x_{n+1} = x_n \cdot \exp(\alpha_n - \beta \cdot x_n), \tag{2}$$

где $x_n \in \mathbf{R}^+ = [0, \infty)$.

Параметр α_n, также как и в классической модели Рикера, характеризует «емкость» экологической ниши и репродуктивный потенциал популяции. Период изменений значений параметра выбирается в соответствии с длиной периода учитываемых изменений в среде обитания. В данной работе рассмотрена модель Рикера с периодическим параметром α_n, при $p = 2$.

Для исследования имеющихся устойчивых периодических режимов периодическое уравнение (2) было приведено к следующему виду:

$$x_{n+1} = x_n \cdot \exp\left(\alpha + (-1)^n \cdot \rho - \beta \cdot x_n\right), \tag{3}$$

где $\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$, $\rho = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}$. Выполненное преобразование позволило рассматривать имеющиеся у уравнения режимы в пространстве параметров α и ρ, где: α - параметр, имеющий тот же смысл, что и в классическом уравнении Рикера, ρ - полуамплитуда изменения параметра α в уравнении (2).

Были построены карты периодических режимов, которые позволили заключить следующее.

В рассмотренной области пространства параметров обнаруживаются устойчивые (по Ляпунову) циклы четной длины. Область фазового пространства системы поделена на бассейны притяжений сосуществующими аттракторами. При этом имеет место деление двух типов. Односвязный бассейн притяжений одного периодического решения своим расположением разбивает бассейн притяжения второго решения на две подобласти (1-ый тип). Деление фазового пространства бассейнами притяжения с фрактальной структурой. Каждый из бассейнов представляет собой многосвязное множество. Подобласти бассейнов чередуются в фазовом пространстве, напоминая фрактальную структуру (2-ой тип).

Исследование выполнено при финансовой поддержке ДВО РАН (конкурсные проекты 12-I-П28-02, 12-II-СО-06-019) и РФФИ (региональный проект 11-01-98512-р_восток_а).

Литература

Андреев В.Л., Нагорский А.А., Шапиро А.П. Модель популяции рыб с двухлетним циклом и однократным нерестом // Проблемы кибернетики. – 1972. - Вып.25.

Ашихмина Е.В., Израильский Ю.Г., Фрисман Е.Я. Динамическое поведение модели Рикера при циклическом изменении одного из параметров // Вестник ДВО РАН. - 2004. - № 5. - С. 19-28.

Гиммельфарб А.А. и др. Динамическая теория биологических популяций. - М: Наука, 1974. - 455 с.

Гинзбург Л.Р., Ливщиц Е. Математические модели элементарных биоценозов // Управление и информация. - Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1974. - Вып. 10. - С. 76-138.

Ласунский А.В. О периоде решений дискретного периодического логистического уравнения // Труды Карельского научного центра РАН. - 2012. - № 5. - С. 44-48.

Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б. Математические модели биологических продукционных процессов. - М.: МГУ, 1993. - 302 с.

Скалецкая Е.И., Фрисман Е.Я., Шапиро А.П. Дискретные модели динамики численности популяции и оптимизации промысла. - М.: Наука, 1979. - 168 с.

Elaydi S., Luis R., Oliveira H. Towards a theory of periodic difference equations and its application to population dynamics // In Mauricio Matos Peixoto, Alberto Adrego Pinto, and David A Rand, editors, Dynamics, Games and Science I, pages 287–321. DYNA 2008, in Honor of Maurcio Peixoto and David Rand, University of Minho, Braga, Springer, March 2011. Series: Springer Proceedings in Mathematics. - Vol. 1. - P. 287-321.

Ricker W. E. Two mechanisms that make it impossible to maintain peak-period yields from stocks of Pacific salmon and other fishes // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. - 1973.- Vol. 30. - P. 1275–1286.

Ricker W.E. Stock and recruitment // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. - Vol. 11, - № 5. - 1954. - P. 559-623.

Ryusuke Kon. Attenuant cycles of population models with periodic carrying capacity // J. Difference Eq. Appl. - 2005. - 11 (4-5). - P. 423-430.

Sacker R.J. A note on periodic Ricker maps // Journal Difference Equations and Application. - 2007. - 13(1). - P. 89-92.

Sacker R.J., von Bremen H. F. A conjecture on the stability of the periodic solutions of Ricker's equation with periodic parameters // Applied Mathematics and Computation. - 2010. - N 217. - P. 1213-1219.

Sacker R.J., von Bremen H. F. Dynamic reduction with applications to mathematical biology and other areas // Journal of Biology Dynamics. - 2007. -1(4). - P. 437-453.

Zhou Zhan, Zou Xingfu. Stable periodic solutions in a discrete periodic logistic equation // Appl. Math. Lett. 2003. - Vol. 16. - P. 165-171.

