ОТДЕЛЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ НАУК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И
БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПОЧВОВЕДЕНИЯ РАН

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
ПРОБЛЕМ БИОЛОГИИ РАН

Российский фонд фундаментальных исследований

Материалы

Второй Национальной конференции с международным участием

ЭКО
МАТ
МОД

Математическое моделирование в экологии

23-27 мая 2011 г.
г. Пущино

УДК 57+51-7
ББК 28в6
М34

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

Математическое моделирование в экологии / Материалы Второй Национальной конференции с международным участием, 23-27 мая 2011 г.- Пущино, ИФХиБПП РАН, 2011.– 304с.

Материалы Второй Национальной 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, 2011
© Эмблема конференции В.Н. Шанин, 2009

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель **Комаров Александр Сергеевич**, проф., д.б.н., ИФХиБПП 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, чл.-корр. РАН, проф., д.ф.-м.н., ИБФ СО РАН, Красноярск

Коровин Георгий Николаевич, чл.-корр. РАН, д.с.-х.н., ЦЭПЛ РАН, Москва

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

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

Полуэктов Ратмир Александрович, проф., д.т.н., АФИ РАСХН, Санкт-Петербург

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

Розенберг Геннадий Самуилович, чл.-корр. РАН, проф., д.б.н., ИЭВБ РАН, Тольятти

Руховец Леонид Айзикович, проф., д.ф.м.-н., СПБ ЭМИ РАН, Санкт-Петербург

Семенов Сергей Михайлович, проф., д.ф.-м.н., ИГКЭ Госкомгидромета и РАН

Сиротенко Олег Дмитриевич, проф., д.-ф.-м.н. Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, Обнинск

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

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

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

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

Чертов Олег Георгиевич, проф.**,** д.б.н., СПб ЛТА, Санкт-Петербург

Якушев Виктор Петрович, чл.-корр. РАСХН, проф., д.с-х.н**.,** АФИ РАСХН, Санкт-Петербург

Дорогие коллеги!

Вторая Национальная конференция с международным участием «Математическое моделирование в экологии» проводится Учреждением Российской академии наук Институтом физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН и Учреждением Российской академии наук Институтом математических проблем биологии РАН 23 – 27 маня 2011 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:

- моделирование, 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 около 130 материалов докладов из России, США, Германии, Канады, Азербайджана, Республики Молдова.

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
- Модели популяций и сообществ
- Моделирование циклов элементов в наземных экосистемах
- 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 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

А.С. Комаров

О Г Л А В Л Е Н И Е	5
ДИНАМИКА БИОМАСС ВИДОВ ФИТОПЛАНКТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ *А.И. Абакумов*	18
УСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ NO_X: ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ОЦЕНКИ *Аверкиева И.Ю. Припутина И.В.*	20
THE DETERMINATION OF HG AND AS DISTRIBUTIONS AND BIOACCUMULATION CAPACITIES OF NATURAL PLANT SPECIES ON AN ABANDONED MERCURY MINE AREA *Akay Aysen, Guner Tunc*	22
THE EFFECTIVENESS OF MYCORRHIZA AND LUPIN (*LUPINUS ALBUS*) ON THE REMEDIATION OF CONTAMINATED SOILS ON MINE SITES *Akay Aysen, Karaarslan Emel*	24
АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ, ИХ ТОЧНОСТЬ И ПРЕДЕЛЫ ПРИМЕНИМОСТИ *Архангельская Т.А., Лукьященко К.И.*	26
ПОНИЖЕННАЯ ПРИСПОСОБЛЕННОСТЬ ГЕТЕРОЗИГОТЫ И ПОЛИМОРФИЗМ В ДВУХВОЗРАСТНОЙ ПОПУЛЯЦИИ С ОДНИМ ПЛЕЙОТРОПНЫМ ЛОКУСОМ *Бажина Д.А., Жданова О.Л.*	28
МОДЕЛЬ СИМПАТРИЧЕСКОГО ВИДООБРАЗОВАНИЯ ВНУТРИ ОДНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НИШИ *Барцев С.И., Волкова А.Г.*	30
НЕЙРОСЕТЕВОЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА *Барцев С.И., Почекутов А.А., Припутина И.В.*	32
ПРИНЦИП НАИХУДШЕГО СЦЕНАРИЯ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ НА БИОСФЕРНУЮ ДИНАМИКУ *Барцев С.И., Щемель А.Л., Иванова Ю.Д.*	34
УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АГРОПРОИЗВОДСТВА *Башилов А.М., Королев В.А., Свентицкий И.И.*	36
МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА И ПРИНЦИП НАИХУДШЕГО СЦЕНАРИЯ *Белолипецкий П.В., Барцев С.И., Дегерменджи А.Г.*	38
ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СТАДА *Белотелов Н.В., Коноваленко И.А.*	40

БИФУРКАЦИИ В МОДЕЛЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НИШ: ГРАНИЦЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ ОБЩЕГО РЕСУРСА *Березовская Ф.С , Карева И.Г., Кастийо-Чавес.К.*	41
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОЧВЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ БАЛАНСА АЗОТА И УГЛЕРОДА И ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ *Благодатский С.А., Гроте Р., Кизе Р., Буттербах- Баль К.*	43
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГУМУСОВОГО СОСТОЯНИЯ ДЕРНОВО–ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УДОБРЕНИЙ *Болтунова А.И., Беличенко М.В., Романенков В.А., Литвинский В.А.*	45
LIMIT BEHAVIOR OF A DISTRIBUTED REPLICATOR SYSTEM *Bratus A.S., Posvyanskii V. P., Novozhilov A.S.*	47
НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ СООБЩЕСТВ МИКРООРГАНИЗМОВ *Вавилин В.А.*	48
МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ ЗАПАСОВ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА *Варчева С.Е.*	50
ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ *Волошенкова Т. В.*	52
ЭВОЛЮЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БОБОВО-РИЗОБИАЛЬНОГО СИМБИОЗА: ИНТЕГРАЦИЯ, СПЕЦИФИЧНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАРТНЕРОВ *Воробьев Н.И., Проворов Н.А., Свиридова О.В., Пищик В.Н.*	54
К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ СЦЕНАРИЕВ РАСЧЕТА ВЫЧИСЛИМЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАФАМИ РАБОТ В СЕТЕВОЙ БИБЛИОТЕКЕ *Воротынцев А.В.*	57
МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И ВЛАГИ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ С УЧЕТОМ БАЛАНСА ЭНЕРГИИ *Воротынцев А.В.*	59
ИКСОДОВЫЙ КЛЕЩ: УСТОЙЧИВОСТЬ ПОПУЛЯЦИИ И ПРОБЛЕМЫ ИЗЪЯТИЯ ИЗ ЭКОСИСТЕМ *Вшивкова О.А., Хлебопрос Р.Г.*	61
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАСТБИЩНОЙ НАГРУЗКИ В ЭКОСИСТЕМАХ СТЕПНЫХ ЛУГОВ *Габидуллин Ю.З., Маликов Р.Ф.*	62

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СУТОЧНОЙ ДИСКРЕТНОСТИ ДЛЯ УСЛОВИЙ АЛТАЙСКОГО КРАЯ *Гавриловская Н.В., Хворова Л.А.*	63
ДИНАМИКА БИОМАССЫ ВЕТВЕЙ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ ДЕРЕВА *Галицкий В.В.*	65
РАСЧЕТ ВДЫХАЕМОЙ ФРАКЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В НИЗКОСКОРОСТНОЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ *Гильфанов А.К., Зарипов Ш.Х., Мухаметзанов И.Т.*	68
ПОДХОДЫ К ИДЕНТИФИКАЦИИ ГАЗООБМЕНА НА ГРАНИЦЕ ЭКОСИСТЕМА/АТМОСФЕРА: МЕТОД ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ *Глаголев М.В., Сабреков А.Ф.*	70
МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА *Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А.*	72
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СООБЩЕСТВА МЕТОДОМ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ *Голубев С.Н.*	74
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ПРОСТРАНСТВЕ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЙ *Голубев С.Н.*	75
МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУГОВОРОТА АЗОТА В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ *Голубятников Л.Л., Аржанов М.М.*	77
МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ РЕЧНОГО БОБРА (CASTOR FIBER L.) *Горяйнова З.И., Петросян В.Г., Завьялов Н.А., Панкова Н.Л.*	78
СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭКОЛОГИИ: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ТИПИЧНЫЕ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ *Грабарник П.Я.*	80
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ ЮЖНОГО ПРИУРАЛЬЯ *Давлетшина М.Р.*	82
ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПОЧВ БАШКОРТОСТАНА *Давлетшина М.Р., Асылбаев И.Г.*	84

СТАТИСТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ МИКРОБНОЙ ПОПУЛЯЦИИ В РЕЧНОЙ ВОДЕ *Долгоносов Б.М., Корчагин К.А., Мессинева Е.М.*	86
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТОРФЯНОЙ ПОЧВЫ *Дюкарев Е.А.*	88
ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ НАЗЕМНОЙ БИОТЫ НА НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬ ОЦЕНОК ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КЛИМАТА И УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА В XXI ВЕКЕ *Елисеев А.В.*	90
МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА И АЗОТА В БОЛОТНЫХ И ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ *Завалишин Н.Н.*	92
СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТРОФИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ТИПА «РЕСУРС-ПОТРЕБИТЕЛЬ» *Завалишин Н.Н.*	94
АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПАЛЕОЦИКЛОВ *Зайцев В.Н.*	98
БИМОДЕЛЬНЫЙ РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ УГЛЕРОДНОГО БЮДЖЕТА ЛЕСОВ РОССИИ ЗА 1988-2008 гг. *Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Грабовский В.И., Корзухин М.Д.*	100
ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РЕПРЕЗЕНТАТИВНОГО ИНТЕРВАЛА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОБЛАСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ВИДОВ СПЕЦИАЛИСТОВ И ГЕНЕРАЛИСТОВ ПО ШКАЛАМ Д.Н.ЦЫГАНОВА *Зубкова Е.В.*	102
БАЗА ДАННЫХ «РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛОБАРИИ ЛЕГОЧНОЙ *(LOBARIA PULMONARIA)*» *Иванова Н.В., Шашков М.П.*	104
МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО РОСТА ДВУХ ЛЕСООБРАЗОВАТЕЛЕЙ *Иванова Н.С.*	106
ОБ ОДНОЙ МОДИФИКАЦИИ МОДЕЛИ БЕДДИНГТОНА-ФРИ-ЛАУТОНА ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ПАРАЗИТ-ХОЗЯИН *Иванчиков П.В., Недорезов Л.В.*	108
ЭКОСИСТЕМА ПРИМОРСКОГО ГОРОДА: КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ, СЦЕНАРНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ *Ильченко И.А.*	110

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИРОСТА ДРЕВЕСИНЫ ВДОЛЬ СТВОЛА ДЕРЕВА: ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ *Каплина Н.Ф.*	112
ЕСТЕСТВЕННЫЙ ОТБОР СТРАТЕГИЙ СОЗДАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НИШ В НЕОДНОРОДНЫХ МОДЕЛЯХ «РЕСУРС-ПОТРЕБИТЕЛЬ» *Карев Г.П., Березовская Ф.С., Карева И.Г.*	114
ПЕРЕНОРМИРОВКА КОНСТАНТ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ТЕПЛОВОЙ ИНЕРЦИИ ПРИ УЧЕТЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЯХ *Карнаухов А.В., Карнаухова Е.В.*	116
КЛИМАТИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ АНТАРКТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ «ВОСТОК» И «КУПОЛ С» *Карнаухов А.В., Карнаухова Е.В.*	118
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ ГЛОБАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ *Картушинский А.В.*	121
МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ *Ковалев А.В.*	123
ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОСТА ДЕРЕВА К ОПИСАНИЮ И АНАЛИЗУ МЕЖВИДОВОЙ КОНКУРЕНЦИИ В ДРЕВОСТОЕ *Колобов А.Н., Фрисман Е.Я.*	124
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА БИОСФЕРЫ *Корж В.Д.*	126
СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГИДРОСФЕРЕ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТАНДАРТ *Корж В.Д.*	128
МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРЕАЛОВ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД РОССИИ *Корзухин М.Д., Цельникер Ю.Л., Семенов С.М., Титкина С.Н.*	130
СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА В РЕЧНОЙ ВОДЕ *Корчагин К.А., Мессинева Е.М., Долгоносов Б.М.*	132
БЮДЖЕТ ПИТАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ *Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Паршина Е.К.*	135

PROJECTIONS OF CHANGES IN RIVER RUNOFF AND FLOOD CONDITIONS IN GERMANY UNDER CLIMATE CHANGE *Krysanova Valentina, Shaochun Huang and Fred Hattermann*	137
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ В МОДЕЛЯХ МЕТАПОПУЛЯЦИЙ *Кулаков М.П.*	139
ЭМПИРИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЮЖНОГО ПОДМОСКОВЬЯ *Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О.*	141
ДИНАМИКА НАСЕЛЕНИЯ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В ЮЖНОЙ ТАЙГЕ: РЕКОНСТРУКЦИЯ АТТРАКТОРА *Кшнясев И.А., Давыдова Ю.А.*	143
ПОПУЛЯЦИОННЫЕ ЦИКЛЫ ЛЕСНЫХ ПОЛЕВОК В ЮЖНОЙ ТАЙГЕ – СЦЕНАРИЙ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ «ХИЩНИК–ЖЕРТВА»? *Кшнясев И.А., Давыдова Ю.А., Маклаков К.В.*	145
МЕТОДЫ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ АДАПТИВНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ ЭКОСИСТЕМ *Ланкин Ю.П., Басканова Т.Ф.*	147
АДАПТИВНАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ *Ланкин Ю.П., Печуркин Н.С.*	149
МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТРАВЯНОГО ПОКРОВА В ГОРОДСКИХ САДОВО-ПАРКОВЫХ ЭКОСИСТЕМАХ *Лантратова А.С., Платонова Е.А., Шредерс М.А.*	151
ПРОБЛЕМА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТИ И МАСШТАБНЫЕ УРОВНИ ВАРЬИРОВАНИЯ ^{137}Cs В ПРИРОДНЫХ ЛАНДШАФТАХ *Линник В.Г.*	153
ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ^{137}Cs В ЛАНДШАФТАХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ *Линник В.Г., Соколов А.В.*	154
ПРИМЕНЕНИЕ ЛОГИТ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИТОТОКСИЧНОСТИ ПРИ НЕФТЯНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ ПОЧВ *Липатов Д.Н., Елисеева А.В.*	156
ДВЕ ПАРАДИГМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ЭКОЛОГИИ. ВОЗМОЖЕН ЛИ СИНТЕЗ? *Логофет Д.О.*	159

ПРИМЕНЕНИЕ T&P МОДЕЛИ ДЛЯ ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ДЫХАНИЯ ПОЧВЫ В ЭКОСИТЕМАХ ЮЖНО-ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ *Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Петров А.С.*	161
МОЗАИЧНОСТЬ ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ И ВЗАИМОСВЯЗИ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ-ПОЧВЕННАЯ БИОТА-ПОЧВА *Лукина Н.В., Смирнов В.Э., Орлова М.А., Камаев И.О., Кравченко Т.В., Краснов Д.А*	163
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ЛЕГКИХ ДЕРНОВО-СЛАБОПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ПРИОКСКО-ТЕРРАСНОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА *Лукьященко К.И., Архангельская Т.А.*	165
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИНЕРАЛЬНОГО И ОРГАНИЧЕСКОГО АЗОТА В ПОЧВЕ *Лямкина Ю.Б.*	167
ДВА ПРЕДЕЛЬНЫХ ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА *Маергойз Л.С., Салагаева А.В., Сидорова Т.Ю., Хлебопрос Р.Г.*	168
ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ЦИКЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ. ПРИНЦИП "БРИТВЫ ОККАМА" *Маклаков К.В., Кшнясев И.А.*	170
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС *Мельников А.Ю., Хлебопрос Р.Г.*	172
ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ВОДЫ КРАСНОЯРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА *Мельников А.Ю., Сапожников В.А.*	173
КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ КОНВЕКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ В ПОЧВЕ *Микайылов Ф.Д.*	175
ДВА ПОДХОДА К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ РАЗЛОЖЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ В ПОЧВЕ: ВЗГЛЯД ИЗВНЕ И ИЗНУТРИ *Мироненко Л. М.*	176
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОБНОЙ СУКЦЕССИИ *Мироненко Л. М.*	178
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ В ТЕЧЕНИЕ ДНЯ СВЕТОВЫХ КРИВЫХ ФОТОСИНТЕЗА *Молчанов А.Г.*	180

РЕЖИМЫ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ПОПУЛЯЦИИ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ВОЗРАСТОМ НАСТУПЛЕНИЯ ПОЛОВОЙ ЗРЕЛОСТИ *Неверова Г.П.*	182
ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ СОСНОВОЙ ПЯДЕНИЦЫ: АНАЛИЗ С ПОМОЩЬЮ ДИСКРЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ *Недорезова Б.Н., Недорезов Л.В.*	184
ПРАВ ЛИ БЫЛ Г.Ф. ГАУЗЕ? *Недорезов Л.В.*	186
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ОПРЯЖЕНО-ИСКЛЮЧАЕМЫХ ФРАГМЕНТОВ ФЕНОТИПА ПРИ ПАСПОРТИЗАЦИИ ВНУТРИПОПУЛЯЦИОННОГО РАЗНООБРАЗИЯ *Неуймин С.И.*	188
СУКЦЕССИИ В ЛЕСНЫХ ЦЕНОЗАХ: МОДЕЛЬ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВТОРОГО РОДА *Овчинникова Т.М., Суховольский В.Г.*	191
ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОГО И ФАКТИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЦЕНТРАЛЬНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В ГОЛОЦЕНЕ *Ольчев А.В., Новенко Е.Ю.*	193
МОДЕЛЬ ГЕНЕТИКО-ПОПУЛЯЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ПАРТЕНОГЕНЕТИЧЕСКОГО ВИДА КАВКАЗСКОЙ СКАЛЬНОЙ ЯЩЕРИЦЫ DAREVSKIA UNISEXUALIS НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА *Омельченко А.В., Вергун А.А., Петросян В.Г., Корчагин В.И., Токарская О.Н.*	195
РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРИЗНАКОВ ИНТРОДУЦИРУЕМЫХ СОРТОВ КАРТОФЕЛЯ *Оплеухин А.А., Стрельцова Т.А., Федюнина М.В.*	197
АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ СРЕДНЕЙ СИБИРИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ *Парфенова Е.И., Чебакова Н.М., Лысанова Г.И.*	199
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОПУЛЯЦИЙ ОРГАНИЗМОВ (НЕ ПОДЛЕЖАЩИХ ПРЯМОМУ ПЕРЕСЧЕТУ) МЕТОДОМ «НУЛЕВЫХ ПРОБ» НА ПРИМЕРЕ ФИТОПАРАЗИТИЧЕСКИХ НЕМАТОД *Перевертин К.А.*	201
ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННО-ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ДОЛГОВРЕМЕННЫХ РЯДОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ (НА ПРИМЕРЕ МЕТЕОСТАНЦИИ Г. КОЛОМНА, ЮЖНОЕ ПОДМОСКОВЬЕ) *Петров А.С., Курганова И.Н.*	203

МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕНИЯ ВАЖНЕЙЩИХ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ ДИКИХ КОПЫТНЫХ (ЛОСЯ, КОСУЛИ, КАБАНА) РОССИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МНОГОЛЕТНОГО МОНИТОРИНГА *Петросян В.Г., Дергунова Н.Н., Бессонов С.А., Омельченко А.В.*	205
К МЕТОДОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ: ПЕРСПЕКТИВЫ СИНТЕЗА МЕРОЛОГИЧЕСКОГО И ХОЛИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДОВ *Печуркин Н.С.*	207
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ ЧЕЛОВЕКА И ВЫСШИХ ХИЩНИКОВ: ЛОГИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ *Печуркин Н.С., Сомова Л.А.*	209
ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ БУФЕРНОЙ ЕМКОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРИРОДНОГО КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОДАХ *Повар И.Г.*	211
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЫ "НАСЫЩЕННЫЙ ВОДНЫЙ РАСТВОР - МИНЕРАЛ" *Повар И., Русу В.*	213
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПРОСТРАНСТВЕННО ОДНОРОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ (N-P-Z-D) ПЛАНКТОННОЙ ПИЩЕВОЙ ЦЕПИ *Подгорный К.А.*	216
ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНЕМНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ БАЛАНСОВ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ЭКОСИСТЕМЕ НЕВСКОЙ ГУБЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА (ПО ДАННЫМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ) *Подгорный К.А.*	218
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ: А.А.ЛЯПУНОВ И СОВРЕМЕННОСТЬ *Полуэктов Р.А.*	220
ПРОБЛЕМЫ СЕМАНТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ "УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ" И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ. *Пузаченко Ю.Г.*	222
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ БИОСФЕРЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СО СПУТНИКА MODIS *Пузаченко Ю.Г., Сандлерский Р.Б.*	224
МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОЛОВОЙ СТРУКТУРЫ НА ДИНАМИКУ ЧИСЛЕННОСТИ ПОПУЛЯЦИИ *Ревуцкая О.Л., Фрисман Е.Я.*	226

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АГРОЛЕСОЛАНДШАФТОВ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЕ *Рулев А.С., Юферев В.Г., Юферев М.В.*	228
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР *Рулева О.В.*	230
РЕАКЦИЯ ЭКОСИСТЕМ БОЛЬШИХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ОЗЕР НА СНИЖЕНИЕ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ *Руховец Л.А., Петрова Н.А., Меншуткин В.В., Астраханцев Г.П., Минина Т.Р., Полосков В.Н.*	232
ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ СРЕДЫ ПО ВИДОВОМУ СОСТАВУ РАСТИТЕЛЬНОГО СООБЩЕСТВА *Савельев А.А., Мухарамова С.С.*	234
ВЛИЯНИЕ ТИПА МЕТАБОЛИЗМА НА УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛЕЙ ЭКОСИСТЕМ *Салтыков М.Ю., Барцев С.И., Ланкин Ю.П.*	236
УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ *Салугин А.Н., Сидорова Е.А.*	238
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ОТОБРАЖЕНИИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КОЛЕБАНИЙ ЧИСЛЕННОСТИ ЖИВОТНЫХ *Саранча Д.А., Юрезанская Ю.С.*	240
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННОЙ ПАРАДИГМЫ. *Свентицкий И.И., Мудрик В.А.*	242
УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ: ПОРЯДОК И ХАОС В ПРИРОДНЫХ СИСТЕМАХ (НА ПРИМЕРЕ ЛОГИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ) *Светлосанов В.А., Кудин В.Н.*	245
ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА РАСЧЁТА МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ ЗАПАСОВ ПРОДУКТИВНОЙ ВЛАГИ И СОСТАВЛЯЮЩИХ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПАХОТНЫХ ПОЧВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ РУССКОЙ РАВНИНЫ *Семендяев А.К.*	247
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГУМИФИКАЦИИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ *Семенова Н.Н.,Орлова Н.Е.*	249

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПЕСТИЦИДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ *Семенова Н.Н. , Новожилов К.В., Сухорученко Г.И.*	251
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭВОЛЮЦИИ КЛИМАТА И АГРОСФЕРЫ РОССИИ НА ПРОТЯЖЕНИИ XX И XXI-ГО СТОЛЕТИЙ *Сиротенко О.Д., Павлова В.Н., Семендяев А.К.*	253
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИК АЗОТА И ВЛАГИ В АГРОЦЕНОЗЕ *Сорокин О.Д., Сорокина О.Л.*	255
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА НАБУХАНИЯ ТЯЖЕЛОГЛИНИСТЫХ ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ *Сулейманов Н.Р.*	257
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНЫЕ РЕШЕНИЯ *Суховольский В.Г.*	259
МОДЕЛИ ВСПЫШЕК МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛОГ МОДЕЛЕЙ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ВТОРОГОРОДА *Суховольский В.Г., Пальникова Е.Н., Тарасова О.В.*	261
МОДЕЛИ ИНВАЗИЙ И РИСКОВ ВСПЫШЕК МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ НА НОВЫХ ТЕРРИТОРИЯХ *Тарасова О.В., Суховольский В.Г.*	263
МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА В БИОСФЕРЕ С УЧЕТОМ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ *Тарко А.М., Усатюк В.В.*	264
ОПЫТ РЕГИОНАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ CO_2FIX НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ЗАПАДНОЙ БОГЕМИИ *Татаринов Ф.А., Ченчала Э. (Cienciala E.)*	267
БЫСТРЫЕ ЦИКЛЫ В КРУГОВОРОТЕ УГЛЕРОДА И АЗОТА *Титлянова А.А.*	269
ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЭКОЛОГИИ: PRO & CONTRA *Топаж А.Г.*	271
АЛГОРИТМ МЕТАЗНАНИЙ ГЕОЭКОЛОГИИ *Турков С.Л.*	273

СОВМЕЩЕНИЕ БАЗ ДАННЫХ ЛЕСОИНВЕНТАРИЗАЦИИ И ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И КАРТИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ *Усольцев В.А. , Воронов М.П.., Кох Е.В., Бергман И.Е., Уразова А.Ф., Борников А.В., Жанабаева А.С., Мезенцев А.Т., Крудышев В.В.*	275
ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЧИСЛЕННОСТИ РИККЕРОВСКИХ ПОПУЛЯЦИЙ *Фишман Б.Е., Шлюфман К.В.*	277
ГИПОТЕЗА ДОКУЧАЕВА – ЦЕНТРАЛЬНАЯ ИДЕЯ ЦИФРОВОГО ПРОГНОЗНОГО ПОЧВЕННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ *Флоринский И.В.*	279
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЕСЕННИХ ФЕНОДАТ У ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ *Фомина В. А., Овчинникова Т. М., Суховольский В. Г.*	281
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОМЫСЛОВЫХ ПОПУЛЯЦИЙ *Фрисман Е.Я.*	283
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЛОВ КАЛЬЦИЯ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ *Хораськина Ю.С., Комаров А.С., Безрукова М.Г., Быховец С.С.*	285
ЧТО ПРОИСХОДИТ ПРИ ОСВОЕНИИ В РУБКУ СЛАБОНАРУШЕННЫХ ЛЕСОВ: ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ EFIMOD ДЛЯ ЧАСТИ ЛИСИНСКОГО УЧЕБНО-ОПЫТНОГО ЛЕСНИЧЕСТВА *Чертов О.Г., Грязькин А.В., Смирнов А.П., Ковалев Н.В.*	288
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА БАЛАНС УГЛЕРОДА В ТАЕЖНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАНАДЫ *Чертов О.Г., Комаров А.С., Грязькин А.В., Смирнов А.П., Бхатти Д.С.*	290
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ БАЗ В ПОПУЛЯЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ *Чижикова Н.А., Фардеева М.Б., Прохоров В.Е.*	292
ОТКЛИК ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ: ПРОГНОЗ СРЕДСТВАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ *Шанин В.Н., Комаров А.С., Михайлов А.В., Быховец С.С.*	295
ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ *Шарый П.А.*	297
УСТОЙЧИВЫЕ СОЧЕТАНИЯ ПАР ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВЕ И СОГЛАСОВАННОСТЬ ИХ УЗОРОВ В ЛАНДШАФТЕ *Шарый П.А., Пинский Д.Л.*	299

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАСЕЛЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ МЕЗОФАУНЫ *Шашков М.П.*	301
ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ *Якушев В.П., Буре В.М.*	303

ДИНАМИКА БИОМАСС ВИДОВ ФИТОПЛАНКТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ

Абакумов А.И.