АНАЛИТИКО-ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ СЕВЕРНОГО ОЛЕНЯ

Юрезанская Ю.С.

ВЦ РАН, Москва, Россия
july@ccas.ru

Аннотация: рассматривается аналитическая модель неэксплуатируемой группировки северного оленя Кольского п-ва (Лапландский заповедник), основанная на взаимодействии популяции с растительностью. Обсуждается её использование в имитационном моделировании. Модель воспроизводит циклические колебания с периодом близким к натурным наблюдениям.

1. Введение

В работе (Лопатин, 2000) построена дискретная математическая модель популяции северного оленя с использованием экспериментальных данных о динамике популяции за период 60 лет, также в модели использовались данные о возрастной структуре популяции, о плодовитости в зависимости от возраста особи; моделирование показало, что динамика имеет циклический характер с периодом 35-40 лет. При этом рост численности оленя сопровождается уменьшением запаса лишайников и при снижении запаса до критического уровня сменяется падением.

Данная работа отличается тем, что удаётся воспроизвести схожие динамические режимы без учёта демографической структуры популяции, аналитически решая неавтономную систему двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, построенную на основе принципов имитационного моделирования, изложенных в (Sarancha, 2012). Эти принципы были использованы, так как имитационная модель в (Sarancha, 2012) также воспроизводит колебательную динамику популяции.

2. Аналитическое решение имитационной модели

Введём следующие обозначения: R – число особей, V – биомасса лишайников, t – время. Рассмотрим уравнения имитационной модели в двух динамических режимах:

корма достаточно –

$$\begin{cases} \dfrac{dV}{dt} = a_1 \cdot \left(1 - \dfrac{V}{V_{\max}}\right) \cdot V - a_2 \cdot V - b_1 \cdot R, \\ \dfrac{dR}{dt} = kpbr \cdot b_1 \cdot R - R \cdot b_2, \end{cases} \tag{1}$$

корм недоступен –

$$\begin{cases} \dfrac{dV}{dt} = a_1 \cdot \left(1 - \dfrac{V}{V_{\max}}\right) \cdot V - a_2 \cdot V - V \cdot c_2, \\ \dfrac{dR}{dt} = -R \cdot b_3. \end{cases} \tag{2}$$

Нерасшифрованные параметры модели представляют собой некоторые константы.

Решения систем 1, 2 выглядят следующим образом:

корм недоступен –

$$R(t) = C_1^* e^{-b_3 t},$$

$$\frac{V(t)}{(a_1 - a_2 - c_2) - a_1 V(t) / \mathrm{V}_{\max}} = E e^{(a_1 - a_2 - c_2)t},$$

корма достаточно –

$$R(t) = C_2^* e^{(-b_2 + kpbr\, b_1)\ \ t},$$

$$V(t) = e^{(a_1 - a_2)t/2}\left[C_1 J_\nu\left(2b_2^{-1}\sqrt{\frac{a_1 b_1 C_2^*}{V_{\max}}} e^{b_2 t/2} \right) + C_2 Y_\nu\left(2b_2^{-1}\sqrt{\frac{a_1 b_1 C_2^*}{V_{\max}}} e^{b_2 t/2} \right)\right],\ \nu = \frac{a_2}{b_2}. \qquad (3)$$

Здесь C_1^*, E, C_2^*, C_1, C_2 – константы интегрирования, J_ν и Y_ν – функции Бесселя (Зайцев, 1993). Функции Бесселя представляют собой затухающие во времени колебания. Именно они являются генератором колебаний нашей нелинейной динамической системы. На рисунке 1 представлены колебания, полученные посредством сшивания V и R при переключении на один из двух динамических режимов. Сшивание осуществляется следующим образом: конечное значение биомассы растительности и численности особей предыдущего периода являются начальными данными для последующего временного интервала. Полное сходство с результатами имитационного моделирования необязательно, так как они получены в трёх режимах, а аналитическое решение только в двух. Также в решение 3 входят две константы интегрирования, а не одна, поэтому при сшивке из начальных и граничных условий вычисляется только одна константа, а вторая является параметром.

Данное аналитическое решение до начала сшивания может быть использовано в качестве теста программ, в которых численно реализуется решение систем 1, 2. Также оно служит инструментом настройки имитационной модели на колебательный режим.

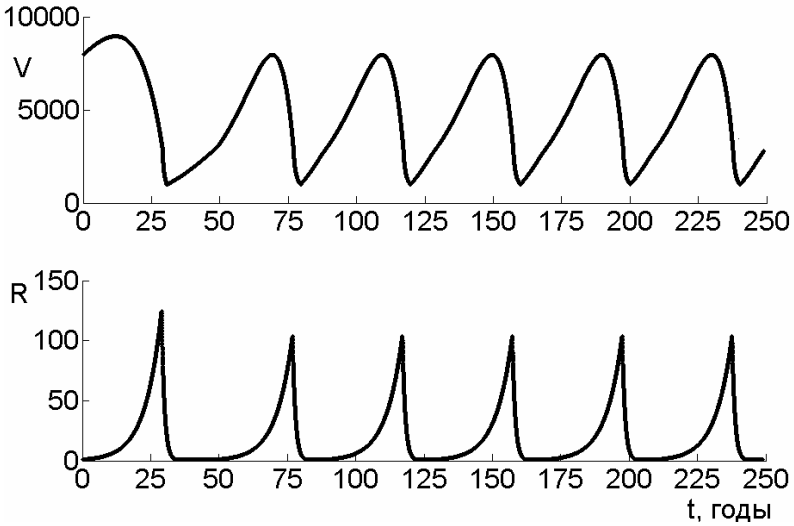


Рисунок 1 – Динамика численности северного оленя (R, число особей) и лишайников (V, т/га)

Литература

Зайцев В.Ф., Полянин А.Д. Справочник по нелинейным дифференциальным уравнениям. - М.: Наука, 1993.- 464 с.

Лопатин В.Н., Абатуров Б.Д. Математическое моделирование трофически обусловленной цикличности популяции северного оленя (Rangifer Tarandus). // Зоологический журнал. - 2000. - № 79(4).- С. 452-460.

Sarancha D. A., Lyulyakin O. P., Trashcheev R. V. Interaction of simulation and analytic methods in modelling of ecological and biological objects. // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. . - 2012. - № 27(5). - pp. 479-492.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ САЙГАКОВ

Юрезанская Ю.С.

ВЦ РАН, Москва, Россия
july@ccas.ru

Аннотация: представлена аналитическая модель сайгаки – двудольные травы и полукустарники – злаки. Модель предназначена для описания влияния корма различного качества на динамику численности сайгаков. Приведены результаты расчётов за период 10 лет.

1. Введение

В настоящее время основные места обитания сайгаков в России отличаются низким кормовым качеством растительного покрова, и даже большой общий запас растительной массы не обеспечивает полноценного питания животных, идет речь о низкой кормовой ёмкости имеющихся пастбищ и об отсутствии условий для роста численности поголовья (Абатуров, 2007). В современном питании сайгаков преобладают малопитательные однодольные растения (злаки, осока) (Абатуров, 2008). Более предпочитаемые сайгаками двудольные растения занимают подчинённое положение. В (Абатуров, 2007) делается предположение, что такая ситуация сложилась под влиянием прекращения выпаса крупного скота и ежегодных степных пожаров; также выдвигается гипотеза о том, что низкопитательный растительный покров более губителен для сайгаков, чем браконьерство и тяжелые климатические условия.

2. Описание модели

Взяв за основу нелинейную модель Лотки–Вольтера, автор предлагает следующую линейную модель. Предложена неавтономная система трёх дифференциальных уравнений, которая описывает динамику численности сайгаков S, двудольных трав и полукустарников DV, а также злаков ZL.

$$\begin{cases} \dfrac{dDV}{dt} = C_{DVR}DV - C_{DVM}DV - C_{DVD}S, \\ \dfrac{dZL}{dt} = C_{ZLR}ZL - C_{ZLM}ZL - C_{ZLD}S, \\ \dfrac{dS}{dt} = C_{SR}S - C_{SM}S. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $C_{DVR}, C_{DVM}, C_{DVD}$ – коэффициенты прироста, естественного отмирания и отчуждения двудольных травянистых растений и полукустарников; под отчуждением понимается поедание растительности сайгаками. По аналогии определяются коэффициенты для злаков и сайгаков. Данная система уравнений имеет простое аналитическое решение:

$$S(t) = C_1 e^{Kt},\ K = C_{SR} - C_{SM},$$

$$ZL(t) = A_{ZL}e^{K_2^{ZL}t} + \frac{K_3^{ZL}}{K_2^{ZL} - K}e^{Kt},\ K_2^{ZL} = C_{ZLR} - C_{ZLM},\ K_3^{ZL} = C_1 C_{ZLD},$$

$$DV(t) = A_{DV}e^{K_2^{DV}t} + \frac{K_3^{DV}}{K_2^{DV} - K}e^{Kt},\ K_2^{DV} = C_{DVR} - C_{DVM},\ K_3^{DV} = C_1 C_{DVD}.$$

Здесь A_{ZL}, A_{DV}, C_1 являются константами интегрирования и подбираются, исходя из начальных условий. Функция влияния качества корма на динамику численности сайгака пока не вставлена в модель, но её планируется вставить. Для достижения связи с биологической информацией величины A_{ZL}, и A_{DV} подобрались так, чтобы биомасса злаков (мало питательных) превышала биомассу двудольных (более питательных).