Учреждение Российской академии наук Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
abakumov@iacp.dvo.ru

Аннотация: продукция фитопланктона составляет основу жизнедеятельности водоема. Дистанционные методы зондирования океана позволяют получать оценки содержания хлорофилла и минеральных веществ в поверхностном слое. На базе этих данных можно проводить расчеты в математических моделях динамики численности основных видов фитопланктона с целью оценки продукционных характеристик. В работе представлены модели динамики биомасс основных видов фитопланктона. Исследованы качественные свойства решений на структурном уровне.

Описание моделей

Стратегия деятельности живого организма определяется не только окружающей средой, но и состоянием самого организма. Состояние растительного микроорганизма в части питания зависит от физико-химических процессов в клетке (Droop, 1974; Monod, 1949). Один из конкретных вариантов моделирования этих процессов предложен в монографии (Силкин, Хайлов, 1988).

В наших моделях фитопланктон представлен m видами, их содержание в среде обозначено y_i для вида i. Минеральное питание растительных организмов разбивается на n групп сходных веществ (на основе азота, фосфора, кремния и т.п.). Содержание минеральных веществ в среде обозначается z_j. Потребление питательных веществ микроорганизмами осуществляется с удельной скоростью $\nu_{ij}(z_j, q_{ij})$, а рост растительной биомассы может происходить с удельной скоростью $\mu_{ij}(q_{ij})$ в зависимости от вектора $z = (z_j)_{j=1}^n$ содержания минеральных веществ во внешней среде и матрицы $q = (q_{ij})_{i,j=1}^{m,n}$ содержания питательных веществ в клетках растений. Но скорость роста отдельного вида определяется на основе принципа Либиха (Алексеев, Крышев, Сазыкина, 1992): она ограничена скоростью роста наименее производительного минерального вещества. Через D обозначена скорость протока вещества в системе, через z_0 - содержание минеральных веществ во входящем потоке. Открытая модель динамики масс проточной системы имеет вид (Силкин, Хайлов, 1988):

$$\begin{cases} \dfrac{dy_i}{dt} = (\mu_i(q_i) - D)y_i \\ \dfrac{dz_j}{dt} = D(z_{j0} - z_j) - \sum\limits_{i=1}^{m} v_{ij}(z_j, q_{ij})y_i \qquad \text{для } i = 1,...,m;\ j = 1,...,n. \\ \dfrac{dq_{ij}}{dt} = v_{ij}(z_j, q_{ij}) - \mu_i(q_i)\cdot q_{ij} \end{cases} \tag{1}$$

Под q_i понимается вектор $q_i = (q_{ij})_{j=1}^n$, функция $\mu_i(q_i)$ вычисляется по формуле (3).

В сравнении с моделью (1) построим замкнутую модель (2). Эта модель описывает динамику биомасс основных видов фитопланктона, минеральных веществ и отмершей органики. Блок отмершей органики с массами $s = (s_j)_{j=1}^n$ введен для описания замкнутого цикла преобразования веществ. Функции $r_j(s_j)$ описывают скорости преобразования органики в минеральные соединения при бактериальном разложении. Удельные скорости

элиминации микроорганизмов задаются функциями $e_i(y_i)$ их содержания в среде. Замкнутая модель приобретает вид системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dy_i}{dt} = \mu_i(q_i)y_i - e_i(y_i)y_i \\ \dfrac{dz_j}{dt} = r_j(s_j) - \sum_{i=1}^{m} v_{ij}(z_j, q_{ij})y_i \\ \dfrac{ds_j}{dt} = \sum_{i=1}^{m} e_i(y_i)q_{ij}y_i - r_j(s_j) \\ \dfrac{dq_{ij}}{dt} = v_{ij}(z_j, q_{ij}) - \mu_i(q_i)\cdot q_{ij} \end{cases} \quad \text{для} \quad i = 1,...,m;\ j = 1,...,n. \tag{2}$$

Функция $\mu_i(q_i)$ определяется по принципу «узкого места» Либиха формулой:

$$\mu_i(q_i) = \min_{j=1,...,n} \mu_{ij}(q_{ij}). \tag{3}$$

Открытые модели согласуются с замкнутыми общими зависимостями, что позволяет провести сравнение свойств решений в этих моделях.

Свойства равновесий

В открытой модели (1) имеется конечное число равновесных решений. Их поиск в общем случае несколько осложняется условием минимизации (3). Предложена алгоритмическая процедура выявления неотрицательных равновесий. Модель (2) имеет континуальное множество равновесных решений. Решение при положительных начальных условиях асимптотически приближается к одному равновесию, обусловленному начальными условиями. Устойчивость решений в моделях (1, 2) исследуется с применением знак-устойчивости матриц линейных приближений в окрестностях равновесий (Логофет, Ульянов, 1982).

Заключение

В рамках многомодельного подхода к изучению природных биосистем (Абакумов, Пак, 2010) рассмотрены варианты описания динамики биомасс фитопланктонного сообщества в водной экосистеме: рассмотрены замкнутые и открытые модели. Свойства равновесных решений в этих классах моделей существенно различаются. В замкнутых моделях имеется континуальное множество положительных равновесных решений, в открытых моделях для проточных систем присутствует конечное множество изолированных неотрицательных равновесных решений. Устойчивость решений выявляется в частных случаях, однако численные эксперименты указывают на устойчивость равновесных решений при всех содержательно правдоподобных численных значениях параметров.

Литература

Абакумов А.И., Пак С.Я. Динамика численности фитопланктона в зависимости от минерального питания (математические модели) // Информатика и системы управления.- 2010.- № 3 (25).- С. 10-19.

Алексеев В.В., Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Физическое и математическое моделирование экосистем. – С.-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992.- 366 с.

Логофет Д.О., Ульянов Н.Б. Необходимые и достаточные условия знак-устойчивости матриц // Доклады АН СССР.- 1982.- Т. 264.- №3.- С. 542-546.

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

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

Monod J. The growth of bacterial cultures // Ann. Rev. Microbiology.- 1949.- V.111.- N.2.- P. 371-394.

УСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ NO_X: ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ОЦЕНКИ

Аверкиева И.Ю. Припутина И.В.

Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия
averkieva25@rambler.ru

Аннотация: представлены результаты оценки устойчивости лесных экосистем Подмосковья к воздействию техногенных соединений азота. Расчеты допустимых уровней поступления азота с атмосферными выпадениями выполнены с использованием вероятностных методов на основе уравнений масс-баланса, учитывающих биогеохимические факторы устойчивости биогеоценозов.

«*Интуитивно ясно, что биогеоценоз, экосистема, биологическое сообщество, существующие в более или менее неизменном виде достаточно длительное время, обладают некоторой внутренней способностью противостоять возмущающим факторам, которые в изобилии поставляет внешняя среда (в том числе и человек). Эту способность биологических сообществ* (и экосистем) *обычно называют его «устойчивостью»... Возникает вопрос об определении этого свойства, причем таком, которое позволило бы измерять его и сравнивать различные системы по этому свойству.* (Цит. по: Логофет, Свирежев, 1977, стр. 187). Актуальность задач оценки параметров устойчивости экосистем и их биотических компонентов к различным видам антропогенных воздействий возрастает в условиях усиливающегося техногенного загрязнения окружающей среды, что связано с необходимостью экологического обоснования допустимых нагрузок поллютантов, учитывающих потенциал устойчивости природно-территориальных комплексов конкретных территорий и региональные приоритеты в области охраны и использования природных ресурсов. Существуют различные подходы в решении подобных задач как экспериментальными, так и математическими методами.

В данной работе представлены результаты расчетов критических (максимально допустимых) нагрузок атмосферных поллютантов (далее КН) для наземных экосистем, полученные с использованием статической модели масс-баланса, входные параметры которой представлены набором вариабильных значений. Применение простых моделей биогеохимического масс-баланса оправдано для анализа геохимически равновесных ситуаций, когда входящие и выходящие из экосистемы миграционные потоки элементов «вписываются» в диапазоны значений их многолетних «естественных» колебаний. Возможное сочетание межгодовых и пространственных флуктуаций природных характеристик может быть учтено через вариабильные показатели, используя метод Монте-Карло (Соболь, 1985).

В качестве фактора внешнего воздействия нами рассматриваются соединения азота, повышенное поступление которых в экосистемы с атмосферными выпадениями связано с эмиссией NOx промышленностью и автотранспортом. Объекты исследования – лесные экосистемы Московской области, выполняющие в столичном регионе важнейшие экологические, средообразующие и рекреационные функции, что требует их охраны в долгосрочной перспективе. Расчеты выполнены для 10 наиболее типичных групп лесов Подмосковья (включая биогеоценозы Приокско-Террасного Природного Биосферного Заповедника), отражающих сочетание климатических, почвенных и геоботанических условий региона. При оценках КН раздельно рассматривались эффекты повышенного поступления азота в лесные биогеоценозы, связанные с (i) увеличением кислотности почв и (ii) эвтрофированием экосистем. Базовое уравнение масс-баланса для расчета КН кислотообразующих соединений (к которым в составе атмосферных выпадений относятся

также оксиды серы) основано на законе эквивалентов масс в соответствии с уравнением 1 (Posch et al., 1995).

$$KH(Ac) = BC_{dep} + BC_{we} - Cl_{dep} - Bc_{upt} - ANC_{le(crit)} \quad (1)$$

где, $KH(Ac)$ – допустимое поступление в экосистему кислотообразующих соединений; BC_{dep} – поступление с атмосферными выпадениями основных катионов (Ca, Mg, K, Na); BC_{we} – внутрипочвенное выветривание катионов; Cl_{dep} – атмосферное поступление ионов Cl; Bc_{upt} – закрепление катионов (Ca+Mg+K) в растительности за счет корневого питания; $ANC_{le(crit)}$ – кислотонейтрализующая способность почв.

Расчет КН эвтрофирующих соединений для лесных экосистем ($KH(N)_{nutr}$ в уравнении 2) основан на учете биогеохимических потоков, определяющих депонирование азота в продукции древесной части фитомассы (N_{upt}), его долговременную иммобилизацию в органическом веществе почв (N_{im}), допустимое вымывание нитратов с почвенно-грунтовым стоком ($N_{le(acc)}$) и возможную денитрификацию (через коэффициент денитрификации f_{de}).

$$KH(N)_{nutr} = N_{upt} + N_{im} + N_{le(acc)} / (1 - f_{de}) \quad (2)$$

Входные параметры уравнений 1 и 2 рассчитываются в соответствии с условиями формирования конкретного миграционного потока; в нашей работе использованы данные литературных источников, Интернет-ресурсов, специализированных баз пространственно-распределенных данных и результаты собственных полевых исследований. Учет возможных нарушений в лесных биогеоценозах в результате избыточного поступления азота основан на использовании в расчетах «индикаторных критериев» – критических значений pH и концентраций азота в почве (Bobbink et al., 2008). Для каждой группы лесов выполнено 10 тысяч модельных прогонов, что позволило получить вероятностные распределения КН. Полученные результаты представлены на рис.1.

Рис. 1. Распределение величин КН кислотообразующих (слева) и эвтрофирующих соединений (справа) для основных групп лесов Московской области

Анализ распределения КН в отношении эффектов подкисления выявил достаточно четкую дифференциацию различных типов лесов Подмосковья к данному фактору воздействия. Условно они могут быть разделены на 3 класса устойчивости: 300-500, 600-800 и 1000-1200 г-экв./га в год, что соответствует суммарному поступлению оксидов азота и серы от 4-5 до 15 кг/га в год и выше. В первый класс устойчивости вошли различные варианты сосновых лесов на песчаных и супесчаных отложениях (включая переувлажненные местообитания), во второй - хвойно-широколиственые леса на дерново-подзолистых суглинистых почвах, в третий - мелколиственные и хвойно-мелколиственные леса на серых лесных почвах. В отношении эффектов эвтрофирования получена менее дифференцированная картина распределения КН. Основной диапазон устойчивости соответствует поступлению 5-10 кг N/га в год. Минимальные значения получены для лесных экосистем Приокско-Террасного заповедника, максимальные - для вейниково-разнотравных и волосистоосоковых березняков Москворецко-Окской ландшафтной провинции.

Литература

Логофет Д.О., Свирежев Ю.М. Устойчивость в моделях взаимодействующих популяций // Проблемы кибернетики. Вып.32.- М., Наука, 1977.- С.187-202.
Соболь И.М. Метод Монте-Карло.- М., Наука, 1985.– 64 с.
Bobbink R., Hicks K.,Galloway J. et al. Global impacts of atmospheric nitrogen deposition on plant diversity effects of terrestrial ecosystems – synthesis, status and prospects // Journal of Ecology 86, 2008.– P. 738-746.
Posch M., de Vries W., Hettelingh J-P. (1995) Critical loads of Sulfur and Nitrogen // Calculation and mapping of critical thresholds in Europe. RIVM Report No.259101004.– P. 31-47.

THE DETERMİNATİON OF HG AND AS DİSTRİBUTİONS AND BİOACCUMULATİON CAPACİTİES OF NATURAL PLANT SPECİES ON AN ABANDONED MERCURY MİNE AREA

Akay Aysen, Guner Tunc

Selcuk University, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science and Plant Nutrition, 42075, Campus, Konya-Turkey
aakay@selcuk.edu.tr

Abstract: in the survey studies conducted on the soils in the vicinity of an old Hg mine in order to determine the natural plants convenient for the removal of Hg and As through phytoremediation, 19 natural plant species were determined in the area where the Hg content varied between 1-200 mg kg^{-1}.

Introduction

Mercury is used in various areas of industry. It has been threatening public health for a long time through air, water, soil and eventually wastes containing food chains emitted during production activities. This causes a significant problem especially for the people who live around Hg mines. In a study conducted on Hg speciation in contaminated soils from old mining activities in Mexico which was carried out on contaminated soils on an old mining area, it was found out that chemical species of Hg in the towns of Osiris and La Zacatecana (HgS and amalgamated mercury) had high stability and low mobility. The world's governments agreed at the United Nations Environment Programme Governing Council in 2009 to prepare a legally binding instrument on mercury to protect human health and the environment from Hg. After the closure of major Hg mines in Almaden(Spain) and Idrija(Slovenia), the Khaidarkan mine in Kyrgyzstan is the last remaining major supplier of primary mined Hg to the international marketplace(Higueras et al.,2009). Hg is taken up by plants primarily through leaves, rather than through the root system, and fixed at the site of plant uptake. Thus, high ambient-air Hg concentrations cause plants to uptake and concentrate Hg in their leaves, and conversely, low ambient air Hg concentrations cause plants to give off Hg through their leaves(Lindberg et al.,1992). In mine areas where ambient air concentrations of Hg are elevated, due either to roasting Hg ore or from natural degassing of Hg from either contaminated(Lindberg et al.,1995) or naturally anomalous soil(Lindberg et al., 1979), plant communities concentrate Hg in their leaves(Rytuba, 1986). Similarly, accumulation of As in soil is due to several anthropogenic sources including mining and pharmaceutical activities, combustion of municipal solid waste and fossil fuel, smelting, and agriculture. The concern is related to the health risk of As, due to its well-known toxicity and higher mobility in soils relative to Cr and Cu. In the present study, which was started considering that both elements were carried to humans and caused problems that could lead to fatalities, survey studies were carried out on the plants existing on the old Hg mine area which is the subject of this study and the bioaccumulation capacities of the plants were determined.

Material and Method

The study was carried out on an area of approximately 4 km^2 around the dump site located near an old mercury mine site in Konya province of Turkey, where waste material excavated from the mine was accumulated after being processed. This abandoned mine had been operated for

approximately 40 years before it was put out of operation and is closed at present. However, the waste soil excavated from the mine was collected in the open and the preliminary survey studies revealed the existence of pollution both in the waste soil and in the soils and waters existing in the area surrounding the dump site. The results of the analysis showed that the waste soil had a pH of 7,91(moderately alkaline), EC of 1927 µS/cm(little salty), a lime content of 11,7% (moderately), was poor in organic matter and had a loamy sand texture. The heavy metal content of the soil is presented in Table 1.

Samples were taken from the natural plant species existing around this site at different periods and brought to the laboratory. Plant samples were washed using 0.01 N HCl solution and pure water and air-dried.

Table 1. Some element and heavy metal contents of soil

Sample	**Cu** (mg kg^{-1})	**Zn** (mg kg^{-1})	**Mn** (mg kg^{-1})	**Ca** **(%)**	**P** **(%)**	**Mg** **(%)**	**Na** **(%)**	**K** **(%)**	**Fe** **(%)**
Waste soil	62.8	121	466	15.34	0.027	0.53	0.093	1.45	1.72
Sample	Pb (mg kg^{-1})	Ni (mg kg^{-1})	As (mg kg^{-1})	Cd (mg kg^{-1})	Sb (mg kg^{-1})	Cr (mg kg^{-1})	Al (%)	Sn (mg kg^{-1})	Hg (mg kg^{-1})
Waste soil	309.6	66.8	1181	4.2	2869	70	3.51	1.8	200

Afterwards, the samples were kept at 65 C° for 48 hours and ground using a steel grinder. The elemental analysis of the plant root and leaf samples was carried out by taking extracts in a mixture consisting of 4 acids (HNO_3-$HClO_4$-HF and HCl) and the reading process was performed using ICP-ES and ICP-MS device. These procedures were carried out by Canada Acme Analytical Laboratories.

Result and Discussion

The names of the 19 plant species collected from the vicinity of the waste soil dump site are as follows respectively: 1.Euphorbiaceae, *Andrachne* sp., 2.Labiatae, *Stachys* sp., 3. Legumineae, *Astragalus* sp., 4.Poaceae, *Triticum* sp., 5.Guttiferae, *Hypericum* sp., 6.Compositae, *Echinops* sp., 7.Compositae, *Cirsium* sp., 8.Leguminosae, *Alhagi* sp., 9.Urticaceae, *Urtica* sp., 10.Euphorbiaceae, *Euphorbia* sp., 11.Cruciferae, *Lepidium* sp., 12.Rubiaceae, *Galium* sp. or *Asperula* sp., 13.Scrophulariaceae, *Verbascum* sp., 14.Boraginacea, *Anchusa* sp., 15.Labiatae, *Phlomis* sp., 16.Lamiaceae, *Thymus* sp., 17. Cruciferae, 18.Compositae, Achillea sp. and 19.Graminae, *Bromus* sp. . As it can be seen in Figure 1, among the plant species, those with the highest Hg intake were Leguminosae, *Alhagi* sp.>Cruciferae, *Lepidium* sp.> Guttiferae, *Hypericum* sp. respectively. These plants had significantly high Hg contents particularly in their root parts and secondly in the leaves. The plant species with the highest As intake was again found to be Leguminosae, *Alhagi* sp. . Poaceae, *Triticum* sp. and Cruciferae, *Lepidium* sp. species followed this plant. Hg contents of these plants were found to be between trace amounts and 39.119 µg kg^{-1} and As contents were found to be between trace amounts and 69,5 mg kg^{-1}.

Fig. 1. Hg and As contents of root, leaf and flower parts of different plant species collected around the old Hg mine

According to the results obtained from this study, plants which could be used as bioaccumulators with regard to Hg and As intake are as follows: Leguminosae, *Alhagi* sp.> Guttiferae, *Hypericum* sp.> Cruciferae, *Lepidium* sp. More research is needed on the usability of these plants in Hg and As polluted sites in phytoremediation studies.

References

Higueras P.L., Rezun B., Dizdarevic T., Davis K., Novikov V., Stuhlberger C. Remediation Synthesis Report, October 2009. Geneva.
Lindberg S.E., Jackson D.R., Huckabee J.W., Janzen S.A., Levin M.J., and Lund J.R. Journal of Environmental Quality. - 1979.- V. 8.- P. 572-578.
Lindberg S.E., Kim K., Meyers T.P., and Owens J.G.Envir. Science and Technology.- 1995,- v. 29, no. 1. P. 126-135.
Lindberg S.E., Meyers T.P., Taylor G.E., Turner R.R., and Schroeder W.H. Journal of Geophysical Research. 1992, v.97, no. D2. P. 2519-2528.
Rytuba J.J. and Klein D.P. Almaden Hg Deposits. 1986.

THE EFFECTIVENESS OF MYCORRHIZA AND LUPIN (*LUPINUS ALBUS*) ON THE REMEDIATION OF CONTAMINATED SOILS ON MINE SITES

Akay Aysen, Karaarslan Emel

Selcuk University, Faculty of Agriculture, Department of Soil Science and Plant Nutrition, 42075, Campus, Konya-Turkey
aakay@selcuk.edu.tr

Abstract: mycorrhizae inoculated to plants growing on heavy metal contaminated sites have evolved a HM-tolerance in plants and may play a role in the phytoremediation of the site. The aim of the present study is to examine the effect of VA mycorrhiza on growth and heavy metal uptake of lupin in soils on mine sites.

Introduction

AM fungi from heavy metal-contaminated soils and associated with metal-tolerant plants may be effective in accumulating heavy metals in roots in a non-toxic form (Tonin et al.,2001).When the soils contain high, potentially toxic amounts of heavy metals, mycorrhizal formation usually induces lower concentrations of these metals in the aerial part of the plant and consequently has a beneficial effect on plant growth, as it has been reported for Zn (Gildon and Tinker,1983,Heggo et al.,1993). Similarly, observations of the absence or only low presence of mycorrhizal inoculums in mine spoils could explain the lack of mycorrhizal colonization. However, no inhibition of mycorrhizal root colonization was observed in some heavily polluted mining areas (Shetty ,1994). Various authors have reported isolating spores of arbuscular mycorrhizal fungal texa such as Glomus and Gigaspora associated with most of the plants growing in heavy metal polluted habitats(Raman et al.,1993,Raman and Sambandan, 1998).It is primarily necessary to select the suitable types of plants in order to decontaminate heavy metal-polluted soils through phytoremediation. Furthermore, as mentioned in several studies, certain types of mycorrhizae help plants to develop resistance against heavy metal toxicity. Taking all these into consideration, the inoculation effect of *G. mossea*, *G. caledonium* and *G. geosporum* mycorrhiza types on the germination, growth and development of lupin in Pb, Zn, As, Cd, Al and Fe -contaminated soils were investigated in the present study.

Material and Method

Soil Preparation: The soil used in the experiment was taken from a depth of 0-30 cm from the waste sludge of a waste water dam in Seydişehir Al Factory of Konya province. The elemental analysis of the soil was carried out by taking extracts in a mixture consisting of 4 acids (HNO_3-

$HClO_4$-HF and HCl) and the reading process was performed using ICP-ES and ICP-MS devices. The analysis results of soil was neutral in pH and contained a small amount of organic matter and a high percentage of lime. The Pb, Zn, Cr, Co, Cd, As, Al and Fe contents of the soil were substantially above the acceptable limit values.

In the experiment, the waste sludge was dried and passed through a 4 mm sieve. Afterwards, waste sludge, sand and peat mixed into the growing medium were autoclaved separately at 121°C twice at one hour intervals. After this process, three different types of growth media were prepared. These are:(4) waste sludge (WS),(5) 1 unit waste sludge +2 units sand and peat mixture ,(6) 2 units waste sludge+1 unit sand and peat mixture.These mixtures were transferred into pots (180 g/pot) according to the randomized plots experimental design with three replications. After weighing the soil and filling the pots, the pots were inoculated with *Glomus mossea, Glomus caledonium and Glomus geosporum* type mycorrhiza spores at a depth of 5 cm from the surface and with 300 spores per each pot.Three separate experiments were set up by using *Lupinus albus* on March 23, 2010. The researchers waited for 4 weeks after planting the test plants for the completion of the inoculation; experiment was completed at the end of the 45-day vegetation period.

Observation of plant growth and harvesting: Plant height, plant weight,root weight,root length, VAM infection and counting spores (Koske and Gemma, 1989), spore extraction and quantification (Gerdemann and Nicolson ,1963) was measured.

Statistical analysis: The data obtained through the measurements were statistically analyzed using Minitab and Mstat software.

Result and Discussion

In the present study, it was found out that both the growth media and the type of mycorrhizae had a statistically significant effect on certain values of the parameters studied ($P<0.05$) (Table 1).

The effect of different types of mycorrhizae on the growth of lupin plant yielded higher values in almost all parameters through mycorrhizal inoculation compared to control (nonmycorrhizal) plants. However, it was observed that different types of mycorrhiza spores were effective on different parameters. The highest values in plant height and plant fresh shoot weight (13.84 cm and 5.16 g) were obtained with *G. geosporum*, whereas the highest values in root weight and root length (9.21cm and 3.37 g) were obtained with *G. caledonium*. A statistically significant difference was observed between root lengths ($P<0.05$). On the other hand, the highest mycorrhizal infection rate was obtained as 12.22% with *G. mossea*.

Table 1. The Effects of Three Different Types of Growth Media and Mycorrhizae on Certain Growth Parameters Measured in Lupin Plant

Growth Media	Plant Height (cm)	Plant fresh shoot weight (g)	Root Weight (g)	Root Length (cm)	Infection Rate (%)
1	14.64 A	5.10	3.56 A	8.30 A	3.33
2	12.28 B	4.14	1.87 B	5.05 B	1.67
3	13.04 B	5.12	2.55 AB	5.24 B	13.33
LSD Value P<0.05	1.591	NS	1.024	1.548	NS
Mycorrhiza spores	Plant Height (cm)	Plant fresh shoot weight (g)	Root Weight (g)	Root Length (cm)	Infection Rate (%)
G. caledonium	12.78	4.91	3.37	9.21 A	3.33
G. mossea	13.73	4.73	2.46	5.15 C	12.22
G. geosporum	13.84	5.16	2.73	7.27 B	8.89
Control	12.93	4.34	2.21	5.82 BC	0.00
LSD Value P<0.05	NS	NS	NS	1.787	NS

When the growth media are taken into consideration, the highest plant height, root weight and root length values (14.64 cm , 3.56 g and 8.30 cm respectively) were obtained in the fully contaminated media (1st growth media). Furthermore, of these parameters, root length and root weight values showed statistically significant differences among the growth media ($p<0.05$). Regarding mycorrhizal applications, it is possible to state that *G. geosporum* and *G. caledonium* spores were found to be effective on the parameters.

In conclusion, More detailed further studies are needed on lupin to investigate the use of this plant in decontaminating polluted soils through VAM inoculation.

References

Gerdeman J.W., Nicolson T.H. Trans. Brit. Mycol. Soc.- 1963; 46.- P. 235-244.
Gildon A., Tinker P.B. New Phytol., 1983; 95: 247-261.
Heggo A., Angle A., Chaney R.L. Soil Biol. Biochem.- 1990; 22.- P. 865-869.
Koske R.E., Gemma J.N. Mycological Research.- 1989; 92.- P. 486-505.
Raman N., Nagarajan N., Gopinathan S., Sambandan K. Biol. Fertil. Soil.- 1993; 16.- P. 76-78.
Raman N., Sambandan S. Bull. Environ. Contamin. Toxicol.- 1998; 60.- P. 142-150.
Shetty K.G., Hetrick B.A.D., Figge D.A.H., Schwab A.P. Environ. Pollut.- 1994; 86.- P. 181–188.
Tonin C., Vandenkoornhuyse P., Joner E., Straczek J., Leyval C. Mycorrhiza, 2001; 10.- P. 161-168.

АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ, ИХ ТОЧНОСТЬ И ПРЕДЕЛЫ ПРИМЕНИМОСТИ

Архангельская Т.А.[1], Лукьященко К.И.[2]

Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
[1]arhangelskaia@rambler.ru, [2]lu.kseniya@gmail.com

Аннотация: приводится обзор математических моделей, позволяющих рассчитывать тепловые свойства почв при различной влажности. Обсуждается точность авторской модели температуропроводности почвы и чувствительность расчетной температуропроводности к гранулометрическому составу почвы.

При решении ряда задач математической экологии, в том числе связанных с моделированием глобальных биосферных процессов и экологическим прогнозированием, возникает необходимость рассчитать температуру почвы, поток тепла в почву, оценить интенсивность теплообмена между почвой и приземным слоем атмосферы и т. п. Для этого помимо метеоданных необходимо знать тепловые свойства почвы: теплоемкость, теплопроводность и/или температуропроводность, равную отношению теплопроводности к объемной теплоемкости. Если тепловые свойства экспериментально не были определены, их рассчитывают с помощью математических моделей по данным о влажности почвы и свойствах ее твердой фазы.

Для расчетов теплоемкости почвы практически во всех современных руководствах рекомендуется модель де Фриза (1968). В рамках подхода де Фриза теплоемкость почвы рассчитывается как сумма теплоемкостей ее составляющих: минералов (0.18 кал/г×град), органического вещества (0.46 кал/г×град) и почвенной влаги. При этом обычно считают, что теплоемкость почвенной влаги равна 1 кал/г×град, независимо от степени ее связанности и концентрации растворенных в ней веществ.

Говоря о методах расчетной оценки коэффициентов тепло- и температуропроводности почвы, можно выделить два принципиально различающихся подхода. Первый из них можно условно назвать теоретическим, второй – эмпирическим. В рамках теоретического подхода развиваются физически обоснованные модели переноса тепла в почве, целью построения которых является получение зависимостей коэффициентов тепло- и температуропроводности почвы от влажности «на кончике пера». В основе таких моделей

обычно лежат представления автора о свойствах твердой фазы почвы, в том числе о геометрических характеристиках отдельных минеральных зерен, и о физических закономерностях взаимодействия почвенной влаги с твердой фазой почвы. Среди исследователей, внесших наибольший вклад в развитие теоретического направления, в первую очередь можно упомянуть таких авторов, как Чудновский (Вершинин и др., 1959) и де Фриз (1968). Подход де Фриза получил свое развитие в работах Тарнавского (1992, 2002) и Лю с соавторами (2007), предложившими новый способ расчета теплопроводности почвы по данным о плотности, влажности и содержании кварца.

Эмпирический подход основан на формальной аппроксимации экспериментальных кривых теми или иными функциями и последующем поиске регрессионных соотношений, позволяющих рассчитывать параметры предложенных функций по данным об основных свойствах почвы. Этот подход характерен для работ Керстена (1949), Йохансена (1975), Кемпбелла (1985), Чанга и Хортона (1987), Коте и Конрада (2005). Для почв России и бывшего СССР предложены модели Гупало (1959), Иконниковой (1965), Герайзаде (1974), Чудновского (1976), Павлова (1979), Набиева и Гусейнова (1990), Бровки и Ровдана (1999), Тихонравовой и Хитрова (2003), Архангельской (2009).

Практически все существующие эмпирические модели тепловых свойств почв имеют региональный характер, поскольку разработаны на основе анализа относительно небольших массивов экспериментальных данных. Поэтому применение этих моделей за пределами регрессионной базы весьма проблематично. В работе (Лукьященко, Архангельская, 2009) было показано, что ошибки при расчетах температуропроводности пахотных почв Владимирского ополья на основе моделей де Фриза, Кемпбелла, Чанга и Хортона, Лю с соавторами достигают 66-113%. Применение модели, предложенной в работе (Архангельская, 2009) и настроенной по среднесуглинистым почвам Ополья, к почвам за пределами регрессионной базы, но сходным по генезису и близким по гранулометрическому составу, позволило оценить температуропроводность с точностью 9-32 %. Применение этой же модели к почвам существенно иного гранулометрического состава увеличило ошибки расчетов до 76 % (Архангельская, 2009).

Для расширения пределов применимости предложенной модели была поставлена задача уточнить ее параметры, существенно расширив регрессионную базу. Для этого к среднесуглинистым почвам были добавлены почвы как более легкие, так более тяжелые. На основе экспериментальных данных были получены новые соотношения между параметрами модели и основными свойствами исследованных почв, которые предполагается обсудить в докладе.

Литература

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

Бровка Г.П., Ровдан Е.Н. Теплопроводность торфяных почв // Почвоведение.- 1999.- № 5.- С. 587-592.

Вершинин П.В., Мельникова М.К., Мичурин Б.Н., Мошков Б.С., Поясов Н.П., Чудновский А.Ф. Основы агрофизики.- М.: Физматгиз,- 1959.- 903 с.

Герайзаде А.П. К вопросу о линейной зависимости коэффициента температуропроводности от механического состава почв // Почвоведение.- 1974.- № 10.- С. 120-123.

Гупало А.И. Тепловые свойства почвы в зависимости от ее влажности и плотности // Почвоведение.- 1959.- № 4. С.- 40-45.

Де Фриз Д.А. Тепловые свойства почв // Физика среды обитания растений.- Л.: Гидрометеоиздат,- 1968.- С. 191-214.

Иконникова Е.А. Исследование влияния обработки почвы на ее тепловой режим.- Л.: Изд. АФИ,- 1965.

Лукьященко К.И., Архангельская Т.А. Расчетная оценка температуропроводности агросерых почв с помощью ряда современных моделей // Математическое моделирование в экологии. Материалы Национальной конф. с международным участием, 1-5 июня 2009 г. – Пущино, ИФХиБПП РАН,- 2009.- С. 166-167.

Набиев Э.Ю., Гусейнов С.Б. Зависимость температуропроводности почв от содержания физической глины и влажности // Почвоведение.- 1990.- № 8.- С. 139-143.

Набиев Э.Ю., Гусейнов С.Б. О зависимости коэффициента температуропроводности почв от содержания физической глины // Почвоведение.- 1990.- № 10.- С. 149-151.
Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука,- 1979.- 284 с.
Тихонравова П.И., Хитров Н.Б. Оценка температуропроводности слитоземов Центрального Предкавказья // Почвоведение.- 2003.- № 3.- С. 342-351.
Чудновский А.Ф. Теплофизика почв.- М.: Наука, 1976.- 352 с.
Campbell G.S. Soil physics with BASIC: Transport models for soil-plant systems. Elsevier.- 1985.
Chung S.-O. and R. Horton Soil Heat and Water Flow With a Partial Surface Mulch // Water Resour. Res., 23(12), 1987.- Pp. 2175–2186.
Côte J., Konrad J.-M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials // Can. Geotech. J.- 2005.- Vol. 42.- Pp. 443-458.
Johansen O. Thermal conductivity of soils. Ph.D. diss. Norwegian Univ. of Science and Technol., Trondheim.- 1975. (CRREL draft transl. 637, 1977).
Kersten M.S. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils // ACFEL Tech. Rep. 23. Univ. of Minnesota. Minneapolis, 1949.
Lu S., Ren T., Gong Y. and R. Horton. An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature // Soil Sci. Soc. Am. J., 2007.- Pp 71:8-14
Tarnawski V.R., Gori F. Enhancement of the cubic cell thermal conductivity model // Int. J. Energy Res.- 2002.- Vol. 26.- Pp. 143-157.
Tarnawski V.R., Wagner B. A new computerized approach to estimating the thermal properties of unfrozen soils // Can. Geotech. J.- 1992.- Vol. 29.- Pp. 714-720.

ПОНИЖЕННАЯ ПРИСПОСОБЛЕННОСТЬ ГЕТЕРОЗИГОТЫ И ПОЛИМОРФИЗМ В ДВУХВОЗРАСТНОЙ ПОПУЛЯЦИИ С ОДНИМ ПЛЕЙОТРОПНЫМ ЛОКУСОМ

Бажина Д.А.[1], Жданова О.Л.[2]

ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, Россия
[1]axanka@iacp.dvo.ru, [2]dinalsc@mail.ru

Аннотация: данная работа продолжает серию исследований, направленную на изучение естественного отбора в структурированной популяции. В докладе иллюстрируется возникновение полиморфизма при пониженной приспособленности гетерозиготы в модели двухвозрастной популяции. Рождаемость молоди и выживаемость репродуктивной части популяции определяется генетически; причем оба параметра определяются одним генетическим локусом (плейотропным).

Моделирование естественного отбора в популяциях, состоящих из двух возрастных классов

Естественно предположить, что рост плодовитости особей в природных популяциях происходит в процессе их эволюции под действием естественного отбора. Для принципиального понимания основных результатов действия естественного отбора в природной популяции достаточно рассмотреть самый простой случай, когда адаптивный признак кодируется одним диаллельным локусом с аллеломорфами A и a. В этом случае динамику численности и генетического состава двухвозрастной популяции можно описать с помощью следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} x_{n+1} = \overline{w}_n y_n \\ y_{n+1} = x_n f(x_n) + \overline{c}_n y_n \\ q_{n+1} = \dfrac{p_n\left(W_{AA} p_n + W_{Aa}(1-p_n)\right)}{a_n}, \\ p_{n+1} = \dfrac{x_n f(x_n) q_n + \overline{c}_n y_n p_n}{x_n(1-x_n) + \overline{c}_n y_n} \end{cases} \qquad (1)$$

где x_n - численность младшего возрастного класса в n-ый сезон размножения, $f(x_n)$- функция плотностного лимитирования, y_n - численность репродуктивной части популяции, p_n - частота аллеля А в старшем возрастном классе; q_n - частота аллеля А в младшем возрастном классе; $\overline{w}_n = W_{AA}p_n^2 + 2W_{Aa}p_n(1-p_n) + W_{aa}(1-p_n)^2$ - репродуктивный потенциал старшего возрастного класса (или средняя приспособленность зародышей);
$\overline{c}_n = c_{AA}p_n^2 + 2c_{Aa}p_n(1-p_n) + c_{aa}(1-p_n)^2$ - средняя выживаемость репродуктивного класса.

Динамика модели двух возрастной популяции с одним плейотропным локусом

В ходе проведенного исследования в модели («формула 1») были найдены все возможные стационарные точки (две мономорфные и одна полиморфная), определены условия их существования и устойчивости. Рассматривались два вида плотностного лимитированния численности младшего возрастного класса на первом году жизни: линейный $f(x) = 1 - x$ и экспоненциальный $f(x) = e^{-x}$.

Динамика рассматриваемой модели («формула 1») в целом напоминает динамику более простых систем, исследованных в работах (Жданова, 2005; Фрисман, 2009).

Удивительно, что в условиях генетической плейотропии появляется возможность существования полиморфизма даже, когда приспособленность гетерозиготы минимальна ($w_{Aa} < \min\{w_{AA}, w_{aa}\}$). Пример такого полиморфизма приведен на «рисунке 1»; области притяжения аттракторов выделены цветом 1.

Рисунок 1. Бассейны притяжения равновесий; в верхнем ряду - для модели с экспоненциальным лимитированием (при фиксированных значениях параметров $w_{AA} = 18, w_{Aa} = 6, w_{aa} = 17; c_{AA} = 0.035, c_{Aa} = 0.057, c_{aa} = 0.03$ и начальных условиий справа - $p_0 = 0.1, q_0 = 0.7$, слева - $x_0 = 0.1, y_0 = 0.1$), в нижнем – с линейным лимитированием (при значениях параметров $w_{AA} = 1.7, w_{Aa} = 0.5, w_{aa} = 1.4$; $c_{AA} = 0.96, c_{Aa} = 0.31, c_{aa} = 0.1$, справа - при $p_0 = 0.406, q_0 = 0.532$, слева – при $x_0 = 0.1, y_0 = 0.1$. Аттракторы, возникающие в системе в условиях полиморфизма, изображены точками черного цвета. Цвет 1-область притяжения полиморфного равновесия, цвет 2 - мономорфного равновесия {q = 1, p = 1}, цвет 3 -равновесия

$\{q = 0, p = 0\}$; область начальных условий, из которых модельные переменные попадают в отрицательную область, выделена цветом 4

Заключение

В рассматриваемой модели двухвозрастной популяции с одним плейотропным локусом, полиморфное равновесие может не только существовать, но и иметь достаточно большую область притяжения в том случае, когда приспособленность гетерозиготы зародышей меньше приспособленностей обоих гомозигот, что особенно удивительно, поскольку исследование другой модельной ситуации (естественного отбора в однородной популяции) показало, что отбор против гетерозигот всегда приводит к потере популяцией ее генетического разнообразия.

Литература

Жданова О.Л., Фрисман Е.Я. Динамические режимы в модели однолокусного плотностно-зависимого отбора // Генетика.- 2005.- Т. 41, № 11.- С. 1575-1584.

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

МОДЕЛЬ СИМПАТРИЧЕСКОГО ВИДООБРАЗОВАНИЯ ВНУТРИ ОДНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НИШИ

Барцев С.И.[1], Волкова А.Г.[2]

[1]*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*
bartsev@yandex.ru

[2]*Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Россия*
email@domain.com

Аннотация: в модельных экспериментах показана возможность симпатрического видообразования внутри одной экологической ниши вследствие нелинейной взаимозависимости между интенсивностями проявления приспособительных признаков разного знака.

В синтетической теории эволюции выделяют два способа видообразования: *географическое*, или *аллопатрическое*, когда новые виды возникают из популяций с неперекрывающимися ареалами, и *экологическое*, или *симпатрическое*, при котором новые виды возникают из популяций с сильно перекрывающимися или совпадающими ареалами. Аллопатрический сценарий видообразования не вызывает никаких сомнений и споров, в то время как возможность симпатрического видообразования долгое время была под вопросом. Недавние публикации (Barluenga, et al., 2006; Ryan, Bloomer, 2007; Forbes, Powell, 2009) позволяют отбросить всякие сомнения в существовании симпатрического видообразования. Для выявления условий симпатрического видообразования предложен ряд возможных механизмов и их разновидностей (Baptestini, et al., 2009; Bornhofen, Barot, Lattaud, 2011; Zu, Mimura, Takeuchi, 2011). Однако следует отметить, что, как описанные в экспериментальных работах примеры симпатрического видообразования, так и математические модели включают в той или иной мере пространственную или пищевую (ресурсную) неоднородность и вновь возникшие виды распределяются по этим неоднородностям.

Рассмотрим условия, при которых выбор особями одной популяции разных жизненных стратегий может привести к образованию нового вида внутри данной экологической ниши. Например, вид может сделать ставку на стратегии защиты и формировать прочный защитный панцирь (раковину), что делает его менее доступным хищнику, но за это он платит низкой удельной скоростью роста. Вид может все ресурсы бросить на увеличение удельной скорости роста и обеспечить выживание через порождение

огромного числа никак не защищенных особей. Можно предположить, что при определенных условиях вид-предшественник может эволюционировать и в том и в другом направлении. Тогда естественная изменчивость признаков приведет расщеплению исходного вида на два новых.

В работе рассмотрены примеры нелинейных зависимостей между скоростью роста и степенью доступности для хищника, которые способны привести к симпатрическому видообразованию без формирования раздельных экологических ниш. Видообразование иллюстрировалось на простой модели замкнутой экосистемы, исходно включающей популяции продуцента и консумента (1):

$$\begin{cases} \dfrac{dX_i}{dt} = \left(f(\alpha_i)V_0(A_0 - \sum_k X_k - \sum_r Y_r) - h(\alpha_i)kd_1 - g(\alpha_i)\sum_k \dfrac{V^k Y_k}{K^k + \sum_r X_r} \right) X_i \\ \dfrac{dY_j}{dt} = \left(\dfrac{V^j \sum_r g(\alpha_r) X_r}{K^j + \sum_k X_k} - kd_2 \right) Y_j \end{cases} \quad (1)$$

где X_i и Y_j – биомассы (или численности) i-го мутанта продуцента и j-го мутанта консумента соответственно; V_0 – константа скорости роста продуцента; A_0 – общая масса лимитирующего биогенного элемента; kd_1 и kd_2 – константы скоростей отмирания продуцента и консумента соответственно; V^k и K^k – удельная скорость роста и константа Моно k-го мутанта консумента; $f(\alpha)$, $h(\alpha)$, $g(\alpha)$ – модуляторы удельной скорости роста, скорости отмирания и удельной скорости потребления консументом; α - мутируемый феноменологический параметр.

Единовременный акт мутационного процесса заключался в добавлении очередного дифференциального уравнения с измененным значением феноменологического параметра α в систему уравнений модели. Если биомасса мутанта становилась меньше заданного порога, то уравнение удалялось из системы. На рисунке1 приведена одна из реализаций процесса видообразования.

Рисунок 1. Динамика изменений феноменологического параметра α, задающего фенотипические признаки особи. Насыщенность серого соответствует численности мутантов с данным значением параметра α.

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что нелинейные зависимости определенного вида между интенсивностями проявления приспособительных признаков разного знака способны привести к симпатрическому видообразованию и обеспечить сосуществование видов в одной экологической нише.

Литература

Barluenga M., Stolting K.N., Salzburger W., Muschick M., Meyer A. Sympatric speciation in Nicaraguan crater lake cichlid fish // Nature. – 2006. - V. 439. – P. 719-723.

Ryan P.G., Bloomer P., Moloney C.L., Grant T.J., Delport W. Ecological Speciation in South Atlantic Island Finches // Science.- 2007. - V. 315.- P.1420–1423.

Forbes A.A., Powell T.Y.Q., Stelinski L.L., Smith J.J., Feder J.L. Sequential Sympatric Speciation Across Trophic Levels // Science. – 2009 .- V. 323.- P. 776–779.

Baptestini E.M., deAguiar M.A.M., Bolnick D.I. Araujo M.S. The shape of the competition and carrying capacity kernels affects the likelihood of disruptive selection // Journal of Theoretical Biology. – 2009 .- 259 .- P.5–11.

Zu J., Mimura M., Takeuchi Y. Adaptive evolution of foraging-related traits in a predator–prey community // Journal of Theoretical Biology.– 2011 .- 268.- P.14–29.

Bornhofen S., Barot S., Lattaud C. The evolution of CSR life-history strategies in a plant model with explicit physiology and architecture // Ecological Modelling.- 2011.- 222.- P.1–10.

НЕЙРОСЕТЕВОЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Барцев С.И.[1], Почекутов А.А.[1], Припутина И.В.[2]

[1]*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*
bartsev@yandex.ru

[2]*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино Московской обл., Россия*

Аннотация: представлены результаты анализа взаимозависимости показателей, входящих в региональные почвенные базы данных. В качестве инструмента выявления закономерностей между почвенными характеристиками использована нейросетевая модель. Полученные результаты могут быть использованы для разработки моделей динамики почвенного покрова при разных сценариях антропогенных воздействий.

Задачи прогнозирования реакции почвенного покрова на внешние воздействия приобретают особую актуальность в условиях глобального изменения климата. Однако построение математических моделей, описывающих динамику почв, осложнено отсутствием данных о реальной динамике почвенных показателей на протяжении характерных времен порядка 500 лет. Для верификации модели приходится опираться на положение В.В.Докучаева о квазиравновесном состоянии почв и сравнивать стационарные решения почвенной модели с характеристиками почвенного покрова различных территорий.

Модели почвообразования, как правило, содержат значительное количество параметров. Но чем проще математическая модель, описывающая реальную систему, тем больший вклад она вносит в понимание механизмов функционирования исследуемой системы и тем больше возможностей ее практического применения. Удобным инструментом описания сложных закономерностей и выявления ведущих факторов являются нейронные сети (Барцев и др., 1989). Цель данной работы – проверить возможности нейросетевой модели для количественной оценки взаимосвязи почвенных параметров в базах почвенных данных и редукции числа входных данных до минимального.

С этой целью нами выполнен анализ двух разномасштабных баз данных, отличающихся также принципом их формирования. База данных почв европейской части РФ (БД ЕТР) синтезирована на основе почвенной карты ФАО и литературных данных и

насчитывает более 7 тысяч записей по 16-ти содержательным полям (Posch et al., 2003). База данных почв юга Московской области (БД МО) получена как результат полевых и химико-аналитических исследований в ИФХиБПП РАН и включает около 160 записей для 12-ти показателей. Выявление зависимостей проводилось с использованием нейросетевой надстройки к Excel, разработанной в ИБФ СО РАН (Simonov et al., 2002).

На рис.1А приведен результат сопоставления исходных данных БД ЕТР для показателя C_{pool} (запасы органического вещества) с «прогнозом» нейросетевой модели в случае использования всех содержательных полей. Видно очень хорошее качество описания данных нейросетевой моделью, что указывает на возможность уменьшения числа учитываемых параметров. В итоге последовательной редукции количество входных показателей удалось уменьшить до двух-трех (в разных сочетаниях) без существенного уменьшения качества прогноза. Полученное качество описания можно оценить по рис.1Б.