Результаты моделирования, рассчитанные по этим формулам, представлены за период 10 лет, при этом постоянные коэффициенты системы уравнений 1 принимают различные значения в зависимости от времени года. Расчет начинается с января, начальное число особей C_1=1000. Коэффициенты смертности сайгаков C_{SM} брались согласно данным динамики смертности сайгака по месяцам в процентах от всего отхода за год (Близнюк, 2009), что демонстрирует рисунок 1. Коэффициенты прироста C_{SR} взяты также из этого источника: зимой, летом и осенью C_{SR}=0, весной C_{SR}= 1.02 (так как сайгаки размножаются только весной); введено дополнительное условие: если нет никакого корма, то C_{SR}=0.

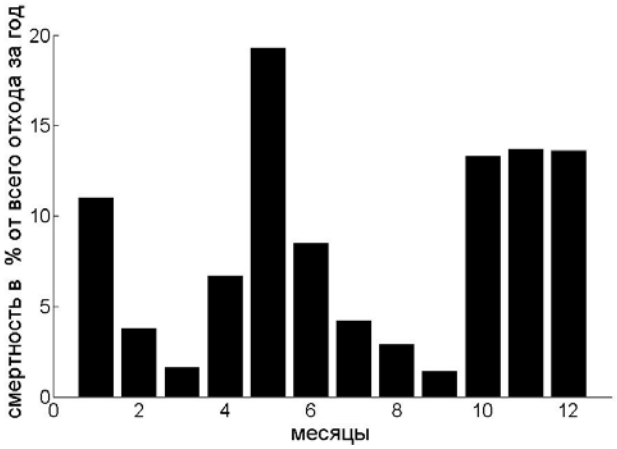


Рисунок 1 – Коэффициенты смертности сайгака

Коэффициенты отчуждения растительности сайгаками C_{DVD} и C_{ZLD} в разные месяцы также брались согласно натурным данным (Близнюк, 2009), где представлены значения групп кормов в питании сайгака по периодам года в процентах от общего объема корма. Данные для злаков брались из литературы, содержание двудольных вычислялось как оставшаяся часть от 100%. При этом $C_{DVD} = b f(t), C_{ZLD} = b g(t)$, где *f(t)* и *g(t)* – функции, построенные на основе натурных данных, а b – параметр моделирования, отвечающий за долю, потреблённой сайгаками растительности, от ее общей биомассы. Также параметрами моделирования являются коэффициенты прироста и отмирания злаков и двудольных в системе дифференциальных уравнений 1. Параметры моделирования подбираются таким образом, чтобы достигались реальные динамические режимы, чтобы не было отрицательных значений корма и животных, а также их аномально высоких значений. Например, считается, что площадь, занимаемая сайгаками, не может содержать более 5000 особей, и сайгаки не могут исчезнуть полностью, при любых тяжёлых условиях их численность не падает ниже 2% от исходного числа.

Литература

Абатуров Б.Д. Популяция сайгака в России и проблемы ее сохранения. // Вестник РАН. - 2007. - № 77(9).- С.785-793.

Абатуров Б.Д., Ларионов К.О., Джапова Р.Р., Колесников М.П. Качество кормов и обеспеченность сайгаков (saiga tatarica) пищей в условиях восстановительной смены растительности на Чёрных землях Калмыкии // Зоологический журнал.- 2008. - № 87(9).- С.1524 -1530.

Близнюк А.И. Сайгак калмыцкой популяции. - Элиста: НПП <Джангар>, 2009. - 544 с.

ТИПЫ СУКЦЕССИИ

Титлянова А.А.[1], Самбуу А.Д.[2]
[1]*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия*
argenta@issa.nsc.ru
[2]*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия*
sambuu@mail.ru

Аннотация: Рассматриваются первичная сукцессия самозарастание отвалов – изменение береговой растительности при заполнении водохранилища, вторичные – пастбищная и залежная. Показано, что в начале первичной сукцессии превалируют случайные процессы, при заливании берегов существует некоторый набор ответов на случайные воздействия, при пастбищной сукцессии имеется закономерный ответ на изменение режима выпаса, при залежной сукцессии процессы детерминированы.

Рассмотрим четыре объекта сукцессий: 1 – угольные отвалы, 2 – берег водохранилища, 3 – пастбища, 4 – залежи.

1. Угольные отвалы. Самозарастание угольных отвалов изучалось в лесостепной (Барабинская низменность) и сухостепной зонах (Тува). Установлено, что общих закономерностей в сукцессии отдельных компонентов биоты не существует. Каждое сообщество характеризуется специфическим сукцессионным процессом и траектории перехода к стационарному состоянию различных сообществ различны (табл.).