Для БД МО, включающей почвы естественных и агроценозов, нейросеть первоначально не выявила четких закономерностей в распределении содержания органического вещества ($C_{орг}$). Но, выделив в самостоятельную БД почвы природных ландшафтов, для них удалось найти закономерности и, более того, уменьшить количество необходимых показателей до трех, при сохранении качества прогноза близкого к исходному уровню (Рис.2). При этом минимальные наборы параметров могут быть различными, что указывает на взаимозависимость показателей, и, значит, приводит к задаче выбора оптимального набора.

Рисунок 1. Проверка качества описания исходных данных (C_{pool}, г/м^2) нейросетевой моделью: А - для 16 показателей; Б - для 2 показателей (ЕКО и lgK_{AlBc}). Пояснение: чем ближе точки расположены к биссектрисе – тем качество прогноза выше.

Полученные результаты указывают на возможность представления выявленных зависимостей в виде относительно простых математических формул, а значит на возможность построения также относительно простых механизменных математических моделей.

Рисунок 2. Проверка качества описания исходных данных ($C_{орг}$, %) нейросетевой моделью: А - для 12 показателей; Б - для 3 показателей (глубина, Ca^{++}, текстура почв).

Литература

Барцев С.И., Гилев С.Е., Охонин В.А. Принцип двойственности в организации адаптивных сетей обработки информации. В кн.: Динамика химических и биологических систем.- Новосибирск: Наука, 1989.- С. 6-55.

Posch M., Reinds G.J., Slootweg J. (2003) The European background database // Modelling and mapping critical thresholds in Europe. CCE Status Report 2003. RIVM Report 259101013/2003, Bilthoven, Netherlands.- P. 37-44.

Simonov K.V., Marchuk An.G., Okhonin V.A., Shchemel A.L. Using of nonlinear regression with fuzzy input data for analysis of seismicity // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, series: Mathematical Modeling in Geophysics, issue: 7 (2002), NCC Publisher, Novosibirsk.– 2002.– P. 69-76.

ПРИНЦИП НАИХУДШЕГО СЦЕНАРИЯ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ НА БИОСФЕРНУЮ ДИНАМИКУ

Барцев С.И., Щемель А.Л., Иванова Ю.Д.
Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
ibp@ibp.krasnoyarsk.ru

Аннотация: Качество жизни населения, во многом определяемое энергопотреблением, является фактором, существенно влияющим на эмиссию углерода в атмосферу. Проведенные численные эксперименты, ориентированные на наихудший для человечества сценарий развития биосферы, показали, что даже беспрецедентные меры по двукратному снижению сжигания ископаемых топлив за ближайшее десятилетие не могут обеспечить предотвращение глобальной катастрофы с требуемой надежностью.

Ключевым вопросом. на сегодняшний день, является оценка отклика биосферы на антропогенный поток углекислого газа в атмосферу. Для прогноза возможной динамики биосферы разработан ряд математических моделей различной степени сложности. Большинство исследователей стараются получить наиболее вероятный сценарий развития биосферы, для чего в моделях приходится учитывать большое число факторов и механизмов, влияющих (или способных оказать влияние) на динамику биосферы (IPCC, 2007). Однако традиционные биосферные модели, направленные на прогнозирование наиболее вероятного сценария очень сложны для верификации и анализа ведущих механизмов возможной катастрофы. Поэтому, представляется очевидным, что для практических целей следует в первую очередь исследовать наихудший, но возможный вариант, в котором вклад

компенсаторных и смягчающих механизмов является наименьшим, а значения параметров модели лежат на неблагоприятных для нас границах доверительных интервалов. Основываясь на вышесказанном, был сформулирован "принцип наихудшего сценария" (Bartsev, Degermendzhi, Erokhin, 2008), который заключается в выборе и изучении только тех процессов, которые могут максимально быстро привести к негативным изменениям биосферы, взвешенно игнорируя возможные компенсаторные механизмы.

Качество жизни напрямую связано с темпами выбросов CO_2, поскольку поддержание и развитие инфраструктуры требует выплавки металлов, производства пластмасс, стройматериалов, обеспечения грузо- и пассажиро-перевозок, производства сельхозпродукции, требующей удобрений и топлива, поставок энергии и т.д. и т.п. Все это сопровождается выделением большого количества парниковых газов. Тем самым, базовое обеспечение инфраструктуры приводит к выбросу парниковых газов и, как следствие, к изменению климата Земли, влекущим за собой целый шлейф последствий, ухудшающих качество жизни, и более того, грозящих самой жизни людей.

Для планирования экологически эффективных действий необходим прогноз их последствий, который невозможен без математического моделирования биосферных, климатических и экономических процессов. В работе представлены различные варианты биосферной динамики в зависимости от уровня энергопотребления, обеспечивающего соответствующие качество жизни населения планеты.

Численные эксперименты показали, что даже беспрецедентные меры по двукратному снижению темпов сжигания ископаемых топлив за 10 лет не могут обеспечить предотвращение глобальной катастрофы с требуемой надежностью. На рисунке 1 показан ансамбль траекторий, отражающий динамику изменений количества углерода в атмосфере при полном прекращении сжигания ископаемых топлив.

Рисунок 1. Ансамбль траекторий количества углерода в атмосфере, полученных с помощью биосферной модели (согласно сценарию A2) при полной остановке сжигания углеродосодержащих топлив: в 2020г. – точки; 2013г. – точка-пунктир; 2011г. – пунктир

В свете продемонстрированных моделью возможных катастрофических исходов, Киотский протокол и планируемые меры по сокращению выбросов парниковых газов представляются, очевидно, недостаточными. Проекция этих результатов на качество жизни, означает, что, по-видимому, серьезные и действенные меры по предотвращению глобального

экологического кризиса потребуют серьезной реорганизации структуры расходов государств и граждан.

Работа поддержана интеграционным проектом СО РАН №50.

Литература

Bartsev S.I., Degermendzhi A.G., Erokhin D.V. Principle of the worst scenario in the modelling past and future of biosphere dynamics // Ecological modeling. – 2008.– P. 160–171.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.- 996 p. [Электронный ресурс] URL: www.ipcc.ch.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АГРОПРОИЗВОДСТВА

Башилов А.М., Королев В.А., Свентицкий И.И.

ГНУ ВИЭСХ, г. Москва, Россия
vieshvk@yandex.ru

Аннотация: Рассматриваются вопросы создания оценочных и прогнозных моделей агропроизводства, а также использования этих моделей для управления агропроцессами.

Прогнозирование продуктивности растений, оценка влияния погодно-климатических и почвенных условий на урожайность сельхозкультур на основе моделирования агропроцессов – перспективное научное направление развития и повышений эффективности агротехнологий. Задачи, которые решаются здесь, - не тривиальны. В ходе решения и реализации этого направления рассматриваются сложные системы – агротехноценозы (АТЦ), объединяющие природные и техногенные компоненты, часть из которых (объекты аграрного производства, почвенно-климатические факторы и др.) - самоорганизующиеся структуры. Техногенные компоненты включают в себя многочисленные технические устройства реализации технологических процессов, связанные информационными потоками и средствами управления между собой и природными компонентами АТЦ.

Математическая модель АТЦ при реализации конкретных задач потребителя должна позволять: учитывать генерацию на всех этапах вегетации растений множество контрольных параметров технологических процессов; при действии случайных внешних возмущений, разнообразных климатических и почвенных условиях и реализуемой стратегии формирования урожая оценивать расход энергетических, сырьевых и материальных ресурсов; определять уровень продуктивности и качества растений, зависимость их от управляемых процессов; обеспечивать максимальное использование природных источников энергии (эксэргии солнечного излучения, водного потенциала и т.д.); реализовывать упреждающие управления и прогнозировать последствия; учитывать технологические особенности АТЦ, сравнивать варианты видов (сортов, культур, гибридов) растений по продуктивности и качеству, почвенно-климатических условий, систем технической реализации.

К настоящему времени созданы ряд моделей агропроизводства (МА), имеющих свою специфику и структуру под конкретные цели и задачи разработчиков и в основном удовлетворяющие перечисленным требованиям. Сформировались несколько научных школ. Подходы к созданию, методологические аспекты построение МА, как правило, оценочных, прогнозных, не одинаковы и, часто, неординарны. В (Исполов, 2006 и др.) построение модели основывается на рассмотрении генных структур и дается достаточно полное описания биологической структуры растений. В (Михайленко, 2001 и др.) МА основываются на применении автоматных графов. В ряде моделей задействован подход, основанный на замене реального объекта (системы) «черным» ящиком (Льюнг, 1991) применены градиентные методы прогнозирования. Расширяется использование

космических ресурсов наблюдения для мониторинга состояния посевов с последующим использованием этих данных в МА (Хворова, 1991, 1992). На наш взгляд перспективна и жизнеспособна гипотеза о том, что закономерности роста и развития растений обладают свойством оптимальности, ресурсо-, энерго- и информационной экономности (Хворова, 1999, Свентицкий, 2007 и др.). Эта предпосылка во многих случаях позволяет эффективно построить модель агроэкосистемы, закладывая в модель алгоритмы в виде решения некой обобщенной задачи оптимального управления, где в качестве функционала цели выступает интегральная репродуктивная мощность растительного организма. На практике при адаптации разработанных МА (главное условие их применимости к другим условиям - различные регионы, техпроцессы и т.д.) возникают проблемы модификации структуры модели, доработки ее блоков, включения новых блоков, согласования практических целей пользователя, определения нужной агрометеорологической информации и параметров. Процесс решения данных проблем можно отнести к процедурам адаптивной идентификации, структурной и параметрической идентификации динамических моделей продуктивности к конкретным почвенно-климатическим условиям. При решении задач идентификации важно выбрать или сформировать: входные и выходные параметры; структуру модели изучаемого объекта (системы); критерий качества идентификации; алгоритм идентификации; критерии и методы верификации (подтверждения) модели. Также важен верный выбор точки отсчета. Как правило, в известных МА последний аспект либо не рассматривается совсем, либо ему не уделяется достаточное внимание.

В разработанной ГНУ ВИЭСХ модели (Свентицкий, 2007) в качестве точки отсчета выбрана эксэргия используемого растениями солнечно излучения. Действительно, в производстве продукции растениеводства участвует более 90 % энергии солнечного излучения и только 2-3 % техногенной энергии. Первичным преобразователем этой энергии является автотрофные фотосинтезирующие растения. Первичным источником энергии при формировании животными продуктивности являются корма, в основном продукция растениеводства. Техногенную энергию, используемую в сельскохозяйственном производстве целесообразно рассматривать как энергию управления, обеспечивающего высокоэффективное преобразование организмами: солнечной энергии (ОИ) - растениями, животными - энергии кормов. Главным резервом снижения техногенной энергоемкости сельскохозяйственной продукции является повышение биоэнергетического КПД преобразования природной энергии организмами. Кроме этого существенно влияние на вегетацию растений и на технологические процессы их возделывания внешних факторов. При резких изменениях погоды, сбоях в работе коммуникационных служб и снабжения агросистема работает при ухудшенных показателях, а процессы работы при отсутствии эффективного воздействия на них могут стать неустойчивыми. Причем эти воздействия являются средой случайных параметров состояния в режиме реального времени. Для учета всех этих особенностей в модели ГНУ ВИЭСХ используется специальный алгоритм, согласно которому для корректировки хода технологического процесса с целью повышения его эффективности, оцениваются эксэргии солнечного излучения, почвенного и мелиоративного потенциалов а также экономические критерии.

Рассматриваемая МА оказалась эффективной при применении ее в зонах устойчивого земледелия. При необходимости использования МА в зонах рискованного земледелия (избыток или недостаток солнечного излучения, тяжелые температурные режимы и т.д.) точка отсчета может быть иной. Главными управляющими параметрами, определяющими урожайность сельхозкультур, могут быть почвенный или мелиоративный потенциалы. При этом эксэргия солнечного излучения может выступать, как лимитирующий фактор.

Литература

Исполов Ю. Г., Топаж А. Г. Метод динамического программирования в моделировании онтогенеза растений

на основе принципа оптимальности.- СПбГПУ, Санкт-Петербург, Агрофизический НИИ, Санкт-Петербург, 2006.
Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя.- М.: Наука, 1991.
Полуэктов Р. А., Смоляр Э. И., Терлеев В. В., Топаж А. Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2006.
Михайленко И. М. Новые направления моделирования в сельскохозяйственной биологии.- ГНУ Агрофизический НИИ Россельхозакадемии, Санкт-Петербург, 2001.
Свентицкий И.И. Энергосбережение в АПК и энергетическая экстремальность самоорганизации.- М., ГНУ ВИЭСХ, 2007.
Хворова Л. А. Моделирование влияния азотного питания на продукционный процесс посева люцерны: дисс. …канд. техн. наук.- СПб., 1992.
Хворова Л. А. Методологические аспекты структурно-параметрической идентификации динамических моделей агроэкосистемы.- Алтайский государственный университет, Барнаул, 1991.
Чупринин В. Г. Модель фиксации молекулярного азота для оптимизации пищевого режима сои на орошении // Режимы орошения и способы полива сельскохозяйственных культур на Северном Кавказе. - Новочеркасск, 1983.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА И ПРИНЦИП НАИХУДШЕГО СЦЕНАРИЯ

Белолипецкий П.В. [1,2], Барцев С.И. [2], Дегерменджи А.Г. [2]

[1]*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия*
[2]*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*
pbel@icm.krasn.ru

Аннотация: наблюдающиеся тенденции глобальных изменений климата и биосферы все более остро ставят задачу прогноза динамики их состояния. Однако принципиально неустранимая неопределенность в оценке параметров биосферы и климатической системы приводит к тому, что любой полученный на математической модели сценарий будет вероятностным. Очевидно, что наибольшее внимание должны привлекать наиболее опасные варианты глобальной динамики.

Как показывают многочисленные исследования, человек уже оказывает значительное влияние на биосферно-климатическую систему (IPCC Climate Change, 2007). Поэтому многие научные центры заняты построением прогнозов состояния климата и биосферы. Большинство математических моделей климата демонстрируют плавную динамику изменений атмосферного CO_2 и приземных температур с увеличением общего количества углерода в атмосфере вследствие сжигания ископаемых топлив (Тарко, 2005; IPCC Climate Change, 2007). Однако постепенное глобальное изменение - это только возможный вариант будущего, и к тому же достаточно оптимистичный, поскольку в этом случае теоретически возможно ослабить негативные изменения путем уменьшения антропогенного воздействия и даже вернуться к начальному состоянию.

Для исследование условий при которых система "биосфера-климат" может перейти к самоподдерживающемуся разогреву, за счёт положительной обратной связи "потепление – выделение CO_2 биосферой" были разработаны минимальные модели биосферы и климата. Использование минимальных моделей даёт в руки исследователей инструмент для «наглядного» изучения динамических режимов. Это касается в первую очередь выявления положительных обратных связей, представляющих наибольшую опасность с точки зрения сохранения устойчивости объединенной системы. С помощью объединённой минимальной модели «биосфера-климат» выявлялись катастрофические сценарии и условия их возникновения, которые могут быть использованы для грубого "наведения", "прицеливания" более сложных и детальных моделей биосферы и климата.

Для примера показано влияние вариации параметров модели на ее динамику. Приведены возможные сценарии развития системы с учётом аэрозолей (рис. 1) и изменения облачности (рис. 2). Был сделан вывод, что явный учёт климатических обратных связей и

тепловой инерции земной поверхности не изменил полученного ранее основного результата минимальной биосферной модели о возможности возникновения необратимых катастрофических режимов.

Рисунок 1. Возможные сценарии динамики углерода в биомассе при варьировании вклада аэрозолей в радиационное воздействие и разных значениях предельной емкости среды (параметр *G*). Отдельные «пучки» траекторий соответствуют разным значениям *R_C* (чем больше параметр, тем ближе траектория к началу отсчета). Рисунок (А) демонстрирует динамику при средних значениях параметров обратных связей, а рисунок (Б) - при значениях параметров на неблагоприятных краях доверительных интервалов

Рисунок 2. Возможные сценарии динамики углерода в биомассе при варьировании вклада эффектов облачности (параметр обратной связи - *f_C*) и разных значениях предельной емкости среды (параметр *G*). Отдельные «пучки» траекторий соответствуют разным значениям *f_C* (чем больше параметр, тем ближе траектория к началу отсчета). Рисунок (А) демонстрирует динамику при средних значениях остальных параметров обратных связей, а рисунок (Б) - при значениях параметров на неблагоприятных краях доверительных интервалов

Литература

Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Ерохин Д.В. Глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере.- ДАН.- 2005.- Т.401. № 2.- С.233-237.

Тарко А.А. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов, М.: Физматлит, 2005. 232 С.

Bartsev S.I., Degermendzhi A.G., Erokhin D.V. Principle of the worst scenario in the modelling past and future of biosphere dynamics // Ecological modeling. – 2008. – P. 160–171.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.- 996 P. [Электронный ресурс] URL: www.ipcc.ch

ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СТАДА

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: в работе описывается имитационная модель «ресурс-потребитель». Неподвижный, восстанавливающийся ресурс равномерно распределен на прямоугольной «решетке». Популяция потребителей состоит из особей, пространственно – временная динамика которых учитывает демографические и миграционные аспекты. Гибель особи наступает при дефиците энергии. Рассматриваются различные типы взаимодействий между особями, учитывающие ранги животных, определяемые возрастом. Проведены имитационные эксперименты, показывающие нелинейные зависимости средней подвижности по популяции от плотности популяции и ряда других параметров.

Описание модели особи.

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.

Описание модели коллективного поведения.

Для описания коллективного поведения вводятся понятия ранг особи, связанный с возрастом. Считается. что особи одного ранга «отталкиваются» друг от друга, а особь меньшего ранга «притягивается» к особи большего ранга. Предполагается, что особь «видит» конечное множество ближайших особей. Интенсивность взаимодействия между особями задается потенциалом, зависящим от расстояния между ними.

Проведены имитационные эксперименты, показывающие нелинейные зависимости средней подвижности по популяции от плотности популяции и ряда других параметров.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 09-0700-398а

Литература

Белотелов Н.В., Коноваленко И.А. Использование имитационного моделирования для исследования особенностей популяционной динамики. Социальные процессы и технологии: моделирование и управление. – М.:РАЕН_РОС_МИГКУ, 2010. С. 26-30.
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.- P. 343-360.
R.Mac Nally. Modelling confinement experiments in community ecology: differential mobility among competitors. Ecological Modelling, 129, 2000. P.- 65-85.
Шмидт-Ниельсон К. Размеры животных: Почему они так важны?.- Москва.: Мир, 1987.

БИФУРКАЦИИ В МОДЕЛЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НИШ: ГРАНИЦЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ ОБЩЕГО РЕСУРСА

Березовская Ф.С [1], Карева И.Г.[2], Кастийо-Чавес.К.[2]

[1]*Howard University, Washington DC, USA*
fberezovskaya@howard.edu

[2]*Arizona State University, Tempe, USA*
anirinka@gmail.com, chavez@math.asu.edu

Аннотация: возможности устойчивого сосуществования системы “ресурс-потребитель” рассматривается с помощью простейшей модели, в которой потребитель может вкладывать в возобновление ресурса. Прослежена динамика системы в зависимости от фиксированного и распределенного “параметра потребления”.

Базовая модель

“Экологическая ниша” рассматривается как устойчивое состояние системы типа «ресурс-потребитель»._Модель образования ниши, предложенная в (Krakauer et. al, 2009), учитывает возможность роста и/или убывания ресурса как по естественным причинам, так и в силу взаимодействия с потребителем, который, расходуя ресурс, может также участвовать в его возобновлении; модель имеет вид

$$\frac{dN}{dt} = N(c - \frac{N}{kz}), \quad \frac{dz}{dt} = \gamma + \frac{eN(1-c)}{N+z} - \delta z \qquad (1)$$

где $N \geq 0, z \geq 0$ - нормированные плотности потребителя и количество ресурса, а неотрицательные параметры имеют следующий смысл: c -коэффициент размножения (роста)

популяции потребителя, γ и δ-скорости естественного восстановления и деградации ресурса, соответственно; $e \le 1$ - эффективность создания ниши, $k(=1)$- эффективность извлечения ресурса из ниши; популяция “вкладывается” в возобновление ресурса (“альтруисты”), если $c<1$ и только потребляет его (“эгоисты”), если $c>1$. В данной работе система (1) изучается в замкнутом первом квадранте, причем в топологически экивалентной форме, получающейся после замены $dt \to z(N+z)dt$.

Теорема. *При* $\gamma>0$ *параметрическое пространство модели* (1) *разбивается на пять областей топологически различных фазовых портретов при* $0<\delta<\delta^*$ *и на шесть областей при* $\delta>\delta^*$ (см. рисунок.1). *Границы между областями отвечают следующим бифуркациям в модели*(слева-направо): *гетероклиничекие* K,S- *слияние сепаратрис, соответственно,* O *и* B (*пояление притягиваещего сектора вблизи* O) *и* O *и* E (*рождение неустойчивого предельного цикла*), H^+, H^- - *субкритическая при* $\delta<\delta^*$ *и суперкритическая при* $\delta>\delta^*$ *бифуркация Адронова-Хопфа* (*смена устойчивости* A), C - *слияние устойчивого и неустойчивого предельных циклов,* Nul -*слияние* O *и* A (*уход* A *из 1-го квадранта*).

Интерпретация полученных результатов состоит в следующем. Ниша (в виде нетривиального устойчивого равновесия A) всегда существует при $c<1$ (обл. 1 на рисунке.1), т.е. в популяции потребителей-альтруистов. При $c>1$ (“эгоисты”) потребитель может вымереть, и модель объясняет как. При малых $\nu = c-1>0$ (обл. 2 на портрете) появится устойчивый сектор в окрестности O, в который попадают орбиты с низкой начальной плотностью; при росте ν область притяжения “ниши” (равновесие в обл.3, устойчивые колебания в обл.6) уменьшается, ее граница-неусточивый предельный цикл-проявляется неустойчивыми колебаниями.. Наконец, в областях. 4 и 5 потребитель вымирает при любых начальных значениях.

Рисунок 1. Бифуркационная диаграмма модели (1), представленная как $(c,\gamma/e)$ – срез параметрического портрета при фиксированном δ **(a)**, схемами на сфере Пуанкаре, выявляющими роль структуры точки O (Berezovskaya at.al, 2007) в структуре фазовых портретов **(b)**, фазовыми портретами областях **(c)**

Распределенная модель

Предположим, что популяция неоднородна и каждый организм имеет свое собственное значение параметра *c*. Пусть $M_0(\delta)$-производящая функция моментов начального распределения параметра *c*. Можно показать (Karev, 2010), что тогда динамика неоднородной модели описывается также системой вида (1), где вместо c надо подставить среднее значение $E^t[c]$ параметра c в момент t, которое в данном случае можно вычислить по формуле $E^t[c] = \frac{d}{dt}\ln(M_0(t))$. В качестве подходящих начальных распределений мы рассматривали равномерное, экспоненциальное и укороченное экспоненциальное (в конечном интервале). Например, для экспоненциального распределения со средним μ, $M_0(t) = \mu/(\mu - t)$ и $E^t[c] = 1/(\mu - t)$. В результате численного анализа модели показано, что (**1**) параметрическая неоднородность популяции не спасает ее от гибели, если уровень потребления слишком велик ($c > 1$), но замедляет ее; (**2**) одновременное ускорение естественного возобновления ресурса (γ) и его распада (δ) повышает устойчивость системы, допуская существование ниши (впрочем, в виде устойчивых колебаний) при более высоком уровне потребления.

Работа поддержана грантами: NSF -Grant DMS -0502349, NSA - Grant H98230-06-1-0097, the Alfred T. Sloan Foundation and the Office of the Provost of ASU.

Литература

Berezovskaya F., Novozgilov A. Karev G. Population models with singular equilibrium // Math. Biosci.- 2007, 208,270-299

Karev, G.P. On mathematical theory of selection: continuous time population dynamics // Math. Biol.- 2010.- 60(1) – P. 107-129.

Krakauer, D.C., Page, K.M.& Erwin, D.H. Diversity, dilemmas, and monopolies of niche construction // The Amer. Natur., 2009.- 173. P. 26-40.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОЧВЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ БАЛАНСА АЗОТА И УГЛЕРОДА И ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Благодатский С.А.[1], Гроте Р.[2], Кизе Р.[2], Буттербах- Баль К.[2]

[1]*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия,* e-mail: sblag@mail.ru

[2]*Институт метеорологии и исследования климата, Технологический Институт Карлсруэ, Гармиш-Партенкирхен, Германия*

Klaus.butterbach-bahl@kit.edu

Аннотация: модель (MiCNiT) круговорота азота и углерода в почве, описывающая эмиссию парниковых газов (N_2O, NO, CO_2) была дополнена расчетами транспорта газов и веществ в жидкой фазе по профилю почвы. На основе детальных экспериментальных данных для лесной экосистемы была произведена параметризация модели, включенной в качестве блока в систему для экосистемного моделирования MoBiLE.