Даже сообщества, одинаковые по своему внутреннему строению и функциям – фитоценозы – различаются по типу и скорости достижения терминального состава в зависимости от геоморфологической позиции их обитания. Чем жестче внешние условия, тем больше различия между сукцессией растительности на разных элементах рельефа.

Начальные стадии первичной сукцессии находятся в сильнонеравновесной области и полученные нами результаты соответствуют известному правилу И. Пригожина «В сильно неравновесной области не существует универсального закона, из которого можно было бы вывести заключение о поведении всех без исключения систем» [Пригожин, Стенгерс, 1986].

2. Угольные отвалы. Исследования проводились в прибрежных экосистемах Саяно-Шушенского водохранилища, которое заполнялось водой с 1985 по 1989 гг. Режим заполнения: прирусловая часть затапливается с середины мая по октябрь, бóльшая часть центральной поймы подтопляется к концу августа. Режим работы водохранилища не постоянен. В разные годы уровень воды поднимается в июле в пределах 520-530 м н.у.м. В 2009-2010 гг. заполнения водохранилища не происходило. В 2011-2012 гг. предельный уровень воды был ниже обычного. В связи с переменным режимом заполнения водохранилища антропогенная сукцессия имеет спорадический характер.

Исследовались три ключевых участка (к.у.). На первом к.у., расположенном частично в прирусловом понижении, частично на террасе, исходная растительность была представлена чиевыми лугами и степями. К 2002 г. на к.у. сформировалась засоренная лугостепь. В 2012 г. усилилось обилие осок, других луговых видов и сорняков. В понижениях сформировались пятна солонцов и солончаков, покрытых зарослями солянки Salsola collins.

На 2-ом к.у. в центральной пойме ранее располагались чиево-волоснецовые степи с караганой. Уже к 2001 г. фитомасса сообщества на 50% состояла из сорняков, среди которых доминировала конопля. В период, когда хранилище не заполнялось водой, возросла роль корневищных злаков. В 2012 г. сорняковые заросли сменились засоренным лугом, в котором 60% фитомассы сложено луговыми и степными видами.

3-ий к.у. расположен частично в ложе водохранилища, частично на шлейфе, где существовали разнотрвно-злаковые степи. В ходе сукцессии степи заместились последовательной серией лугов (от переувлажненного до мезофильного). На шлейфе шло

постепенное восстановление степной растительности, усилившееся за годы «сухого» водохранилища.

Таким образом, единой модели сукцессии при заливании водохранилища не существует. Растительность откликается на все изменения режима водохранилища, которые не предсказуемы и зависят от деятельности человека.

3. Пастбища. Изучение пастбищной сукцессии проводились в Туве на серии пастбищ с различной нагрузкой и режимом выпаса. Стабильное пастбище – зимний выпас с постоянной умеренной нагрузкой. Пастбище с полным сбоем, восстановившееся за 10 лет при очень легком выпасе. Два пастбища Ш степени дигрессии, восстановившееся за 15 лет при резком снижении нагрузки и вновь введенные в оборот с усиленной пастбищной нагрузкой. Изучение видового и доминантного состава травостоя и продуктивности пастбищ при постоянном режиме и при смене режимов позволило придти к следующему заключению. Существует прямая связь «фитоценоз – пастбищная нагрузка». При постоянстве режима выпаса сохраняется видовой состав, структура доминирования и величины запасов надземной и подземной фитомассы. При смене режима – его силы или продолжительности в течение нескольких лет направленно и предсказуемо изменяются все показатели. Изменение параметров биотического круговорота под влиянием выпаса ограничено и обратимо, что обеспечивается непрерывной сменой растений доминантов или изменением их долевого участия в травостое. Подвижность степных экосистем, обусловленная возвратными сукцессиями при смене пастбищного пресса, является залогом и причиной их вековой устойчивости.

4. Залежь. Залежная сукцессия исследовалась в Туве на пяти участках в течение 17 лет. Посевы пшеницы были прекращены в 1994 г. Наблюдения проводились на 4-ый, 7-ой, 11-ый и 17-ый годы сукцессии (1997, 2000, 2004, 2010). Каждая залежь является членом ряда север – юг: луговая степь на черноземе обыкновенном; настоящая степь на черноземе южном; сухая степь на каштановой почве; сухая степь на каштановой щебнистой почве; вторично опустыненная степь на светло каштановой почве.

На четвертый год сукцессии на всех залежах доминировали полыни и сорные виды. Седьмой год характеризуется доминированием на всех участках пырея – злака с мощной корневой системой. На одиннадцатый год происходит резкая дифференциация залежей по видовому составу. В качестве доминантов выступают виды терминальной экосистемы. На 17-ый год видовой состав сообществ уже очень близок к видовой структуре коренных степей.

Показатель сходства (коэффициент Жаккара) характеризует приближение видового состава фитоценозов залежей к терминальной стадии – степи. Средний показатель (по пяти степям) возрастает от первой стадии к терминальной с 0,28 до 0,80. Паттерн изменения видового состава одинаков для всех залежей. Годы 4-7 лет – период максимального появления видов. Годы 7-11 – период максимального выпадения видов. Число сохранившихся видов нарастает в течение всей сукцессии и на 17-ый год приближается к количеству, характерному для терминальной стадии. Таким образом, и по количеству и по составу видовая композиция фитоценозов 17-летних залежей близка к видовому разнообразию коренных степных сообществ. Сукцессионный процесс протекает закономерно и направлен к терминальному состоянию.

Таблица 1 - Типы сукцессий

Объект	Угольные отвалы	Берег водохранилища	Пастбище	Залежь
Вид сукцессии	Первичная, самозарастание отвалов	Антропогенная, спорадическая с переменным режимом работы водохранилища	Непрерывная, обратимая	Закономерно направленная
Исходное сообщество	Отсутствует	Полностью изменяется	Видовой состав сохраняется, набор доминантов меняется	Отсутствует
Роль случайных и детерминированных процессов	На первой стадии превалируют случайные процессы	Некоторый набор ответов на случайные воздействия	Закономерный ответ на изменение пастбищного режима	Процесс детерминирован, направленное движение к терминальной экосистеме
Конечное сообщество	Зависит от положения в рельефе, определяется гидротермическим условиями зоны и катенным градиентом	Вне зависимости от исходных сообществ конечные представлены засоренными лугами	Серия сообществ, вариант определяется пастбищной нагрузкой и режимом выпаса	Терминальное сообщество, вариант исходного (до распашки)

Литература

Пригожин И.Р., Стенгерс И. Порядок из хаоса. – Изд-во Прогресс, 1986. – 432 с.

КРАЕВОЙ ЭФФЕКТ

Шибарева С.В.
Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия
shibarevas@mail.ru

Аннотация: рассматривается краевой эффект в горной лесостепи, проявляющийся в строении и составе подстилки на трансекте от степи к лесу. Краевой эффект проявляется на границе между травяными экосистемами и травяной экосистемой под первой лиственницей. Он характеризуется накоплением большой массы остатков лесного опада в травяной подстилке и наличием мощного слоя гумификации, отсутствующего в травяных экосистемах и характерного для лесных экосистем.

На границе двух фитоценозов: лесная поляна – лес; луг – лес; степь – лес; болото – степь и т.д., могут складываться сообщества различного типа: неорганизованная смесь видов обоих сообществ, определенным образом структурированная смесь и, наконец, совершенно особое сообщество, далекое от сообществ граничащих экосистем. Совершенно не предсказуема организация подстилки экотопа. Состав опада промежуточной зоны может быть различен и, в связи с чем, будет специфичен состав консументов и редуцентов, размельчающих опад и минерализующий его до H_2O и CO_2.

Известно, как сильно различаются подстилки травяных и лесных экосистем. Слой AOL образован обычно свежим опадом, в нем все фракции опада (ветви, хвоя, листья и т.д.) сохраняют еще свою морфологическую структуру. Здесь осуществляются первые стадии разложения: минерализуются водорастворимые вещества, простые сахара, частично целлюлоза.

Слой AOF – ферментативный слой, в котором бактериальная и грибная флора наиболее разнообразны (Гришина, 1986). Здесь базидиальными грибами разрушается лигнино-целлюлозный комплекс и в этом же слое начинается синтез гумусовых веществ.

В слое AOH завершается распад органических веществ, поступивших с опадом; происходит конденсация ароматических соединений и усложнение молекул гумусовых веществ (Стриганова, 1980; Гришина, 1986).

Травяные подстилки резко отличаются от лесных по своему строению и морфологии. Полная деструкция травяного опада, его минерализация и гумификация происходят за три года (Семенова-Тян-Шанская, 1977). В связи с быстрым разложением процессы гумификации мало интенсивны, и подстилка травяных экосистем представлена лишь слоем AOL.

Как же организована подстилка на границе травяная экосистема – лес? Здесь подстилка и сообщество декомпозиторов складываются элементами граничащих экосистем, что может проявиться в своеобразии структуры пограничной полосы.

Исследования проводились в горной лесостепи Тувы на берегу озера Кара-Холь. Была выбрана пробная площадь, расположенная на низкой сопке, переходящей в ложбину. Вершина и склон сопки были покрыты травянистой растительностью, в ложбине располагался редкостойный лиственничный лес. От вершины сопки к ложбине был проложен трансект длиной 100 м, на котором выбрано пять квадратов размером 0,25 $м^2$, с которых снималась подстилка до минерального слоя почвы.