Определение масштабов эмиссии закиси азота (N_2O), также как и других парниковых газов в региональном и национальном масштабе требует проведения расчетов с использованием геоинформационных систем и компьютерного моделирования. Используемые для этой цели модели должны достаточно точно и надежно описывать

временную динамику и пространственные закономерности процессов, приводящих к эмиссии парниковых газов (N_2O, CO_2 CH_4). Их разработка затрудняется тем, что зависимость эмиссии азотсодержащих газов от факторов окружающей среды и свойств почв носит нетривиальный характер. Так, например, данные полевых наблюдений свидетельствуют о наличии резких всплесков эмиссии закиси азота после обильных осадков или оттаивания почвы весной (de Bruijn et al., 2009). Однако такие явления не носят регулярный (ежегодный) характер. Поэтому для описания и более полного понимания происходящих явлений необходима разработка сложных процессно-ориентированных экосистемных моделей, учитывающих все особенности микробиологических превращений азота в почве. Примером такой модели, является модульная система MoBiLE в состав которой входит разработанная нами модель MiCNiT.

Рисунок 1. Изменение доли араэробного объема в профиле почвы в течение года рассчитанное с помощью модели MICNiT

Целью работы было описание всех процессов, контролирующих интенсивность эмиссии парниковых газов из почвы. Модель включает:

-- минерализацию растительных остатков и почвенного гумуса (с учетом скоростей разложения и аммонификации),

-- динамику углерода и азота почвенной микробной биомассы, с учетом ее физиологического состояния или активности,

-- денитрификацию с детальным описанием продуцирования и потребления интермедиатов,

-- автотрофную нитрификацию и денитрификацию у нитрификаторов, с описанием их роста,

-- гетеротрофную нитрификацию

-- динамические изменения соотношения анаэробных и аэробных зон почвенного профиля,

-- транспорт газообразных и растворимых веществ как между анаэробными и аэробными зонами, так и внутри всего почвенного профиля (концепция анаэробного баллона).

Входными данными для инициализации и работы созданной модели являются метеорологическая информация, а также результаты расчетов, полученные в ходе работы других модулей системы MoBiLE. Так, движение растворов в профиле почвы рассчитывается с помощью модуля гидрофизики почвы; рост леса и связанные с ним процессы массопереноса таких элементов, как азот и углерод, рассчитываются в модуле физиологии растений; перенос влаги, вещества и тепла в экосистеме в модуле, описывающем микроклимат леса.

На примере бурой лесной почвы под елью показано, как в многолетней динамике модель MiCNiT предсказывает эмиссию CO_2, N_2O NO и N_2 из почвы в зависимости от климатических условий и особенностей почвенного профиля. Интенсивность использования микроорганизмами кислорода в ходе разложения контролирует долю анаэробных зон в почве (Рис. 1) и определяет, таким образом, интенсивность денитрификации. Соотношение эмиссии продуктов денитрификации: NO, N_2O и N_2 также зависит от динамического изменения концентрации кислорода в почве. Детальное описание всех ступеней денитрификации и диффузии газов в профиле почвы позволяет предсказывать эмиссию закиси азота и углекислого газа в зависимости от изменений влажности и интенсивности биологических процессов в почве. Для широкого использования модели требуется оценка чувствительности параметров модели к внешним факторам, также как и ее дальнейшая верификация для различных почвенных и климатических условий.

Литература

de Bruijn A.M.G., Butterbach-Bahl K., Blagodatsky S., Grote R. Model evaluation of different mechanisms driving freeze-thaw N_2O emissions // Agriculture, Ecosystems & Environment.- 2009.- V. 133.- P. 196-207.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГУМУСОВОГО СОСТОЯНИЯ ДЕРНОВО–ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УДОБРЕНИЙ

Болтунова А.И., Беличенко М.В.[2], Романенков В.А.[2], Литвинский В.А.[2]

[1]*РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия*
AlenaBoltunova@yandex.ru

[2]*ВНИИА имени Прянишникова, Москва, Россия*
viua@online.ru

Аннотация: результаты длительного полевого опыта по изучению эффективности минеральных удобрений и навоза за 77 лет исследований были сведены в базы данных, и обработаны с помощью динамической модели почвенного углерода Roth-C. Модель удовлетворительно воспроизводит динамику органического углерода в пахотном слое различных вариантов опыта.

Введение

Длительные опыты являются уникальной основой для исследования изменения свойств почвы под воздействием различных агротехнических приёмов (обработки почв, систем удобрений и защиты растений, севооборотов). Они позволяют оценить динамику изменения почвенных показателей, проследить их направление, формировать различные базы данных и на основе статистической обработки результатов моделировать почвенные процессы.

Объекты и методы исследования

В представляемой работе были использованы результаты длительного опыта Долгопрудной Агрохимической Опытной Станции (ДАОС), где с 1931 года в течение 77 лет изучали эффективность навоза и минеральных удобрений, их влияние на свойства дерново – подзолистой, тяжелосуглинистой почвы в полевом севообороте с клеверным паром.

Для моделирования динамики запасов углерода в почве использовали Ротамстедскую модель (Roth – C), которая была разработана и параметризована на Ротамстедской опытной станции (Англия) и в настоящее время широко используется для прогнозирования изменений содержания органического углерода на различных типах почв и видов землепользований, включающих пахотные земли, пастбища и лес. Модель работает с месячным шагом, рассчитывая запас общего углерода почвы в т/га во временном диапазоне от одного года до столетия. Roth-C учитывает количество осадков (мм), температуру воздуха (°C), испарение с открытой водной поверхности (мм), поступление органического углерода в почву с растительными остатками и навозом (т/га C), процентное содержание фракции глины (<0,002мм) (используется для расчета доступной растениям влаги в верхнем слое почвы и минерализации органического вещества).

Экспериментальная часть

По данным опыта были созданы базы данных ежегодного поступления растительных остатков в почву и запасов органического углерода в почве после прохождения каждой ротации севооборота на вариантах контроль, навоз, NPK. Также была создана метеорологическая база данных. Для запуска модели данные были оформлены в виде метеофайлов и файлов системы земледелия для каждого года проведения опыта.

Результаты моделирования динамики почвенного органического углерода представлены на рисунках.

Изучение гумусового состояния тяжелосуглинистой дерново-среднеподзолистой почвы при длительном (77 лет) применении удобрений показывает, что в первые 50 лет произошло существенное уменьшение запасов углерода по сравнению с исходными его значениями на вариантах без применения навоза. Потери составили 10 т/га на контроле и 8 т/га на варианте NPK. Повышение содержания углерода после 2000-го года в этих вариантах связано с введением в севооборот большего количества трав. На варианте контроль, несмотря на эти изменения, продолжается дальнейшее небольшое снижение реального содержания углерода. В других вариантах чувствительность модели к повышению поступления растительных остатков более выраженная.

Выводы

В целом проверка работы модель Roth-C в условиях длительного опыта ДАОС, показала, что модель достаточно точно воспроизводит динамику органического углерода в пахотном слое различных вариантов опытов.

Длительные опыты являются основной экспериментальной базой для исследования изменения запасов углерода (С). Наиболее подходящей основой для мониторинга является моделирование, которое интегрирует большие объемы экспериментальных данных, что создает надежную базу для прогнозирования динамики гумуса почвы.

LIMIT BEHAVIOR OF A DISTRIBUTED REPLICATOR SYSTEM

Bratus A.S., Posvyanskii V. P., Novozhilov A.S.

Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)
applmath1miit@yandex.ru

The replicator system is known to provide a general modeling framework for several distinct areas of mathematical biology. In particular, it arises as a selection equation in population genetics, as a dynamic description of evolutionary game theory, and as a model for putative chemical reaction describing prebiotic evolution. It is simplest form, when the fitness of the species is a linear function of the relative abundance of other species, the replicator equation takes the form

$$\frac{dv_i}{dt} = v_i\left[(Av)_i - f^{loc}(t)\right], \quad i = 1,2...,n \qquad (1)$$

where $V = V(t) = (v_1,...,v_n)$, A is $n \times n$ matrix with elements a_{ij} describing the contribution of the *j*-th species to the fitness of the *i*-th species, $(Av)_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} v_j$, and the mean fitness $f^{loc}(t) = \langle Av, v \rangle = \sum_{i=1}^{n} (Av)_i v_i$ is chosen such that $V \in S_n = \left\{ V : \sum_{i=1}^{n} v_i = 1 \right\}$

There are several different approaches to add space to (1). We suggest that the global regulation represents a natural and convenient approach to consider the replicator equation with an explicit spatial structure. To be exact, as counterpart of local model (1) we consider the model

$$\frac{du_i(x,t)}{dt} = u_i(x,t)\left[(Au(x,t))_i - f^{sp}(t)\right] + d_i \Delta u_i(x,t), \quad i = 1,2...,n \qquad (2)$$

$U = \Gamma(x,t) = (u_1(x,t),...,u_n(x,t)), x \in \Omega \subset R^k, k = 1,2,3, \quad d_i > 0$ are diffusion coefficient and mean integral fitness is given, assuming Niemann's boundary value conditions , by $f^{sp}(t) = \iint_{\Omega} \langle Au, u \rangle dx$. This approach allows analytical investigation of (2); the tool which was mainly missing in the analysis of replicator equation with explicit space. In particular, it is possible to find the conditions for asymptotically stable rest points of (1) to be asymptotically stable homogenous equilibrium of (2). In our work, we show that for some values of diffusion coefficient s spatially heterogeneous solution appear. Using a definition for the stability in the mean integral sense we prove that these heterogeneous solution can be attaching; in particular this is the case for Eigen's hypercycle. Defining in some natural way evolutionary stable for the distributed system (2), we provide the conditions for this distributed state to be an asymptotically stable stationary solution to (2).

Part of results is presented in Bratus et al. (2010, 2011).

References

Bratus A.S., Posvyanskii V. P. and Novozhilov A.S. Existence and stability of stationary solutions to spatially extended autocatalytic and hypercycling systems under global regulation and with nonlinear growth rates. Nonlinear Analysis: Real World Applications.- 11,- 2010.- P. 1897-1917.

Bratus A.S., Posvyanskii V. P. and Novozhilov A.S. A note on the replicator equation with explicit and global regulation. Mathematical Biosciences and Engineering, in press, 2011.

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ СООБЩЕСТВ МИКРООРГАНИЗМОВ

Вавилин В.А.

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

Аннотация: в последние годы с развитием молекулярно-биологических методов появилась возможность качественного и количественного описания конкретных видов и групп микроорганизмов. В сочетании с изотопными измерениями и математическим моделированием стало возможно анализировать динамику микробных сообществ. В докладе анализируется функционирование микробных сообществ, осуществляющих превращение целлюлозы, метанола и ацетата в метан при умеренной и повышенной температуре (мезо- и термофильный процессы).

В процессе анаэробной трансформации субстрат превращается в продукты реакции и биомассу: Substrate (S) $\rightarrow$ Products (P) + Biomass (B). Мы предложили (Vavilin, 2010) следующие уравнения для описания обогащения ^{13}C продуктов реакции и биомассы:

$$\frac{df^{P}}{dt} = \frac{dP/dt}{P}\left\{f^{S} - f^{P}\right\}, \qquad \frac{df^{Bio}}{dt} = \frac{dB/dt}{B}\left\{f^{S} - f^{Bio}\right\}$$

где $f^{P} = {}^{13C}P/P$ и $f^{Bio} = {}^{13C}B/B$ являются фракциями ^{13}C в продуктах и биомассе, которые, в свою очередь, зависят от фракции ^{13}C в субстрате $f^{S} = {}^{13C}S/S$; dP/dt является скоростью появления продуктов без учета потребления их; dB/dt является скоростью роста биомассы без учета ее распада. Эти уравнения были добавлены в базовую математическую модель, описывающую химические реакции.

Следующие стехиометрические уравнения применялись для описания термофильного разложения метанола (Vavilin et al., 2010): 1. $CH_3OH + 2H_2O \rightarrow 3H_2 + H_2CO_3$ (Окисление метанола). 2. $H_2 + 0.5\ H_2CO_3 \rightarrow 0.25CH_3COOH + H_2O$ (Гомоацетогенез). 3. $H_2 + 0.25H_2CO_3 \rightarrow 0.25CH_4 + 0.75H_2O$ (Водородотрофный метаногенез). 4. $CH_3COOH + 4H_2O \rightarrow 4H_2 + 2H_2CO_3$ (Окисление ацетата).

Рисунок 1. Динамика термофильного разложения метанола. Символы: экспериментальные данные (Cemagref); кривые: результаты моделирования. TOC и TIC являются концентрациями общего органического и неорганического углерода, соответственно

В ходе периодического процесса наблюдается двухфазное образование метана. В первой фазе лимитирующей общую скорость процесса является процесс превращения метанола в водород и угольную кислоту (реакция 1), а во второй – синтрофное окисление ацетата (реакция 4). В обеих стадиях метан продуцируется из H_2/H_2CO_3 (реакция 3), которые, в свою очередь, продуцируются из метанола и ацетата. Окисление и метанола и ацетата метанол- и ацетат-окисляющими бактериями идет при синтрофном взаимодействии с гомоацетогенными бактериями и водородотрофными метаногенами, конкурирующими за водород.

Следующие стехиометрические уравнения применялись для описания термофильного разложения целлюлозы (Vavilin et al., 2010): 1. $[C_6H_{10}O_5]_n + nH_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$ (Гидролиз). 2. $C_6H_{12}O_6 + 4H_2O \rightarrow 2\ CH_3COOH + 2H_2CO_3 + 4H_2$ (Кислотогенез). 3. $H_2 + 0.25H_2CO_3 \rightarrow 0.25CH_4 + 0.75H_2O$ (Водородотрофный метаногенез). 4. $CH_3COOH + H_2O \rightarrow CH_4 + H_2CO_3$ (Ацетикластический метаногенез).

Рисунок 2. Динамика термофильного разложения целлюлозы. Символы: экспериментальные данные (Cemagref)

Для описания гидролиза целлюлозы применялось уравнение Контуа (реакция 1). Согласно модели, глюкоза, как промежуточный продукт, существует лишь до 4-го дня. Подобно трансформации метанола, в ходе периодического процесса разложения целлюлозы наблюдается двухфазное образование метана. На первом этапе метан образуется из H_2/H_2CO_3 (реакция 3), тогда как на втором - он образуется из ацетата (реакция 4) при участии *Methanosarcina* sp. В противоречии с трансформацией метанола, модель и экспериментальные данные показали, что при разложении целлюлозы насыщающий уровень ^{13}C в ацетате был намного выше, чем в TIC.

Литература

Vavilin V.A. Equation for isotope accumulation in products and biomass as a way to reveal the pathways in mesophilic methanol methanization by microbial community // Ecol. Modelling – 2010.- Vol. 221.- P. 2881-2886.

Vavilin V.A., Li T., Chapleur O., Mazeas L., Bouchez T. Modelling thermophilic methanol and cellulose methanization based on chemical reactions and isotope accumulation in products. In Proc. 12th World Congress on Anaerobic Digestion. October 31st –November 4th 2010.– Guadalajara.- Mexico. CD.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ ЗАПАСОВ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Варчева С.Е.

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

Аннотация: для исследования изменений климата используется математическая модель динамики запасов почвенной влаги. Проведенные численные эксперименты показали, что на юге Ростовской области современное потепление может сопровождаться ростом засушливости климата, который может повысить риски потерь сельскохозяйственной продукции.

Разработана математическая модель, предназначенная для круглогодичного мониторинга запасов продуктивной влаги в почве с декадным шагом по времени. Моделируются процессы накопления воды в снежном покрове, интенсивность таяния снега, испарение с поверхности почвы и динамика влагозапасов в метровом слое почвы. Численная

схема основывается на использовании двух балансовых уравнений – для запасов воды в снежном покрове и в метровом слое почвы.

Подробное описание модели приведено в работе (Варчева, 2009). Модель, ориентированная на стандартную агрометеорологическую информацию – суммы осадков, температуру воздуха и дефицит влажности воздуха, была апробирована на материалах многолетних 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. Эти результаты показывают, что данная численная схема обеспечивает достаточную для практики точность расчета влагозапасов в круглогодичном режиме и может, поэтому, служить надежным инструментом для исследования изменения климата.

Проведены численные эксперименты для оценки влияния наблюдаемых изменений климата на водный режим посевов сельскохозяйственных культур. Рассчитанные временные ряды запасов продуктивной влаги являются надежным физически обоснованным индикатором засух – самого важного для сельского хозяйства юга России неблагоприятного гидрометеорологического явления. Повторяемость этого явления характеризует степень засушливости климата данного региона. Критерием наступления почвенной засухи принято считать такое содержание влаги, когда ее движение происходит только по почвенным пленкам и парообразно (Гридасов, 2000). Так, для данной почвы (чернозем предкавказский тяжелосуглинистый) почвенная засуха наступает при запасах продуктивной влаги в метровом слое почвы меньше 52 мм, недостаточное увлажнение бывает при запасах влаги, меньших 125 мм. Диапазон оптимального увлажнения – 126 -188 мм продуктивной влаги в слое почвы 0 -100 см.

Таблица 1. Оценка условий влагообеспеченности посевов сельскохозяйственных культур на юге Ростовской области за период с 1971 по 2010 гг.

Период, годы	Средние запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы, мм							Повторяемость (%)						
								недостаточного увлажнения			почвенных засух			
	март	апр.	май	июн	июл.	авг.	сент.	март	апр.	май	июн	июл	авг.	сент.
1971-1980	154	140	111	90	71	58	67	20	30	80	20	20	40	40
1971-1990	150	141	112	89	76	60	63	25	40	80	10	15	40	40
1971-2000	151	139	112	91	76	59	64	23	40	77	10	17	40	40
1971-2010	154	135	107	86	69	54	60	20	43	80	13	28	48	43

Данные таблицы 1 позволяют заключить, что с 70-ых годов прошлого века, т.е. с момента начала «взрывного» глобального потепления (Груза, Ранькова, 2009), степень засушливости климата данного региона существенно не менялась вплоть до конца первого десятилетия нынешнего века. Видно, что представленные оценки достаточно устойчивы. Увеличение повторяемости почвенных засух в июле, августе и в сентябре наблюдается при осреднении за 40 лет, что, очевидно, объясняется учетом необычайно теплых и засушливых лет с 2007 по 2010.

Таблица 2. Оценки линейных трендов осадков и температуры на ГМС Гигант

Период, годы	Коэффициент линейного тренда осадков, мм/год							Коэффициент тренда температур, град./10 лет						
	март	апр.	май	июн	июл.	авг.	сент.	март	апр.	май	июн	июл	авг.	сент.
1971-1980	-0,49	7,36	-0,57	-2,06	-1,3	6,9	-0,98	1,0	-1,2	-0,3	-1,4	-1,4	-2,2	1,5
1971-1990	-0,70	1,32	-0,74	0,91	0,64	-1,18	-0,06	0,15	-0,3	-0,9	-0,5	-0,2	-0,1	0,6
1971-2000	0,04	0,21	0,59	0,67	0,04	-0,34	-0,02	0,6	0,2	-0,4	0,2	0,4	0,2	0,1
1971-2010	**0,43**	**-0,38**	**0,11**	**0,29**	**-0,41**	**-0,02**	**0,15**	**0,8**	**-0,06**	**0,03**	**0,3**	**0,59**	**0,8**	**0,6**

Изменения климата обычно оцениваются как тенденции изменений климатических переменных за рассматриваемый интервал времени. Тенденция изменения влагозапасов складывается в результате баланса изменения осадков и суммарного испарения, которое, в свою очередь, определяется изменением температуры.

Из таблицы 2 следует, что за период 1971-2010 гг. рост осадков наблюдался в марте, незначительный – в мае, июне и в сентябре. Температура воздуха за период вегетации, кроме апреля, имеет тенденцию к росту.

Рассмотрим теперь коэффициенты линейного тренда влагозапасов метрового слоя почвы за указанные периоды (таблица 3).

Таблица 3. Оценки линейных трендов запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы

Период, годы	Коэффициент линейного тренда влагозапасов почвы, мм/год						
	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь
1971-1980	1,6	5,9	4,65	3,4	-0,72	3,84	4,04
1971-1990	-0,83	0,40	0,61	0,66	0,63	0,37	0,12
1971-2000	0,11	-0,13	0,10	0,34	0,04	-0,09	0,04
1971-2009	0,44	-0,43	-0,52	-0,47	-0,74	-0,56	-0,30
1971-2010	**0,39**	**-0,49**	**-0,55**	**-0,51**	**-0,78**	**-0,71**	**-0,48**

Из анализа таблицы следует, что тренды имеют разнонаправленный характер. Если в 1971-1990-х годах преобладали положительные линейные тренды влагозапасов, то при осреднении за 1971-2010 гг. тенденция изменилась, и в основном тренды влагозапасов стали отрицательными. Последняя строка в таблице 3 показывает влияние экстремального 2010 года – по сравнению с 2009 годом отрицательные тренды усилились. В целом за период с 1971 по 2010 гг. можно заключить, что современное потепление в данном регионе сопровождается ростом засушливости климата, что может повысить риски значительных потерь сельскохозяйственной продукции.

Литература

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

Гридасов В.Ф. Оценка влагообеспеченности сельскохозяйственных культур с помощью агрогидрологических свойств почвы // Труды ВНИИСХМ.- 2000.- Вып. 33.- С.178-184.

Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология.- 2009.- № 11.- С. 15-29.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Волошенкова Т. В.

Всероссийский НИИ агролесомелиорации, г. Волгоград, Российская Федерация
tvoloshenkova@yandex.ru

Аннотация: разработана компьютерная модель, позволяющая оценить потенциал исследуемой территории и обеспечить наилучшее распределение земель по видам сельскохозяйственных угодий.

Глубокий кризис сельского хозяйства за последние два десятилетия привел к серьезному спаду продукции растениеводства и животноводства, нарастанию процессов деградации почв, ухудшению использования земель, значительная часть которых оказалась заброшенной, покрылась древесно-кустарниковой растительностью. Среди причин снижения эффективности сельскохозяйственного производства в современных условиях можно

выделить: 1) нерациональное землепользование (размещение севооборотов, выбор технологий возделывания без всестороннего учета почвенно-климатических условий, агроэкологических требований с.-х. культур и возможных экологических последствий; 2) недостаток специалистов высокого профессионального уровня, а также возросшее число лиц, вынужденных самостоятельно решать оптимизационные задачи в области землеустройства и земледелия, но не обладающих всей полнотой знаний по данным вопросам и не имеющих оперативного доступа к современной научной информации (Каличкин и др., 2002).

Подъем и реформирование сельского хозяйства невозможны без его ландшафтной ориентации, без наиболее полного и рационального использования земельных и агроклиматических ресурсов. Такой подход преследует цель создания устойчивых природных комплексов, сохранения и увеличения продуктивности земель, предотвращения водной эрозии, дефляции почв. Для этого необходимо, чтобы каждый земельный выдел в общей системе функционирования агролесоландшафта имел свою схему эксплуатации, позволяющую наиболее полно реализовать почвенно-климатический потенциал территории.

Для выбора оптимального способа ведения хозяйства необходимо учесть очень большое количество взаимодействующих факторов, характеризующих природные, экономические и социальные условия обустраиваемого объекта. Кроме того, встает вопрос о целесообразности возвращения низкоплодородных и заросших лесом земель в интенсивное полеводство (Ерусалимский, 2011). Решение задач такого уровня возможно лишь на основе системного анализа с созданием имитационных моделей и реализацией их на ЭВМ.

В рамках данной проблемы нами разработана компьютерная модель рационального распределения земельных ресурсов хозяйства, которая позволяет систематизировать информацию об исследуемой территории и определить для каждого участка оптимальный, точно соответствующий его свойствам и возможностям способ эксплуатации. В результате площадь всех земель, пригодных для сельскохозяйственного производства, разбивается на угодья: пашню, пастбища, сенокосы, лес.

При отнесении рассматриваемого участка к тому или иному типу угодий учитываются в первую очередь требования экологической безопасности природопользования, предотвращения процессов деградации почвенного покрова.

Выделение угодий осуществляется в пределах земель сельскохозяйственного назначения отдельно по каждому эрозионному фонду (приводораздельному, присетевому, гидрографическому). В основу распределения пригодных для сельского хозяйства земель положен принцип ограничивающего фактора. В соответствии с ним все почвенные контуры, входящие в состав исследуемого массива, оцениваются в первую очередь по возможности их интенсивного использования в земледелии, т. е. под полевые, кормовые и др. севообороты. Если контуры для этих целей не подходят, то решается вопрос об ином виде их эксплуатации – в качестве кормовых или лесных угодий.

Для унификации характеристик, по которым контур можно отнести к тому или иному виду угодий, а также для использования в ЭВМ нами предложен комплекс критериев пахотопригодности почв, который включает: рельеф, гранулометрический состав почв, гумусность, засоленность, солонцеватость, осолодение, кислотность, эродированность, дефлированность почв, минерализацию и уровень грунтовых вод, каменистость и щебенчатость, развитость почвенного профиля, наличие и глубину залегания экранного горизонта (Волошенкова, 2010).

Помимо них в модели используются дополнительные параметры: положение рассматриваемого контура на водосборе (приводораздельный, присетевой или гидрографический фонды), размытость территории, выходы на поверхность твердых и рыхлых пород, годовое количество осадков и т.д. Для земель гидрографического фонда учитываются: принадлежность участка к различным частям фонда – к суходольной гидрографической сети или долине реки, сезон половодья, длительность поемности, разбитость берегов скотом, пораженность оползнями, трещинами и т.д. Эти показатели

позволяют боле полно учесть особенности местных условий и вычленить помимо пашни пастбища, сенокосы и лесные угодья.

Очевидно, что под кормовые угодья должны использоваться земли, которые по тем или иным причинам не подходят для интенсивного полеводства. В первую очередь под них выделяют земли низших бонитетов, неудобья (эродированные почвы, маломощные щебнистые, комплексы с солонцами и т.п.). В модели выделяются: 1) угодья, которые можно использовать комплексно (и как сенокосы, и как пастбища); 2) угодья, которые допустимо эксплуатировать только как сенокосы (почвы с уровнем грунтовых вод выше 0,8 м, а также постоянно переувлажненные и заболоченные почвы) (Андреев и др., 1983).

Под облесение предназначаются наиболее неудобные и наименее плодородные земли: выходы на поверхность твердых и рыхлых пород, очень сильно каменистые, сильнощебенчатые почвы, открытые развеваемые пески, солоди, откосы оврагов, склоны присетевого фонда и берега гидрографической сети крутизною более 35°, а также пораженные частыми размывами (с расстоянием между последними менее 50 м), оползнями, трещинами, сильно разбитые скотом, донные размывы (Кочетов и др., 1999).

Программное обеспечение модели рационального распределения земельных ресурсов состоит из двух обособленных, но функционально связанных между собою частей. Первая часть – это программа создания банка исходной информации, содержащего полную характеристику каждого почвенного контура исследуемого землепользования (по 50 показателям). Вторая часть – основная программа, которая позволяет определить для каждого участка наилучший способ его эксплуатации. В результате вся площадь землепользования разбивается на с.-х. угодья: 1) пашню, 2) сенокосы и пастбища, 3) сенокосы, 4) лес. По каждому виду угодий представляется список почвенных контуров, для которых данный тип хозяйственного использования является наиболее приемлемым.

Применение данной модели на практике позволит оптимизировать выделение угодий, повысить эффективность и экологическую безопасность эксплуатации земельных ресурсов, сократить затраты труда и времени на создание и экспертную оценку проектных решений.

Литература

Агролесомелиоративное адаптивно-ландшафтное обустройство водосборов / И.С. Кочетов [и др.].– Волгоград, 1999.– 84 с.

Волошенкова Т.В. Критерии выделения сельскохозяйственных угодий / Генезис, география, классификация почв и оценка почвенных ресурсов: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 150-летию со дня рождения Н.М. Сибирцева (14-16 сент. 2010 г.) [под общ. ред. д-ра биол. наук, чл.-кор. РАН С. А. Шобы]. – Архангельск: КИРА, 2010. – С. 253-257.

Ерусалимский Е.В. Лес и пашня // Лесное хозяйство, 2011.– №1.– С. 14-15.

Проблемы разработки АЛСЗ для хозяйств Сибири с использованием компьютерных технологий / В.К. Каличкин [и др.] // Современные проблемы земледелия и экологии.– Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2002.– С. 291–294.

Рекомендации по созданию и использованию культурных пастбищ для овец/ А.В. Андреев [и др.].– М.: Колос, 1983.– 41 с.

ЭВОЛЮЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БОБОВО-РИЗОБИАЛЬНОГО СИМБИОЗА: ИНТЕГРАЦИЯ, СПЕЦИФИЧНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАРТНЕРОВ

Воробьев Н.И.[1], Проворов Н.А.[1], Свиридова О.В.[1], Пищик В.Н.[2]

[1]*ГНУ ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии Россельхозакадемии, С.-Петербург, Российская Федерация*
vorobyov@arriam.spb.ru

[2]*ГНУ АФИ Россельхозакадемии, Санкт-Петербург, Российская Федерация*
veronika-bio@rambler.ru

Аннотация: эволюция бобово-ризобиального симбиоза моделируется итерационными функциями, описывающими на каждой итерации циклические процессы композиции/декомпозиции симбиоза. Модель описывает конкурентные процессы между генотипами в растительной (прорастание семян, формирование семенной продукции) и бактериальной (инокуляция и колонизация экологических ниш, выживание в почвенной нише) популяциях в микроэволюционных циклах. Разработан метод анализа интеграции, специфичности и эффективности симбиоза.

Мутуалистический симбиоз является результатом кооперативных адаптаций неродственных организмов к неблагоприятным условиям внешней среды. В нем у организмов формируются «противоестественные» альтруистические специфические системные признаки (Тихонович, Проворов, 2009), приносящие непосредственную пользу не своему обладателю, а партнеру. В рамках теории естественного отбора причины возникновения и эволюционного закрепления таких признаков не поддаются объяснению. Поэтому, для изучения обстоятельств возникновения мутуализма нами была разработана математическая модель бобово-ризобиального симбиоза, описывающая детально динамические процессы в растительной и микробной популяции, применительно к каждому микроэволюционному жизненному циклу биосистемы (Provorov, Vorobyov, 2010).

В модели каждый микроэволюционный цикл разделен на 4 этапа (рис.1): (1 этап) возникновение новых генотипов (мутантов) бактерий с измененными симбиотическими свойствами, происходящее в почвенной нише; (2 этап) инокуляция бактериями симбиотических (ризосферных, клубеньковых) ниш, предоставляемых растениями; (3 этап) колонизация бактериями инокулированных ниш и формирование растениями семян; (4 этап) выход бактерий из ризосферы и клубеньков, и дифференциальное отмирание штаммов в почве, которое приводит к установлению новой генетической структуры симбиосистемы, являющейся начальной для последующего цикла. Предлагаемая математическая модель описывает систему, состоящую из диморфной растительной популяции (генотипы Г1, Г2) и полиморфной бактериальной популяции, включающей родительский штамм (P), образующий не фиксирующие N_2 клубеньки с обоими растительными генотипами, и три его N_2-фиксирующих мутанта (M1, M2, M3). Мутант M1 проявляет высокую N_2-фиксирующую активность с растительным генотипом Г1, но низкую — с Г2 (мутуалистический симбионт, специфичный для растительного генотипа Г1); M2 проявляет высокую N_2-фиксирующую активность с растительным генотипом Г2, но низкую — с генотипом Г1 (специфичный симбионт генотипа Г2); M3 проявляет промежуточный уровень N_2-фиксирующей активности с обоими растительными генотипами (неспецифичный симбионт).

Частоты встречаемости ($\psi_{...}$) родительских и мутантных бактериальных штаммов в почвенной нише вычисляли с помощью линейных итерационных функций:

$$\psi_{P.i+1} = \left(1 - q_1 - q_2 - q_3\right) \cdot \psi_{P.i}\,,\ \psi_{Mj.i+1} = \psi_{Mj.i} + q_j \cdot \psi_{P.i}\,,$$

где i – номер микроэволюционного цикла; q_j – коэффициенты мутации для j-того мутанта.

Частоты встречаемости бактериальных штаммов при инокуляции ризосферной и клубеньковой ниш:

$$\psi_{P.i+1} = \psi_{P.i}^{n0} \Big/ \left(\psi_{P.i}^{n0} + \psi_{M1.i}^{n1} + \psi_{M2.i}^{n2} + \psi_{M3.i}^{n3}\right),\ \psi_{Mj.i+1} = \psi_{Mj.i}^{nj} \Big/ \left(\psi_{P.i}^{n0} + \psi_{M1.i}^{n1} + \psi_{M2.i}^{n2} + \psi_{M3.i}^{n3}\right),$$

где n0, n1, n2, n3 – индексы инокуляции ризосферной и клубеньковой ниш бактериальными штаммами. Колонизация ниш описывается системой логистических дифференциальных уравнений, в которых задаются индексы колонизации ниш ($V_{...}$) и емкости почвенной, ризосферной и клубеньковой ниш (S, R,N). Интеграция партнеров симбиоза вычислялась с помощью собственных значений ковариационной матрицы частот партнеров симбиоза, полученной путем варьирования параметров модели.

Рисунок 1. Схема динамических процессов при мутуалистическом симбиозе на 4-х этапах микроэволюционного цикла.

В результате показано, что возрастание интеграции партнеров симбиоза приводит к возрастанию репродуктивной эффективности симбиоза. Введение в модель эпигенетической связи (ЭПГ-связь связывает текущий и последующий цикл) направляет эволюцию симбиоза на специфичность взаимодействия партнеров.

Работа поддержана грантом РФФИ 09-04-00907а.

Литература

Provorov N.A., Vorobyov N.I. Simulation of evolution implemented in the mutualistic symbioses towards enhancing their ecological efficiency, functional integrity and genotypic specificity. Theor. Population Biology.- 2010.- 78 (4).- P. 259-269.

Тихонович И. А., Проворов Н. А. Симбиозы растений и микроорганизмов: молекулярная генетика агросистем будущего.- СПб: Изд-во СПбГУ, 2009.- 210 с.

К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ СЦЕНАРИЕВ РАСЧЕТА ВЫЧИСЛИМЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАФАМИ РАБОТ В СЕТЕВОЙ БИБЛИОТЕКЕ

Воротынцев А.В.

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

Аннотация: обсуждается представление математической модели в сетевой библиотеке деревом кольцевых подграфов работ. Поясняется процедура уточнения узла графа подчиненным ему кольцевым подграфом. Приводится общая схема расчета ГиперМодели, ведомая событиями.

Задача сетевой библиотеки вычислимых моделей Нива – сохранять, публиковать и предоставлять услуги использования моделей, прежде всего сложных, широкому кругу пользователей сети Интернет. Под вычислимыми понимаются математические модели, результаты которых получают вычислениями, например, имитационные экологические модели. Необходимость таких библиотек вытекает из растущего многообразия моделей.

Рисунок 1. Обобщенная схема системы Нива

На рисунке 1 представлена обобщенная схема Нивы. Верхняя часть представляет программы, сохраняющие и рассчитывающие модели на удаленном компьютере-сервере, а нижняя – программу, с помощью которой пользователь задает сценарий расчета и его параметры. Сценарий задается графом работ. Граф конструирует пользователь из компонент нужной модели, запрашиваемых им из базы сервера. Совокупность компонент графа называется ГиперМоделью. Стрелки указывают последовательность работ. Компонента имеет имя [m][d], где [m] обозначает ее модель, а [d] – набор данных. Пользователь может редактировать значения набора [d].

Рисунок 2. Преобразование дерева выражения в кольцевые графы работ

Какие графы следует использовать для представления ГиперМоделей? Очевидно, наглядные и простые. Рисунок 2 показывает, что вычисление математического выражения можно определить деревом кольцевых подграфов работ. Так, дерево простого выражения

F=f(x)*h(z)+g(y), рис. 2.1, преобразуется в дерево кольцевых подграфов работ, рис. 2.2. При этом узел «*» получает значение f(x)*h(z), которое затем в узле «+» складывается с g(y). Более объемные выражения преобразуются в граф работ с помощью агрегирования узлов, как, например, показано на рис. 2.3 для узлов, заключенных в эллипсы. Здесь узлы start, end обозначают начало и конец вычислений. Заметим, что под работой понимается выполнение узлом некоторой функции, например, на рис. 2.2 вычисление f(x), h(z), g(y) или сложения и умножения.

Для существенного упрощения конструирования пользователем графов работ из них исключается изображение обменов данными между узлами. Предполагается, что возможносьи автоматически организовать такие обмены программируются в компонентах ГиперМодели заранее.

Деревьями кольцевых подграфов можно представлять решение систем дифференциальных уравнений. Так, на рис. 3.1 показано простейшее дерево: узел, вычисляющий правую часть H уравнения и узел-решатель S, решающий ∂Y/∂t =H. Решатель S выполняет цикл, пока точность решения не достигнет заданной. Цикл заканчивается переходом к узлу end.

Рисунок 3. Компоненты A и B уточняют граф уравнения ∂Y/∂t =H, H=∂(A*∂Y/∂x)/∂x + B

Подчиненный кольцевой подграф можно рассматривать как уточняющий переменные вышестоящего подграфа. Рис. 3 иллюстрирует процедуру уточнения узла подчиненным узлу кольцевым подграфом. Так, узел H на рисунке 3.1 задает правую часть уравнения ∂Y/∂t =H, H=∂(A*∂Y/∂x)/∂x + B с постоянными коэффициентами $A=A_0$ и $B=B_0$. Если пользователь добавил соответствующие узлы A и B, вычисляющие A(X,Y) и B(X,Y), как на рис. 3.2, тогда будет решаться уравнение уже с переменными коэффициентами A=A(X,Y) и B=B(X,Y). Узлы A и B также можно уточнять, например, поддеревьями типа рисунке 2.2, повышая, таким образом, диалоговые способности ГиперМоделей.

Рисунок 4. Схема расчета ГиперМодели в библиотеке

На рисунке 4 приведена схема расчета ГиперМодели. ГиперМодель HM включает 2 подмодели, изображенные в прямоугольниках H и G. HM рассчитывает решателем S систему уравнений, например 2-х уравнений типа приведенных на рис. 2. При расчетах HM обменивается сообщениями (событиями) evXX с исполняющей системой Sys библиотеки.

Сообщение evXX, поступившее от Sys в H.init, по стрелкам обходит компоненты H, чтобы компоненты выполнили работы, соответствующие evXX. В результате в HM генерируется новое сообщение evXX, поступающее в Sys. По окончании цикла расчетов генерируется evStop, поступающее пользователю, который либо повторяет цикл, генерируя evCalcCycle, либо заканчивает расчеты. Пользователь может использовать необязательные штриховые стрелки для уточнения обменов данными с интерфейсными узлами. Также необязательные блоки Sys и Out требуются пользователю только, если он изменяет их стандартное функционирование.

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 интегральное уравнение, позволяющее получить описание переноса в покрове в виде простых алгебраических выражений, чтобы использовать их в качестве граничных условий для решения задачи переноса в почве и затем получить полное описание переноса в покрове, в частности величину устьичного сопротивления листьев, регулирующего фотосинтез растений, и транспирации.

В слое $0 \le x \le H_l$ растительного покрова и корнеобитаемом слое $-H_s \le x \le 0$ почвы рассматриваются 2 системы уравнений (1)-(4) для температуры воздуха T_a, листьев T_l, концентрации водяного пара в межлистном воздухе q_a, в устьичных полостях листьев q_l:

$$J_{Ta} = -c_p k_a T_a^{'}, \qquad J_{qa} = -k_a q_a^{'}, \tag{1}$$

$$c_p\, \partial T_a / \partial t = -J_{Ta}^{'} + f_{Tl}, \qquad \partial q_a / \partial t = -J_{qa}^{'} + f_{ql}, \tag{2}$$

$$f_{Tl} = c_p D_T S_l (T_l - T_a) p_l, \qquad f_{ql} = D_q S_l (q_l - q_a) p_l, \tag{3}$$

$$f_{Tl} + \chi f_{ql} = R_{ll}^{'}; \tag{4}$$

и 2 системы (5-7) для температуры поверхности T_s и водного потенциала ψ_s почвы:

$$J_{Ts} = -c_p k_{Ts} T_s^{'}, \qquad J_{\psi s} = -k_{\psi s} \psi_s^{'}, \tag{5}$$

$$c_s\, \partial T_s / \partial t = -J_{Ts}^{'}, \qquad c_\psi\, \partial \psi_s / \partial t = -J_{\psi s}^{'} - f_{\psi s}, \tag{6}$$

$$f_{\psi s} = J_{ql} p_k + D_k S_k (\psi_s - \overline{\psi}_s) p_k; \tag{7}$$

с краевыми условиями:

$$J_{Ta} = c_p D_a \left(T_a - T_a^0\right), \qquad J_{qa} = D_a \left(q_a - q_a^0\right), \qquad x = H_l, \tag{8}$$

$$J_{Ta} = c_p D_{Ts} (T_s - T_a), \qquad J_{qa} = D_{qs} (q_s - q_a), \qquad x = 0, \tag{9}$$

$$J_{Ta} + \chi J_{qa} - J_{Ts} = R(0,t), \qquad -J_{\psi s} + J_{qa} = Q(t), \qquad x = 0, \tag{10}$$

$$T_s = T_s^0, \qquad \psi_s = \psi_s^0, \qquad x = -H_s. \tag{11}$$

Транспорт воды в растениях и транспирация J_{ql} регулируется водным потенциалом листьев ψ_l, их устьичным сопротивлением r_{st} и описывается нелинейными выражениями:

$$J_{ql} = \int_0^{H_1} f_{ql}dx \ , \ J_{ql} = D_k^{'}(\overline{\psi}_s - \psi_l) \ , \ r_{st} = r_{s0}(\psi_m - \delta_l\psi_l)(\psi_m - \psi_l)^{-1}, \ \overline{\psi}_s = \int_{-H_k}^{0} \psi_s p_k dx \ ,$$

$$1/D_q = 1/D_T + r_{st} \ , \ 1/D_k^{'} = r_{kc} + 1/(D_k S_k) \ ; \qquad (12)$$

Здесь «'» означает частную производную $T_a, T_s, q_a, \psi_s, J_{Ta}, J_{qa}, J_{Ts}, J_{\psi s}, \psi_s, R_{ll}$ по x; J_{Ta}, J_{qa} – потоки тепла и пара в воздухе, $J_{Ts}, J_{\psi s}$ – потоки тепла и воды в почве ; $R_{ll}(x,t)$ – заданная поглощенная слоем (0,x) длинноволновая и коротковолновая радиация, $R(0,t)$ – радиационный баланс у поверхности почвы; $R_s = R(0,t) + J_{Ts}$ – энергия, поглощенная верхним слоем почвы; S_l, S_k – поверхности листьев и корней на единицу поверхности почвы; $S_l p_l(x), S_k p_k(x)$ – плотность листовой и всасывающей корневой поверхности. $T_a^0, q_a^0, Q(t)$ и T_s^0, ψ_s^0 – заданные функции времени, измеряемые на высоте метеобудки $H_a > H_l$ над покровом и глубине $-H_s$ почвы; остальное – заданные константы. Дифференциальные уравнения систем связаны алгебраическими выражениями (4), (10), описывающими балансы энергии в межлистном воздухе и на поверхности почвы.

Обозначим

$$d_a(x,t) = \rho(T_a) - q_a \ , \ d_s = \rho(T_s) - q_s \ , \ d_a^0 = \rho(T_a^0) - q_a^0(t) \ ; \ \rho(T) = \rho(T_1) + \delta(T - T_1) \ ;$$

$$k(x) = \frac{k_a(x)}{1+\delta\chi/c_p} \ , \ G = \frac{1}{1+c_p/(\delta\chi)} \ , \ G_l = G(1-b_l) \ , \ G_s = G(1-b_s) \ ;$$

$$1/D_{Hk}^{'} = \int_0^{H_l} d\xi/k(\xi) \ , \ D_\Sigma^{'} = D_a^{'} + D_l^{'} + D_a^{'} . \qquad (13)$$

Утверждение 1. Функция $y = d_a(x,t)$ *удовлетворяет интегральному уравнению*

$$y = \overline{d}_a + Y(x,t) - \frac{D_l^{'}}{D_\Sigma^{'}} \int_0^{H_l} Y(\xi,t) p_l d\xi - \frac{D_s^{'}}{D_\Sigma^{'}} Y(0,t) \ , \ \overline{d}_a = \frac{G_l R_l + G_s R_s}{\chi D_\Sigma^{'}} + \frac{D_a^{'} d_a^0 + D_s^{'} d_s}{D_\Sigma^{'}} \ , \qquad (14)$$

$$Y(x,t) = D_l^{'} \int_x^{H_l} \frac{d\xi}{k(\xi)} \int_0^x y(\zeta,t) p_l d\zeta + D_s^{'} \{y(0,t) - d_s\} \int_x^{H_l} \frac{d\xi}{k(\xi)} - \chi^{-1} \int_x^{H_l} \frac{G_l R_{ll} + G_s R_s}{k(\xi)} d\xi \ . \qquad (15)$$

Утверждение 2. Для потоков J_{qa}, J_{Ta} *температур* T_a, T_l, T_s *концентрации паров воды в воздухе* q_a *и дефицита влажности воздуха* $y = d_a$ *справедливы выражения:*

$$J_{qa} = \chi^{-1} G R_a^0 + D_a'(d_a^0 - y) \ , \qquad J_{Ta} = (1-G) R_a^0 - \chi D_a'(d_a^0 - y) \ , \qquad x = H_l \ ; \qquad (16)$$

$$J_{qa}^{'} = \chi^{-1} D_l^{'} \{R_{ll}^{'}/D_T^{'} + \chi p_l y\} \ , \qquad J_{Ta}^{'} = D_l^{'} \{R_{ll}^{'}/D_q^{'} - \chi p_l y\} , \qquad 0 \le x \le H_l \ ;$$

$$J_{qa} = \chi^{-1} D_s^{'} \{R_s/D_{Ts}^{'} + \chi(y - d_s)\} , \qquad J_{Ta} = D_s^{'} \{R_s/D_{qs} - \chi(y - d_s)\} , \qquad x = 0 \ ;$$

$$T_a = T_a^0 + \frac{G}{\delta\chi D_a} \{F + \chi D_a (y - d_a^0)\} \ , \qquad q_a = q_a^0 + \frac{G}{\delta\chi D_a} \{\delta F - D_a (y - d_a^0)\} , \ x = 0 \ ;$$

$$T_l = T_a + \frac{D_l^{'}}{\delta\chi D_T} \left\{ \frac{1}{D_q^{'}} \frac{R_{ll}^{'}}{p_l} - \chi y \right\} \ , \ 0 \le x \le H_l \ ; \ T_s = T_a + \frac{D_s^{'}}{\delta\chi D_{Ts}^{'}} \left\{ \frac{R_s}{D_{qs}} - \chi(y - d_s) \right\} \ , \ x = 0 \ ;$$

где $F(x,t) = R_a^0(t) + \int_x^{H_l} R_a(\xi,t) \frac{D_a^{'}}{k(\xi)} d\xi$, $x > 0$; $R_a(\xi,t)$ – энергия, поглощенная верхним слоем почвы и слоем $(0,\xi)$ растительного покрова. Утверждения 1,2 сводят 2 системы (1)-(4) для переменных T_a, q_a к фундаментальному уравнению (14)-(15) и дают явные выражения для переменных (16) относительно $y(x,t)$ – решения этой системы.

Показано, что при $\beta_k < 1$ к решению $y(x,t)$ равномерно сходится следующая последовательность $y_k(x,t)$, причем справедлива оценка $\left\| y - \bar{d}_a \right\| < 2\bar{d}_a \beta_k / (1-\beta_k)$:

$$y_{k+1}(x,t) = \bar{d}_a + Y_k(x,t) - \frac{D_l^{'}}{D_\Sigma^{'}} \int_0^{H_l} Y_k(\xi,t) p_l d\xi - \frac{D_s^{'}}{D_\Sigma^{'}} Y_k(0,t) \ , \ \beta_k = 2D_\Sigma^{'} / D_{Hk}^{'} \ .$$

Следовательно, при больших $k(x)$ для хорошо вентилируемого покрова $\beta_k \approx 0$ и выражения (16) подстановкой $y = \bar{d}_a$ сводятся к простым алгебраическим выражениям. Последние можно использовать как граничные условия на поверхности почвы для систем (5)-(7). Тогда, решая замкнутые системы (5)-(7), получим с помощью (16) полное описание водно-теплового режима растительного покрова в виде простых алгебраических выражений.

ИКСОДОВЫЙ КЛЕЩ: УСТОЙЧИВОСТЬ ПОПУЛЯЦИИ И ПРОБЛЕМЫ ИЗЪЯТИЯ ИЗ ЭКОСИСТЕМ

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

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

Аннотация: в работе рассмотрены возможные причины высокой устойчивости популяций иксодовых клещей в экосистемах.

В связи с распространением в Евразии заболеваний, переносчиками которых являются иксодовые клещи (таежный и лесной клещи), возникает необходимость полного изъятия его популяций из экосистем. Мероприятия, направленные только на снижение численности клещей, сталкиваются с проблемой высокой устойчивости популяции в целом. На территориях, подвергающихся обработке, иксодовые клещи не исчезают и через некоторое время снова восстанавливают свою численность.

Есть два пути, по которым восстанавливается численность популяции на этих территориях:

1. Несмотря на малые перемещения клеща по территории, его прокормители (от зайца до крупных млекопитающих, в т.ч. сельскохозяйственных животных) способны унести присосавшуюся особь на расстояния порядка километра. Таким образом, можно говорить о явлении заноса на в том числе и обработанные территории.
2. К причинам высокой устойчивости клеща в экосистемах средних широт нужно отнести и особенности его жизненного цикла в этих широтах. В тропической зоне жизненный цикл иксодовых клещей занимает один год, в средних широтах благодаря наличию сезонности (зим), жизненный цикл клещей растянут на три-пять лет. Фактически, в условиях средней полосы каждая стадия развития клеща занимает год. Таким образом, самка, отложив яйца в данном году, вносит свой вклад в численность популяции только через три года. Тогда представляется возможным разделить во времени популяцию клещей на три субпопуляции, каждая из которых в конкретном году представлена особями на разных стадиях метаморфоза. Так, в случае, если особи на той или иной стадии жизненного цикла не удалось найти прокормителя, она перезимовывает и может внести вклад в численность следующей субпопуляции. Это обстоятельство на много порядков увеличивает устойчивость всей популяции клещей в целом.