Квадраты 1-4 представляют закономерный переход от петрофитной настоящей степи к луговой, фитоценоз которой сложен типичными видами луговой степи, квадрат 5 – это уже лесное сообщество (табл. 1).

Таблица 1 - Запасы подстилки на тансекте, г/м^2 сух. массы

Компоненты подстилки	квадрат 1 петрофитная степь на вершине	квадрат 2 петрофитная степь на С-З склоне	квадрат 3 настоящая степь на С-З склоне	квадрат 4 луговая степь под первой лиственницей на С-З склоне	квадрат 5 лиственничное редколесье в ложбине
Слой AOL					
Ветошь цветковых растений	52,6	77,4	255	88	13
Мертвые мхи	43,5	17,0	279	нет	321
Хвоя и листья	нет	нет	42	52	4
Кора	нет	2,4	нет	32	6
Ветки	нет	228	163	627	58
Шишки	нет	49,6	73	408	Нет
Всего AOL	96,1	375	812	1207	402
Слой AOF					
Полуразложившиеся неидентифицируемые остатки	201	230	492	884	994
Всего AOL+AOF	297	605	1304	2091	1396
Слой AOH					
Гумифицированные растительные остатки	нет	нет	нет	2220	2400
Полный запас (AOL+AOF+AOH)	297	605	1304	4311	3796

На граничном квадрате резко повышаются количества чисто лесных элементов подстилки: коры, веток и шишек. Их общий запас составляет до 700 г/м2, в то время как в лиственничном редколесье их количество в подстилке в 10 раз ниже.

Пограничный квадрат имеет наибольшую массу верхнего слоя подстилки – 12 т/га, в то время как запас этого же слоя в настоящей степи, находящейся на склоне, - 8 т/га, а в лесу – всего 4 т/га. Здесь мы встречаемся с первой особенностью пограничной полосы – замедленное разложение лесных элементов подстилки.

Масса слоя AOF, где идет разрушение лигнино-целлюлоззного комплекса и распад органических веществ до высоких стадий, закономерно нарастает от петрофитной степи к лесу. Его масса увеличивается по трансекту в пять раз, достигая 10 т/га в лесу.

Наиболее резкие различия между квадратами проявляются в слое AOH, состоящем из гумифицированных остатков. Этот слой полностью отсутствует на травяных квадратах (петрофитная и настоящая степь) и сразу же на граничном квадрате достигает такой же массы, как в лесу – 22 т. Своеобразие пограничной полосы связано, вероятно, с отсутствием в слое AOL деструкторов, разлагающих лесные элементы подстилки, а также с деятельностью лесных детритофагов при увлажнении почвы, что приводит к образованию мощного слоя AOF (Титлянова, Шибарева, 2012).

Литература

Гришина Л.А. Гумусообразование и гумусное состояние почв. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 243 с.
Стриганова Б.Р. Питание почвенных сапролфагов. – М.: Наука, 1980. – 243 с.

Семенова-Тян-Шанская А.М. Накопление и роль подстилки в травяных сообществах. – Л.: Наука, 1977. – 191 с.
Титлянова А.А., Шибарева С.В. Подстилки в лесных и травяных экосистемах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 137 с.