Таким образом, изъятие популяции клеща представляет собой комплексную проблему.

Возможные варианты изъятия клеща из экосистем по времени достижения первых результатов и длительности их действия можно подразделить на: кратко-, средне- и долгосрочные.

К краткосрочным следует отнести массово применяемые акарицидные препараты (длительность воздействия акарицидных препаратов не более 1,5 месяца, кроме того, эти препараты не являются селективными и оказывают негативное влияние на всю биоту).

К среднесрочным вариантам изъятия клеща можно отнести различные способы снижения численности прокормителей клеща на ранних стадиях его метаморфоза (воздействие может длиться около 1-2-х лет).

И, наконец, к долгосрочным вариантам можно отнести предлагаемый вариант воздействия популяции муравьев на популяции иксодовых клещей (Вшивкова, 2009).

Применение того или иного варианта или их комбинации можно варьировать, в зависимости от того, насколько быстро и как надолго необходимо изъять клеща из конкретной экосистемы.

Литература

Вшивкова О.А. Математическая модель влияния муравьев на численность иксодовых клещей в экосистемах Евразии // Известия Самарского научного центра РАН, 2009.- №7.- С. 1661-166.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАСТБИЩНОЙ НАГРУЗКИ В ЭКОСИСТЕМАХ СТЕПНЫХ ЛУГОВ

Габидуллин Ю.З.[1], Маликов Р.Ф.[2]

Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Уфа, Россия
[1]unir@email.ru [2]rfmalikov@mail.ru

Аннотация: работа посвящена построению модели пастбища, с целью изучения методов восстановления фитоценоза в степных лугах, с помощью регулирования пастбищной нагрузки.

Экономическая эффективность животноводческих и дворовых хозяйств во многом зависит от состояния пастбищ. Однако продуктивность естественных степных пастбищ, являющихся источником дешевого корма, сравнительно ниже дорогостоящих кормовых севооборотов. Установлено, что при оптимальных нагрузках выпас оказывает благоприятное воздействие на степной фитоценоз, способствующее увеличению его видового состава (Юнусбаев, 2002). Регулировать оказываемую нагрузку можно, например, периодическим исключением проблемного участка пастбища из зоны выпаса или ранним стравливанием травостоя.

С целью детального изучения этих процессов разработана модель пастбища с учетом пространственно-временных факторов: рельефа, климата, маршрута выпаса и др. Основой модели является модель вегетационной динамики растений, которая описывает их структурообразование. Упрощенный вид модели вегетационной динамики растений на основе уравнений реакции-диффузии:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_1}{\partial t} = \alpha_1\left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2}\right) + r_1 u_1 (p_1 - u_1^2)/p_1 - k_{12} u_1 u_2^2 - \dots - k_{18} u_1 u_8^2 \\ \dots \\ \frac{\partial u_8}{\partial t} = \alpha_8\left(\frac{\partial^2 u_8}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_8}{\partial y^2}\right) + r_8 u_8 (p_8 - u_8^2)/p_8 - k_{81} u_8 u_1^2 - \dots - k_{87} u_8 u_7^2 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $u_1 \dots u_n$ являются переменными, описывающими концентрацию растений различного вида, составляющие растительный покров пастбища. Остальные величины являются константами, характеризующими их свойства.

Модель расширена переменными по времени факторами средней суточной температуры и среднего суточного размера осадков, физической нагрузки оказываемой скотом и объема употребляемой ими биомассы (коэффициент промысла). Эти величины рассчитываются перед каждой итерацией, исходя из заданного маршрута выпаса, различных параметров растений и скота, а также состояния растительного покрова на предыдущем этапе.

В качестве платформы для реализации нашей модели была создана компьютерная программа «Пастбище». Прикладная программа обеспечивает удобный и корректный ввод и изменение коэффициентов модели, маршрута выпаса и других параметров, позволяет визуализировать модель во времени и выводить динамику различных показателей в виде графиков. Её завершающая апробация намечена на 2011 год.

С помощью ПП «Пастбище» планируется дальнейшее исследование продуктивности естественных пастбищ в зависимости от различных факторов с целью изучения методов восстановления фитоценоза в степных лугах с очень низкой продуктивностью.

Литература

Юнусбаев У.Б. Пастбищная нагрузка и биоразнообразие степей. Материалы международной конференции “Сохранение и воспроизводство растительного компонента биоразнообразия” Ростов-на-Дону 28-30 мая 2002 г.– Ростов н/д.: Изд-во Рост. ун-та. 2002.- С. 163-166.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СУТОЧНОЙ ДИСКРЕТНОСТИ ДЛЯ УСЛОВИЙ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

Гавриловская Н.В., Хворова Л.А.

Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия
hla@math.asu.ru

Аннотация: при решении задачи прогнозирования хода продукционного процесса возникает проблема построения сценария погоды на отрезок времени от даты осуществления прогнозных расчетов до конца периода вегетации. В докладе описывается методика формирования подобных сценариев из погодных реализаций лет-аналогов и генератором погодных данных.

Величина урожая культивируемого сорта при принятой агротехнике в большой степени зависит от складывающихся в сезоне вегетации погодных условий. Поэтому успех в решении задачи прогнозирования урожаев тесно связан с возможностью получения прогнозов будущих погодных условий. В связи с этим для обоснования плановых технологий может быть использована изложенная в докладе *система моделирования погодных сценариев*.

Методы моделирования погодных сценариев

Для решения проблемы разработки погодных сценариев за основу был взят генератор, разработанный в лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического института (г. Санкт-Петербург). В модифицированной версии генератор позволяет работать в двух режимах: моделировать сценарий погоды по данным лет-аналогов и с помощью стохастических (вероятностных) методов.

Моделирование погодных сценариев по данным лет-аналогов. В этом варианте в основу решения задачи прогнозирования положена технология определения лет-аналогов (Гавриловская, Хворова, 2007). Первый этап в технологии определения лет-аналогов состоит в отнесении всей совокупности исходных объектов к определенному классу на основании

исследования системы признаков или показателей, характеризующих эти объекты. Иными словами, из множества Ω всех исследуемых объектов

$$\Omega = \left\{ (X^S, Y) : X = \{x_{ij}\}, Y = \{y_S\}, s = \overline{1,n}; i = \overline{1,l};\ j = \overline{1,m}; x_{ij} \in R,\ y_S \in R \right\}, \quad (1)$$

где $X^S = \{x_{ij}^S\}$ – матрица размера $l \times m$, определенная для каждого s, – совокупность наблюдаемых признаков объекта, влияющих на один признак y_S, сформировать по определенным критериям подмножества $A_k \in \Omega$ – классы сходных между собой объектов – лет-аналогов вида

$$\mathrm{A}_k = \left\{ (X^N, Y_N) : X^N \in X^S, Y_N \in Y, N = \overline{1, a_k}, a_k \le n \right\}, \quad (2)$$

k – количество сформированных классов, обладающих совокупностью факторов, близких между собой по влиянию на результирующий признак y_N, a_k - количество лет-аналогов в соответствующем классе. Задача второго этапа технологии заключается в том, чтобы из всех подмножеств $A_k \in \Omega$ выбрать класс объектов A_{k_0}, который лучше всего соответствует согласно определенным критериям новому элементу $X^{n+1} = \{x_{i_0 j}^{n+1},\ i_0 = \overline{1, l_0};\ j = \overline{1, m},\ l_0 < l\}$; l_0 – номер дня, с которого производится моделирование погодного сценария.

Под объектами классификации понимаются годы, в качестве признаков, характеризующих эти объекты, выступают агрометеорологические факторы. Для оценки влияния погодных условий на формирование урожая требуется на основе исследования совокупности агрометеорологических параметров классифицировать ситуацию в определенный период вегетационного цикла.

Второй метод имеет стохастический (вероятностный) характер. Источником новых погодных реализаций служит т.н. «генератор погоды» (Топаж, 1992).

Обсуждение результатов

Рассмотрим описанные выше методики формирования метеорологических данных применительно к прогнозированию урожайности зерновых культур. Возьмем конкретный год – 2008 с известными погодными условиями и фактическим урожаем. На интервале до даты сева будем рассматривать фактические погодные условия данного года. Для оставшегося периода вегетации будем считать, что погодные условия неизвестны. Построим «веер» возможных реализаций погоды, смоделированных для данного года по годам-аналогам и с помощью генератора погодных реализаций (пять сценариев).

Предварительно проведем классификацию объектов исследования по формуле 1, и сформируем классы лет-аналогов, используя формулу 2. Анализ проведенной классификации позволяет предположить, что для 2008 г. годами-аналогами будут являться 2003 и 2006 гг.

С помощью динамической модели AGROTOOL (Полуэктов и др., 2006), адаптированной к условиям Западной Сибири, были выполнены расчеты по развитию яровой пшеницы и оценена урожайность в зависимости от сгенерированных различных вариантов погодных условий (таблица 1). Как видно из таблицы, меньшую погрешность по суммам накопленных температур дают погодные сценарии, сформированные по годам-аналогам. Осуществим оценку урожайности для 2008 г. по прогнозным оценкам лет-аналогов по формуле:

$$\overline{y} = \sum_{l=1}^{L} \sum_{k=1}^{a} p_l \cdot y_k ,$$

где p_l - вероятности отнесения урожайности к одной из категорий (например, низкая–высокая, низкая–средняя–высокая или другим образом сформированным категориям). Для

случая двух категорий: $p_1 = 0,49$, $p_2 = 0,51$, $\overline{y} = 18,7$ (ц/га). Разброс значений урожайности по погодным сценариям случайных реализаций составляет от 3,25 до 27,6 ц/га.

Анализ результатов применения данной технологии показал хорошее совпадение фактической урожайности с расчетной по погодным сценариям лет-аналогов. Это говорит о том, что смоделированные погодные сценарии могут успешно применяться для текущего планирования и перспективного прогнозирования урожайности яровой пшеницы на территории Алтайского края.

Таблица 1. Результаты расчетов

Урожайность	2008	Годы-аналоги		Погодные сценарии				
		2003	2006	1	2	3	4	5
Урожайность, ц/га								
фактическая	18,9	15,4	25,4	-	-	-	-	-
прогноз	19,9	15,4	24,5	22,1	25,7	27,6	16,1	3,25
Накопленная сумма температур по декадам вегетационного периода, °С								
Средняя относительная погрешность, %	-	4,3	5,2	7,8	23,9	15,2	14,7	8,8

Литература

Гавриловская Н.В., Хворова, Л.А. Разработка алгоритма определения года-аналога для оценки урожайности зерновых культур в условиях Алтайского края // Известия АлтГУ.– 2007.– №1.- С. 66–67.

Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур.– СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2006.– 396 с.

Топаж А.Г. Моделирование суточных метеоданных как входного сигнала модели продукционного процесса // Почва и растение – процессы и модели: сб. науч. тр. СПб., 1992.– С. 79–86.

ДИНАМИКА БИОМАССЫ ВЕТВЕЙ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ ДЕРЕВА[1]

Галицкий В.В.

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

Аннотация: представлена секционная структура и модель динамики биомассы системы ветвей дерева. Идентификация модели по натурным данным (времена жизни ветвей ели) показала необходимость учета начального торможения роста дерева и процедуры замещения регулярных ветвей межмутовочными при изменении условий роста, получено значение аллометрического параметра связи биомассы и высоты дерева μ=1.44.

Модель системы ветвей дерева

В работах (Галицкий, 2006; 2010) была выделена секционная структура дерева. Модель динамики биомассы *i*-секции может быть представлена как разность биомасс[2] смежных *виртуальных* деревьев, вложенных друг в друга

$$^{0}b_i(T - T_i) = B_i(T - T_i) - B_{i+1}(T - T_i - \Delta T)\,. \qquad (1)$$

Структура ветви любого порядка, вообще говоря, также может быть представлена последовательным рядом секций, каждая из которых порождается парой смежных

[1] Работа поддерживалась Российским фондом фундаментальных исследований, грант №06-04-49366.

[2] Биомасса понимается как физиологически активная часть полной массы дерева, часть биомассы является фотосинтезирующей, последняя и фигурирует в приводимых формулах; фитомасса – физиологически пассивная часть полной массы.

виртуальных ветвей того же порядка и состоит из междоузлия и появляющегося через год яруса из *двух* ветвей следующего порядка. Биомассу 1-ветви ели можно представить как

$$^{1}br_i(T-T_i-\Delta T)=(^{0}b_i(T-T_i)-{}^{0}bi_i(T-T))/5, \qquad (2)$$

где $^{0}bi_i$ биомасса междоузлия, ΔT – временной шаг появления секций.

Применяя рассуждения, приводящие к формулам для дерева (Галицкий, 2010), но теперь для биомассы $^{j}b_i$ *k*-секции ветви *j*-го порядка из яруса *i*-секции дерева, получаем

$$^{j}b_i(T-T_i-(j+k)\Delta T)={}^{j}br_i(T-T_i-(j+k)\Delta T)-{}^{j}br_i(T-T_i-(j+k+1)\Delta T), \qquad (3)$$

где в правой части представлена разность биомасс смежных *виртуальных* *k*- и (*k*+1)-ветвей *j*-ветви *i*-секции дерева.

Динамика биомассы $^{j+1}br_i$ ветви, являющейся частью яруса *k*-секции *j*-ветви и соответствующих ветвей *i*-секции дерева порядков от $j-1$ до 1, вычисляется по рекуррентной формуле

$$^{j+1}br_i(T-T_i-(j+k+1)\Delta T)=(^{j}b_i(T-T_i-(j+k)\Delta T)-{}^{j}bi_i(T-T_i-(j+k)\Delta T))/2, \qquad (4)$$

где $^{j}bi_i$ – биомасса *i*-междоузлия, в (1)-(4) все функции равны нулю при аргументах ≤ 0. Динамика биомассы виртуальной 1-ветви и ветвей высших порядков описывается колоколообразной функцией. В результате ветви имеют конечное время жизни и, соответственно, возможный максимальный порядок ветвей невелик (рисунок 1, сплошные). Выражения (1)-(4) имеют физический и биологический смыслы в течение первых интервалов времени, в которых эти выражения и члены в их правых частях положительны.

Рис.1. Динамика биомассы ветвей для данных (Цельникер,1994)

Исходя из результата И.А.Полетаева (1966) в качестве $B_l(x)$ в (1) используется

$$B_i(x)=B_{m,i}\cdot(H_i(x)/H_{m,i})^{\mu}, H_i(x)=H_{m,i}\mathrm{th}(x/A_1). \qquad (5)$$

Параметризация модели

Параметры модели подбирались по натурным данным (Цельникер,1994) минимизацией суммы квадратов разностей времен жизни для всех ветвей. Для этого при описании дерева использовались: 1) имитация начального торможения роста ели в высоту путем замены коэффициента $H_{m,i}$ на $H_{m,i}\mathrm{th}(x/\tau_b)$ в (5) и 2) представление о возникновении и росте (вследствие вариабельности окружающей среды, Kramer, Kozlowski, 1960) межмутовочных ветвей, которые *постепенно замещают* регулярные ветви дерева.

Способность ели к торможению начального роста в течение первых 15 лет и до 70 отмечалась в (Казимиров, 1971).

Регулярные скелетные ветви появляются из регулярных боковых почек, устройство и свойства которых жестко определены при их закладке (Серебрякова и др. 2006) условиями, отражаемыми в величине $B_{m,i}$ в (5). При последующем изменении этих условий соответствующие значения $B_{m,i}$ измениться не могут. Модель (1)-(5) вместе с наличием т.н. “спящих” (и адвентивных) почек реальных деревьев подсказывают возможный способ решения этой проблемы, вероятно, объясняющий также и функцию “межмутовочных” ветвей.

Рис.2. Динамика биомассы ветвей без учета начального торможения и межмутовочной биомассы.

С учетом дополнений результат минимизации невязки с натурными данными приведен на рисунке 1, квадрат невязки < 3. Рисунок 2 показывает динамику ветвей для того же варианта без учета этих двух дополнений: нет 3- и 4-ветвей, время отмирания 1-ветви ≥ 300, невязка ≥ $8 \cdot 10^5$. Получены значения параметров модели: μ=1.44, интервал начального торможения ≈30 лет, ступенька изменения значения $B_{m,0}$ для инициации межмутовочной ветви ≈0.7%, задержка появления межмутовочной ветви для 0-секции дерева ≈7лет.

Литература

Галицкий В.В О динамике распределения по высоте биомассы свободно растущего дерева. Модельный анализ // ДАН.- 2006.- Т. 407. № 4.– С. 564-566.

Галицкий В.В. Секционная структура дерева. Модельный анализ вертикального распределения биомассы // Журнал общей биологии.- 2010. - Т.71, № 1. - С.19-29.

Казимиров Н.И. Ельники Карелии. 1971.- Л.: Наука.- 139 с.

Полетаев И.А., О математических моделях биогеоценотических процессов // Проблемы кибернетики.- 1966.- Вып. 16. М.: Наука.- С. 171–190.

Серебрякова Т.И. и др. Ботаника с основами фитоценологии: Анатомия и морфология растений.- М.: Академкнига.- 543 с.

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

Kramer P.J., Kozlowski T.T. Physiology of trees. 1960.- NY.: McGraw-Hill.- 642 p.

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.

ПОДХОДЫ К ИДЕНТИФИКАЦИИ ГАЗООБМЕНА НА ГРАНИЦЕ ЭКОСИСТЕМА/АТМОСФЕРА: МЕТОД ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

Глаголев М.В., Сабреков А.Ф.

Московский государственный университет, Москва, Россия
m_glagolev@mail.ru

Аннотация: рассматривается метод решения обратной задачи для идентификации потока CH_4 с подстилающей поверхности в атмосферу. В качестве конкретного примера реализован оптимизационный алгоритм для одномерного уравнения турбулентной диффузии. На олиготрофных мочажинах типичного болота средней тайги Западной Сибири («Мухрино» близ г. Ханты-Мансийск) в конце лета получены значение эмиссии в диапазоне 2.1-3.1 мгС·м$^{-2}$·ч$^{-1}$.

Введение

Газообмен на границе экосистема/атмосфера играет в экологии чрезвычайно важную роль. Например, Карелин и Замолодчиков (2008) указывают, что с биологическим круговоротом углерода почти полностью отождествляются такие термины и понятия, как GPP, NPP, Валовое Дыхание, NEP – все они основаны на измерении потоков CO_2. В связи с глобальным потеплением климата Земли ведется детальное изучение источников эмиссии газов, приводящих к парниковому эффекту (Бородулин с соавт., 1997).

Традиционно с целью количественной оценки потоков газов использовался метод статических камер. Однако он не позволяет непосредственно измерить поток из экосистем, превышающих объем максимально больших камер (т.е. ~10 м^3). В связи с этим к настоящему времени получили развитие «распределенные» методы, общая идея которых состоит в том, что величину удельного потока (далее УП) газа из экосистемы можно определить по атмосферным измерениям концентрации этого газа. Различные варианты распределенных методов представляют собой те или иные приближения общего «метода обратной задачи», применявшегося для болотных экосистем, например, в (Бородулин с соавт., 1997).

Метод «обратной задачи»

В достаточно общем виде распространение примеси в атмосфере может быть представлено как решение при начальных и граничных условиях дифференциального уравнения

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial c}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial c}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x}\left((k_x + D) \cdot \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left((k_y + D) \cdot \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left((k_z + D) \cdot \frac{\partial c}{\partial z}\right), \quad (1)$$

Здесь c – математическое ожидание концентрации газа; u, v, w – средние значения компонентов скорости ветра, соответственно, вдоль горизонтальных осей x, y и вертикальной оси z; k_x, k_y, k_z – соответствующие коэффициенты турбулентной диффузии; D – коэффициент молекулярной диффузии (Бородулин с соавт., 1997) примеси; t – время.

Рассматривается некоторая область атмосферы вне изучаемой экосистемы, но граничащая с ней. На этой границе задается условие 2-го рода, содержащее величину УП q (примеси через границу). На других границах области ставятся соответствующие конкретной ситуации условия, обеспечивающие существование и единственность прямой задачи для (1).

Пусть концентрации газа C_i измерены в каких-либо точках с координатами (x_i, y_i, z_i). Можно поставить и решить обратную задачу: найти такое численное значение q, при котором экспериментально измеренные концентрации C_i наиболее близки концентрациям $c(x_i, y_i, z_i)$, полученным при решении прямой задачи для уравнения (1) при данном q.

Пример: идентификация эмиссии CH_4 из олиготрофного болота (объект и методы)

Исследования проводились на олиготрофном участке болота «Мухрино»: 60.9° с.ш., 68.7° в.д. Описание болота дано в (Bleuten and Filippov, 2008). Для измерения скорости ветра использовался чашечный анемометр МС-13. Температура измерялась с помощью датчиков «Thermochron iButton» DS1921Z-F5 (DALLAS Semiconductor, США). Концентрация газа в пробах измерялась на хроматографе «Кристалл-5000» («Хроматэк», Россия), оснащённом пламенно-ионизационным детектором. Для определения коэффициента диффузии метана в атмосфере использовалась модель, изложенная в (Берлянд, 1985). Кроме того, предполагалось, что болото горизонтально однородно и орографически, и как источник CH_4, а также достаточно велико, чтобы в уравнении (1) можно было принять нулевыми все члены, кроме $\partial c/\partial t$ и $\partial[(k_z + D)\cdot \partial c/\partial z]/\partial z$. На верхней границе задаётся условие 1-го рода – экспериментально измеренная концентрация CH_4 на высоте 6 м. Также для сравнения измерение УП проводилось методом статических камер.

Результаты и обсуждение

Соответствие наблюдаемой и расчетной концентрации CH_4 над болотом представлено на рис. 1 вместе с найденными значениями УП CH_4, для которых было получено наилучшее соответствие. Широкий разброс значений концентрации, рассчитанных по модели, обусловлен погрешностями измерения скорости ветра, приводившими к существенной неопределённости в значениях коэффициента диффузии.

Рисунок 1. Концентрация CH_4 над болотом Мухрино 10-11.08 (слева) и 1-2.09 (справа). “O” – данные измерений (радиус окружности равен погрешности измерения концентрации CH_4); “–” – расчет по модели турбулентного переноса; “- -” – оценки точности расчёта

Из получившихся значений УП CH_4 представляется, что к началу сентября произошло его увеличение. Однако это может быть как действительным увеличением УП, связанным с наблюдавшимся подъёмом уровня болотных вод во второй половине августа или/и снижением активности метанотрофов к концу августа вследствие понижения температуры в верхнем слое болота, так и кажущимся. В последнем случае причина может заключаться и в том, что в период 10-11 августа ветер дул с той части болота, где распространены микроландшафты с относительно низким значением УП CH_4 (т.н. «гряды»), а 1-2 сентября – со стороны более активно выделяющих метан крупных олиготрофных мочажин. В общем же следует сказать, что величины УП, полученные из решения обратной задачи, в среднем соответствовали величинам, которые дал для мочажин классический камерный метод (медиана равна 2.6 мгС-CH_4·м$^{-2}$·час$^{-1}$).

Литература

Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы.- Л.: Гидрометеоиздат, 1985.- 290 с.

Бородулин А.И. и др. // Метеорология и гидрология.- 1997.- №1.- С. 66-74.
Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах.- М.: Наука, 2008.- 344 с.
Bleuten W., Filippov I. Динамика окружающий среды и глобальные изменения климата: Сб. научных трудов кафедры ЮНЕСКО ЮГУ.- Новосибирск: Новосиб. гос. Ун-т, 2008.- Вып. 1.– С. 208-224.

МЕТОД ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А.

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

Аннотация: в работе представлен метод оценки пространственной изменчивости биологической продуктивности болотных экосистем с учетом структуры растительного покрова, основанный на натурных измерениях продукции и геоботанических описаниях болотных фитоценозов.

Болотные экосистемы играют важную экологическую роль в биосфере, являясь источниками и стоками парниковых газов. Болотные экосистемы являются единственными наземными экосистемами, способными на длительное время (до нескольких тысяч лет) изымать углерод из атмосферы, депонируя его в виде торфяных залежей. В основном, в настоящее время ненарушенные болотные экосистемы служат стоком углерода из атмосферы, о чем свидетельствуют многочисленные оценки. Чистая первичная продукция (NPP) является показателем накопления углерода, ассимилированного растениями из атмосферы в процессе фотосинтеза. Основной трудностью при изучении NPP является значительная трудоемкость при определении ее текущего значения для различных экосистем.

Цель работы заключалась в оценке чистой первичной продукции болотных экосистем на ключевом участке «Бакчарский», расположенном в южно-таежной подзоне Западной Сибири, на основании натурных измерений и карты растительного покрова, составленной по данным маршрутных исследований и спутникового зондирования.

Натурные исследования биологической продуктивности проводились на болотном стационаре «Васюганье» ИМКЭС СО РАН, который располагается в северо-восточной части Большого Васюганского болота (БВБ) в окрестности дер. Полынянка Бакчарского района, Томской области. Базовая площадка стационара охватывает пункты наблюдений в нескольких типах олиготрофных болотных комплексов: сосново-кустарничково-сфагновые фитоценозы (высокий и низкий рямы), открытая осоково-сфагновая топь, грядово-мочажинный комплекс (ГМК) (гряда и мочажина), а так же пункты наблюдений в эвтрофном болотном биогеоценозе (болото «Самара»): ерниково-осоковый, осоково-ерниковый фитоценозы и сосново-елово-кедрово-березовый фитоценоз – согра. Биологическая продуктивность болотной растительности определялась укосным методом.