Авторский указатель

Mäkipää R. 271
Абакумов А.И. 16
Авилов В.К. 143
Алейников А.А. 92
Александров В.Г. 18
Архангельская Т.А. 21, 47, 145
Аюнова О.Д. 226
Бакина Л.Г. 234
Бакоев С.Ю. 169
Барцев С.И. 24, 26, 224
Башкин В.Н. 28
Безрукова М.Г. 92, 271
Белотелов Н.В. 30
Бернштейн А.Д. 152
Бессонов С.А. 128, 199
Бобкова К.С. 271
Болондинский В.К. 32
Бубнов И.А. 56
Бурнашева Э.Р. 35
Бутусов О.Б. 37
Быховец С.С. 35, 40, 137
Вавилин В.А. 42
Варчева С.Е. 45
Величенко М.В. 47
Вергун А.А. 191
Виленкин Б.Я. 49
Виноградова А.А. 109
Владимирова Э.Д. 52, 54
Волкова Е.М. 189
Воробьев Н.И. 56
Воротынцев А.В. 58
Вшивкова О.А. 60, 62, 64
Гавриков В.Л. 66
Галицкий В.В. 68
Гасанова З.У. 71
Гильфанов А.К. 120
Мухаметзанов И.Т. 120
Глаголев В.А. 73
Глаголев М.В. 75
Гладков Е.Г. 77
Головацкая Е.А. 80
Голубев С.Н. 82, 85, 87
Голубева Е.И. 89
Голубятников Л.Л. 91
Грабарник П.Я. 92
Грабовский В.И. 94
Гурин П.Д. 251
Дергунова Н.Н. 199
Дещеревская О.А. 143
Джалалова М.И. 97
Дмитриева О.А. 205
Дмитрук Ю.М. 100
Долгоносов Б.М. 102
Долженко О.В. 237
Дубровская Л.И. 130
Дюкарев Е.А. 105
Ермолаев А.М. 145
Ефименко А.С. 92
Жданова О.Л. 107
Завалишин Н.Н. 109, 113, 115
Замолодчиков Д.Г. 118
Зарипов Ш.Х. 120
Захарова С.А. 122
Зациорский А.С. 237
Зубкова Е.В. 124, 266
Иванова Н.В. 271
Иванова Ю.Д. 126, 159, 161
Ильин И.Н. 128
Инишева Л.И. 130
Каратаева Т.А. 189
Катаев С.Г. 130
Кириллов А.Н. 133
Клепцова И.Е. 75
Ковалев А.В. 231
Коган Р.М. 73
Колобов А.Н. 135
Комаров А.С. 35, 62, 137, 266, 271
Коноваленко И.А. 30
Корчагин К.А. 102
Костерина Е.А. 139
Красноперова П.А. 249
Кузьмин С.Р. 269
Кузьмина Н.А. 269
Кукоба Н.А. 161
Кулаков М.П. 141, 147
Курилова Е.В. 147
Курбатова Ю.А. 143
Курганова И.Н. 145
Курочкина Г.Н. 149
Кшнясев И.А. 145, 152
Ланкина Е.П. 156
Ларионова А.А. 137, 145
Ларько А.А. 159, 161
Лебедев В.Г. 137
Левашова Н.Т. 122, 163
Логофет Д.О. 166
Максютов Ш.Ш. 75
Манов А.В. 271
Мастеров В.Б. 218
Минкина Т.М. 169

Мироненко Л.М. 171
Молчанов А.Г. 174
Москаленко С.В. 271
Мухартова Ю.В. 177
Мякшина Т.Н. 21
Надпорожская М.А. 180
Неверова Г.П. 182
Немчинова А.В. 184
Новенко Е.Ю. 189
Овчинникова Т.М. 187
Ольчев А.В. 143, 163, 177, 189
Омельченко А.В. 191, 199
Орлов О.Л. 145
Орлова Е.Е. 234
Орлова М.В. 145
Орлова Н.Е. 234
Осипова С.В. 97
Павлова В.Н. 194
Парфенова Е.И. 269
Пашаев А.Б. 222
Перевертин К.А. 196
Петросян В.Г. 128, 191, 199
Плехов О.Г. 77
Подгорный К.А. 202, 205
Попов Д.В. 37
Попов Н.А. 240
Почекутов А.А. 26
Пузаченко Ю.Г. 208, 229
Пых Ю.А. 213
Редикульцева Н.И. 37
Рожков В.А. 215
Романов М.С. 218
Рочева Л.К. 271
Рыжова И.М. 220
Рыжова М.С. 177
Рысков А.П. 191
Сабзиев Э.Н. 222
Салтыков М.Ю. 224
Самбуу А.Д. 226, 279
Сандлерский Р.Б. 229
Саранча Д.А. 254
Свиридова О.В. 56
Секретенко О.П. 231
Семенов А.М. 56
Семенова Н.Н. 234, 237
Сенашова В.А. 269
Сидорова В.Ю. 240
Смирнов В.Э. 243
Смирнов Н.В. 245
Суховольский В.Г. 126, 187, 231, 247, 249
Сухорученко Г.И. 237
Тарасова О.В. 249
Тарко А.М. 258
Татаринов Ф.А. 174
Тетюхин С.В. 77
Титлянова А.А. 279
Топаж А.Г. 251
Тращеев Р.В. 254
Трофимова Г.Ю. 256
Тульская Н.И. 89
Уланова Н.Г. 166
Усатюк В.В. 258
Филиппов И.В. 75
Фрид А.С. 261
Фрисман Е.Я. 107, 264
Фролов П.В. 62, 266
Хижняк С.В. 156
Хлебопрос Р.Г. 64, 66
Хохлова О.С. 21
Цыбизов Е.И. 37
Чебакова Н.М. 269
Черлинка В.Р. 100
Шанин В.Н. 137, 271
Шашков М.П. 271
Шевырногов А.П. 159
Шестибратов К.А. 137
Шибарева С.В. 282
Шлюфман К.В. 273
Эюбова С.М. 222
Юрезанская Ю.С. 275, 277