На основании анализа космических снимков LANDSAT и полевых исследований проведено картирование растительности ключевого участка «Бакчарский». При дешифрировании снимка использовалось разделение территории на крупные области (водораздельные, террасные и незаболоченные области) и последующая их классификация с обучением. Космические снимки, сделанные в летнее время, использовались для анализа структуры растительного покрова. Зимние снимки были использованы для выявления проективного покрытия и высоты древесного яруса. Территория ключевого участка охватывает Бакчарское болото, эвтрофные болота на приречных террасах рек Бакчар, Икса и Галка, а так же части водораздельных олиготрофных болот в юго-западной части ключевого участка. Общая площадь ключевого участка составляет 586 тыс. га, из них 167 тыс. га (или

28% от общей площади) занято олиготрофными, а 43 тыс. га (7%) – эвтрофными болотами. Общая заболоченность территории составляет 36%.

Чистая первичная продукция определялась как сумма надземной продукции трав (ANP_h), кустарничков (ANP_s), мхов (ANP_m) и подземной продукции (корней трав и кустарничков - $BNP_{(h+s)}$):

$$NPP= ANP_h+ANP_s+ANP_m+BNP_{(h+s)}$$

Натурные наблюдения за NPP в некоторых экосистемах ключевого участка были интерполированы на все типы экосистем, выделенные на территории ключевого участка. Модельные оценки продуктивности проведены с учетом структуры растительного покрова мохового, травяного и кустарничкового ярусов и микрорельефа.

Для каждого исследуемого фитоценоза была рассчитана доля трав, кустарничков, мхов и корней в продукции, которая зависит от видового состава и проективного покрытия кустарничкового, травяного и мохового яруса. Полученные данные позволяют рассчитать NPP для других фитоценозов, сходных по видовому составу с исследуемыми, но имеющих разное проективное покрытие. Расчет продукции трав, кустарничков и мхов проводился по формуле: расчеты выглядит следующим образом:

$$ANP_y = ANP_x*f_y/f_x,$$

Где ANP_x - надземная продукция трав, кустарничков или мхов, измеренная на пункте наблюдений; ANP_y –надземная продукция трав, кустарничков или мхов рассчитанная для фитоценоза сходного с пунктом наблюдений, но имеющего другое проективное покрытие трав, кустарничков или мхов (f_y); f_x – проективное покрытие трав, кустарничков или мхов на пункте наблюдений.

Так как разделение продукции корней на продукцию корней трав и кустарничков не проводилось, то предполагаем, что продукция корней пропорциональна суммарному проективному покрытию трав и кустарничков:

$$BNP_{(h+s)y}= BNP_{(h+s)x}*f_{(h+s)y} / f_{(h+s)x},$$

Где $BNP_{(h+s)x}$ - суммарная продукция корней трав и кустарничков измеренная на пункте наблюдений; $BNP_{(h+s)y}$ – суммарная продукция корней трав и кустарничков рассчитанная для фитоценоза сходного с пунктом наблюдений, но имеющего другое суммарное проективное покрытие трав и кустарничков $f_{(h+s)y}$; $f_{(h+s)x}$ – проективное покрытие трав, кустарничков или мхов на пункте наблюдений.

При расчете продуктивности грядово-мочажинных комплексов (NPP_{rhc}) необходимо учитывать соотношение гряд (r) и мочажин (ho), так как ГМК по этому показателю разделяются на мелко- , средне- и крупномочажинные комплексы. В крупномочажинных комплексах на долю гряд приходится около 20%, среднемочажинных - 50% и в мелкомочажинных - 80%.

$$NPP_{rhc}= NPP_r*R+NPP_{ho}*H$$

Где NPP_r и NPP_{ho} - продукция гряд и мочажин, соответственно; R и H – доля гряд и мочажин. NPP_r и NPP_{ho} рассчитывается также как и для остальных фитоценозов.

На основании этих формул с учетом данных по NPP для основных фитоценозов олиготрофного и эвтрофного болот и геоботанических описаний, проведенных в ходе маршрутных исследований ключевого участка, был выполнен расчет NPP для других классов, выявленных при классификации болотных экосистем с учетом проективного

покрытия трав, кустарничков и мхов. Затем с учетом полученных данных и классификации растительности была построена карта продуктивности ключевого участка.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СООБЩЕСТВА МЕТОДОМ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Голубев С.Н.

Русское ботаническое общество, Санкт-Петербург, Россия
Schwejk-rpnt@rambler.ru

Аннотация: на примере созданной программы «Коммуника» рассмотрены возможности и преимущества применения клеточных автоматов для моделирования динамики растительных сообществ.

Клеточный автомат – разновидность дискретной модели, представляющая собой клеточное поле (любой размерности), ячейки которого могут принимать одно из состояний в зависимости от установленных правил («Клеточные..», 2011). Является мощным методом моделирования динамики пространственной структуры растительного сообщества.

Для иллюстрации возможностей метода в фитоценологии, написана программа «Коммуника». Программа позволяет моделировать элементы динамики одновозрастного растительного сообщества (заселение новой территории, рост особей и конкурентная борьба, гибель особей от случайных причин).

Заселение новой территории осуществляется размещением в случайном порядке «семян» - центров развития «особей». Количество семян определяется пользователем. Заселение новой территории происходит каждый раз после того как возраст поколения сравняется с указанной продолжительностью жизни для данного «вида».

Моделируемое растительное сообщество является условно одновозрастным. Развитие «особей» начинается только после того, как завершится заселение новой территории, что можно рассматривать как аналогию естественному зарастанию территории с неэкстремальными условиями – после того как новые особи достигнут соответствующего этапа в развитии – например, достаточной сомкнутости рост новых видов из свежих семян почти прекращается. Первыми начинают расти те «семена», которые раньше выпали.

Рост представляет собой увеличение размеров «особей» во всех направлениях. Скорость роста (прирост) задается пользователем по каждому из пяти интервалов «жизни» (границы интервалов определяет пользователь).

Рост продолжается до того как возраст поколения сравняется с указанной продолжительностью жизни для данного вида. После этого, поколение считается «умершим» и начинается новое заселение территории.

Конкуренция проявляется в том, что две «особи» не могут находиться ближе друг к другу, чем на расстоянии указанном пользователем. Если две «особи» находятся слишком близко друг к другу, одна из них гибнет. Для проверки наличия соседних «особей» используются восемь направлений (С, Ю, З, В, СЗ, СВ, ЮЗ, ЮВ).

Для каждого из пяти интервалов жизни «особи», пользователь может указать вероятность погибнуть в данный интервал. Если случайное число в диапазоне от 0 до 100 оказывается меньше, чем указанная вероятность, то «особь» гибнет. После гибели на её месте могут оставаться другие «особи» (те, которые находились под её пологом). После осветления они растут без увеличения прироста (их можно рассматривать как аналогию «торчкам» дуба).

Модель позволяет оценить будущую сомкнутость растительного сообщества и продолжительность его жизни в зависимости от указанных пользователем параметров.

Клеточные автоматы позволяют моделировать сложные процессы путем задания набора простых правил (Ванаг, 1999). Исходный код программы «Коммуника» вместе с комментариями на языке С++ составляет всего 350 строк. Эффективность клеточных автоматов, существование их естественных аналогов, и современное развитие топологии и неравновесной динамики подтверждает мысль К. Цузе (1969) о том, что природные процессы протекают сходным образом – путем реализации небольшого числа наперед заданных условий («Клеточные..», 2011). Клеточные автоматы не абстрактный метод моделирования, а принцип реализации природных процессов. Помимо этого, клеточные автоматы обладают следующими преимуществами:

Клеточные автоматы в равной степени позволяют отображать конечное состояние в зависимости от начальных условий и начальные условия в зависимости от необходимого конечного состояния.

Существует возможность совмещения разнообразных подходов к моделированию в моделях, основанных на теории клеточных автоматов. В программе «Коммуника» совмещен вероятностный и детерминированный подходы.

Пространство, в котором развиваются особи не обязательно должно быть равномерным – законы, определяющие состояние клеточного автомата может находиться в зависимости от его местоположения.

Обычно, ячейки в клеточном автомате принимают дискретные значения (одно из двух возможных). Но это не исключает возможности построения клеточного автомата, в котором, значения ячеек изменялись бы в непрерывном интервале, что позволит еще больше приблизить модель к реальности.

Литература

Ванаг В.К. Исследование пространственно распределенных динамических систем методами вероятностного клеточного автомата // Успехи физических наук. Том 169. № 5 Май 1999.- С. 481-505.

Клеточные автоматы // Википедия [Электронный ресурс] URL: http://ru.wikipedia.org .

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ПРОСТРАНСТВЕ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЙ

Голубев С.Н.

Русское ботаническое общество, Санкт-Петербург, Россия
Schwejk-rpnt@rambler.ru

Аннотация: эвклидова геометрия не единственная возможная основа для построения экологических моделей. Рассмотрены общие недостатки экологических моделей, построенных на основе геометрии Эвклида. Приведены простые примеры моделей в пространстве неэвклидовой геометрии.

Моделирование пространственных процессов без обоснования выбора пространства неправомерно. Геометрии искривленных пространств отличаются от геометрии Эвклида. Необдуманное применение эвклидовой геометрии в экологическом моделировании может стать причиной больших расхождений модели и реальности. Причины расхождений в том, что пространство и время обладают свойствами фракталов.

Фрактал (лат. fractus – «дробный») множество, для которого размерность Хаусдорфа-Безиковича строго больше топологической размерности (Мандельброт, 2002). Для фракталов характерно возрастание их величины при возрастании точности измерения.

Данные для построения модели изначально ошибочны, если получены путем измерения объектов в разном масштабе. Нельзя, например, сравнивать между собой простую (наблюдаемую в поле) величину проективного покрытия вида на двух пробных площадях, если размер одной пробной площади больше другой. Для сравнения таких разномасштабных данных требуются относительные показатели для каждого из объектов. В приведенном

примере необходимо сравнивать не показатели проективного покрытия, а отношения размеров участков покрытых и непокрытых растительностью на каждой из пробных площадей. Разница между этими методами неочевидна, но становится существенной при возрастании точности и разности масштабов измерений.

Фрактальность времени в известной мне литературе не описана (частично упоминается у В.Г. Буданова, 2010), но её существование следует: во-первых, из идеи четырехмерного пространственно-временного континуума Г. Минковского (Тарасов, 2004). Ее смысл в том, что время не существует само по себе, а является дополнительным измерением пространства, следовательно, должно обладать теми же свойствами, что и остальные измерения (в том числе свойством фрактальности). Во-вторых, время, измеренное с помощью фрактальных объектов пространства, само будет обладать фрактальными свойствами.

Одно и то же событие, измеренное разными единицами измерения (например, годами и секундами) будет различным по времени. Чем точнее измерен временной интервал, тем он больше. Следовательно, недопустимо использовать в экологических моделях на основе геометрии Эвклида временную шкалу, построенную из разномасштабных (которые не могут быть измерены единой единицей измерения с одинаковой точностью) событий.

Фрактальные свойства пространства и времени, на мой взгляд, следствие рассмотрения объектов искривленного пространства через геометрию Эвклида. Модели, описывающие фрактальные объекты в пространстве, искривленном, пропорционально масштабу измерений позволяют сравнивать между собой разномасштабные объекты (проявление фрактальных свойств на фоне неэвклидовых геометрий допускаю – этот вопрос совершенно не изучен). Как образец такой модели, можно рассматривать геохронологическую шкалу Земли (в ее примитивном понимании), построенную не на равномерной числовой (временной) оси, а на оси, отвечающей условию:

$$n - x < (n + a) - (x + a)$$

где n, x, a – любые, произвольно выбранные на числовой оси значения.

Ранние периоды истории Земли на такой шкале, численно не изменяясь, становятся более короткими, поздние периоды удлиняются. Детальный анализ не проводился, но предполагаю возможность искусственности «массовых вымираний» видов, которые вызваны не реальными процессами, а использованием неподходящей шкалы для временной оси. Косвенным подтверждением этой идеи служит работа (Veizer, 1971).

Другим примером экологической модели в искривленном пространстве является модель развития организмов и сообществ организмов во времени. В случае, если особи конкурируют, их развитие описывает уравнение Лотки-Вольтерра (Джефферс, 1981), но аналогичное развитие (быстрый рост вначале и медленный впоследствии) наблюдается не только среди конкурирующих особей, но и среди отдельных организмов и даже неживых систем. Это дает право предположить наличие некоторой фундаментальной закономерности. Модель, построенная на основе такой закономерности, станет обобщающей для широкого класса систем различной природы.

Предположим, что скорость развития систем различной природы всегда постоянна вне зависимости от внешних и внутренних факторов, но изменяется не в пространстве геометрии Эвклида, а в пространстве заданном условием:

$$n - x > (n + a) - (x + a)$$

В этом случае, скорости развития систем оставаясь равномерными и параллельными друг другу, будут соответствовать нашим эмпирическим представлениям об изменении скорости развития организмов.

На сегодняшний день построение экологических моделей в пространстве неэвклидовых геометрий совершенно ново, поэтому кажется излишне сложным. Но, необходимость создания более реалистичных моделей в экологии требует применения

нестандартных подходов. Непонимание возможности и допустимости применения той или иной геометрии – тормоз в развитии экологического моделирования.

Литература

Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы.- М.: «Институт компьютерных исследований», 2002.– 656 с.
Буданов В.Г. Метод ритмокаскадов: о фрактальной природе времени эволюционирующих систем // Доклады Московского международного синергетического форума. [Электронный ресурс] URL: http://www.synergetic.ru.
Тарасаов Л.В. Закономерности окружающего мира. В 3 кн. Кн. 3. Эволюция естественно-научного знания.– М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.– 360 с.
Ján Veizer «Do the Palaeogeographic Data support Expanding Earth Hypothesis?» // Nature [Vol 229] 12 February 1971.- С. 480-481.
Джефферс Дж. Введение в системный анализ: применение в экологии: Пер. с англ. / Перевод Логофета Д. О.; Под ред. и с предисл. Ю.М. Свирежева.– М.: Мир, 1981.– 256 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУГОВОРОТА АЗОТА В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Голубятников Л.Л.[1], Аржанов М.М.[2]

Учреждение Российской академии наук Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия
[1]golub@ifaran.ru [2]arzhanov@ifaran.ru

Аннотация: разработана достаточно простая модель азотного цикла для наземных экосистем с целью последующего ее внедрения в климатическую модель, относящуюся к классу моделей промежуточной сложности. Расчеты показали, что рассматриваемая модель азотного цикла в целом достаточно реалистично воспроизводит значения современных запасов и интенсивностей потоков азота.

Взаимодействие между углеродным и азотным циклами в наземных экосистемах оказывает существенное влияние на изменение пулов этих веществ в растительности, подстилке и органическом веществе почвы. Имитационные эксперименты, проведенные рядом авторов показали, что взаимодействие глобальных циклов углерода и азота оказывает значительное влияние на динамику содержания углерода в атмосфере. С целью исследования влияния круговорота азота на обратную связь между климатом и наземным циклом углерода, в климатическую модель промежуточной сложности Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН планируется внедрить блок азотного цикла. Для решения этой задачи на основе анализа имеющихся моделей глобальных циклов азота и опубликованных количественных данных о процессах трансформации азота была предложена концептуальная схема модели круговорота азота в биосфере и описаны функциональные зависимости основных потоков азота между атмосферой и наземными экосистемами. Атмосфера рассматривается в виде единого хорошо перемешанного резервуара и динамика азотных газообразных соединений в атмосфере исключена из рассмотрения. В наземных экосистемах выделены следующие пулы азота растительности, подстилки, почвенных неорганических соединений и почвенных органических соединений. Азотный пул растительности пополняется за счет биологической фиксации и усвоения растительностью неорганического азота почвы. С отмершей растительной органикой азот поступает в подстилку, которая под воздействием микроорганизмов минерализуется и гумифицируется. В результате этих процессов пополняются азотом его почвенные пулы неорганических и органических соединений соответственно. Процессы минерализации органического вещества почвы, атмосферная фиксация и внесение в почву удобрений пополняют пул неорганических соединений азота. В результате денитрификации азот из пула неорганических соединений почвы поступает в атмосферу. С материковым стоком определенное количество неорганических соединений почвенного азота поступает в поверхностный слой океана.

Антропогенные выбросы азота в атмосферу пополняют его атмосферный пул. Динамика азота в рассматриваемых пулах описывается дифференциальными уравнениями балансового типа. Расчеты показали, что предложенная модель достаточно адекватно воспроизводит азотный цикл в наземных экосистемах и дает удовлетворительные количественные оценки потенциальных глобальных запасов азота в растительном покрове и почве. Из полученных оценок почвенных запасов азота в органической и неорганической формах следует, что более 90% азота в почве содержится в виде органических соединений. Этот модельный результат достаточно хорошо согласуется с оценками, полученными другими исследователями.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН "Физические и химические процессы в атмосфере и криосфере, определяющие изменения климата и окружающей среды" и проекта РФФИ 10-05-00265-а.

МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ РЕЧНОГО БОБРА (CASTOR *FIBER L.*)

Горяйнова З.И. [1], Петросян В.Г. [1], Завьялов Н.А. [2], Панкова Н.Л. [3]

[1] *Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*
ZoyaG@yandex.ru
[2] *Государственный природный заповедник «Рдейский», Холм, Новгородская область, Россия*
zavyalov_n@mail.ru
[3] *ФГУ «Окский государственный природный биосферный заповедник», пос. Брыкин Бор, Рязанская обл., Россия,* e-mail: *n.l.pankova@mail.ru*

Аннотация: представлен комплекс моделей, предназначенных для краткосрочного и долгосрочного прогнозирования динамики численности локальных популяций речного бобра Приокско-Террасного и Окского заповедников. Показана эффективность применения комплекса моделей, включающих дискретные модифицированные классические модели динамики численности, модели анализа временных рядов и теоретическую имитационную модель. Они используются для оценки репродуктивного потенциала, годового воспроизводства и максимально возможной численности изучаемых популяций.

Введение

Работы по реинтродукции бобров в Европейской части России начались еще в 1930-х гг. Места выпуска, количество выпущенных животных, успешность образования новых популяций подробно описаны (Жарков, 1969). К числу заповедников, где популяция бобров имеет долгую историю существования и мониторинга, принадлежит Окский (ОЗ) и Приокско-Террасный(ПТЗ) заповедники. Основание локальных популяций дали 2 пары бобров, выпущенных на территории ПТЗ в 1948-1955 гг. и на территории ОЗ в 1937-1940 гг. Анализу развития бобровых популяции в этих заповедниках и посвящена наша работа.

Основная цель работы – получить модельные оценки долговременного развития локальных бобровых популяций от вселения до наших дней, количественно охарактеризовать современное состояние популяции и дать прогноз возможных дальнейших путей развития этих популяций.

Методика исследований

Для количественного анализа мы использовали три класса моделей. Первый класс моделей включает оценку репродуктивного потенциала популяций, экологической емкости среды обитания, величины годового воспроизводства и интенсивности миграционных потоков на основе модифицированных дискретных моделей Мальтуса, Бивертона-Холта и Рикера: модель Мальтуса - $X_{t+1}=r_0X_t$; модифицированная модель Мальтуса - $X_{t+1}=r_1X_t + m$; модель Бифертона – Холта - $X_{t+1}=r_2X_t /(1+cX_t)$; модель Рикера -$X_{t+1}=r_3X_t$ EXP(-b X_t); где X_{t+1},

X_t – численность особей в моменты времени t и t+1; r_0-параметр, характеризующий процесс годового воспроизводства, включающий миграционный поток; r_1- параметр, характеризующий процесс годового воспроизводства; m- интенсивность условного годового иммиграционного потока; r_2,r_3 - репродуктивный потенциал популяции (среднюю плодовитость в расчете на одну особь); c - интенсивность конкурентных взаимоотношений в популяции; b-пороговое значение развития популяции (т. е. тот порог, начиная с которого популяция начинает снижать численность).

Второй класс моделей – построен на основе аппарата анализа временных рядов. Анализ полученных временных рядов заключался в кратком описании характерных особенностей рядов количества поселений и численности бобров, подборе математических моделей, адекватно описывающих временные ряды, и построении краткосрочного прогноза (Завьялов и др., 2010).

Третий класс моделей, основан на модификации теоретической модели (Gurney, Lawton 1996) динамики численности бобров и их поселений. Эта модель предназначена для построения долгосрочных прогнозов.

Анализ результатов

Оценка параметров бобровых популяций заповедников на основе классических моделей представлена в таблице. Показатели указывают, что существует значительное различие экологической емкости местообитаний сравниваемых заповедников. Средняя численность особей в ПТЗ и ОЗ составляет 32 и 309 особей соответственно. Теме не менее, параметр r_0 годового воспроизводства по модели Мальтуса в ПТЗ незначительно выше по сравнению с ОЗ. Параметр m, характеризующий интенсивность иммиграционных потоков, указывает на то, что количество особей, покидающих старые местообитания составляют 4,32 (в ПТЗ) и 38 (в ОЗ). Параметры, характеризующие репродуктивный потенциал популяций, т. е. средняя плодовитость в расчете на одну особь по модели Бивертона-Хольта и Рикера, в ПТЗ незначительно выше по сравнению с ОЗ. Равновесные численности животных в рамках трех моделей, которые выше среднего значения, говорят о том, что возможно увеличение численности до 74 особей в ПТЗ и 856 особей в ОЗ.

Таблица 1. Оценки параметров классических моделей популяционной динамики локальных популяций речного бобра ОЗ (1937-2010 гг.) и ПТЗ (1949-2010 гг.)

Локальная популяция бобров	Средняя численность	Макс. Численность	Модель Мальтуса				Модель Бивертона-Хольта		Модель Рикера		
			1	2							
			r_0	r_1	m	K*	r_2	K*	r_2	M**	K*
ОЗ	309	583	0,995	0,9	38	377	1,27	408	1,25	856	409
ПТЗ	32	54	1,005	0,89	4,32	40	1,33	41,8	1,3	74	41,9

K* -равновесная численность; M** -максимально возможна численность в рамках модели.

Проведенный анализ на основе временных рядов показал, что наиболее адекватными являются комплексные модели авторегрессии-скользящего среднего ARMA(1,3) (1-указывает порядок авторегрессии, 3 - длина интервала скользящего среднего), описывающие динамику численности популяции ПТЗ и ОЗ. На основе этих моделей прогнозные значения численности животных в 2011-2014 гг. составляют 54 и 430 особей для ПТЗ и ОЗ соответственно. Они согласуются с оценками, полученными с помощью классических моделей.

Теоретическая модель была реализована с учетом следующих предположений. В момент времени t E единиц особей могут использовать суммарное количество местообитаний T=H+V+D, где H - количество потенциальных местообитаний, пригодных для использования, V-количество восстанавливаемых местообитаний, D-деградированные местообитания, которые временно не пригодные для бобров. Используемая система дифференциальных уравнений отражает изменение значений E, V и H во времени с использованием следующих параметров интенсивности изменений местообитаний: r – скорость освоения новых местобитаний, p – скорость перехода из состояния V в H, δ, ρ – скорость деградации и восстановления местообитаний соответственно. Вычислительный эксперимент показал, что для модельных популяций существуют параметры, приводящие к циклическим колебаниям во времени E, V и H.

Исследование поддержано госконтрактом МинОбрнауки № 02.740.11.0867

Литература

Завьялов Н.А., Альбов С.А., Петросян В.Г., Хляп Л.А., Горяйнова З.И. Инвазия средообразователя – речного бобра (*Castor fiber L.*) в бассейне р. Таденки (Приокско-Террасный заповедник) // Российский журнал биологических инвазий.- 2010.- №3.- С. 39-61.

Жарков И.В. Восстановление запасов бобра // В сб.: Труды Воронежского государственного заповедника.- Воронеж: Центрально-черноземное изд-во, 1969.- Вып. XVI.- С. 10–51.

Gurney W.S., Lawton J.H. The population dynamics of ecosystem engineers. OIKOS.- 1996.- № 76.- P. 273-283.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭКОЛОГИИ: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ТИПИЧНЫЕ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Грабарник П.Я.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия
pgrabarnik@rambler.com

Аннотация: в докладе обсуждается задача проверки гипотез о согласии моделей и данных в контексте пространственной статистики. Рассматривается возможность обобщения метода, предложенного Барнадом (Barnard, 1963), на случай критериальных статистик не являющихся скалярными величинами.

Методы Монте Карло находят широкое применение в математической статистике, поскольку часто являются единственно возможной альтернативой для решения практически интересных задач, когда аналитические результаты относительно поведения вероятностных моделей либо не известны, либо их получение сопряжено со значительными трудностями. В такой ситуации исследователь немедленно оказывается тогда, когда не ограничивает себя хорошо изученным классом моделей (например, нормальным распределением), а, отталкиваясь от задачи, выбирает наиболее информативный показатель, выборочные свойства которого, как правило, не известны в аналитической форме. Примерами, где используется такой подход, являются многие задачи математической статистики: выводы, использующие рандомизированные тесты, оценка точности бутстреп-методом, байесовские методы, оценивание параметров с помощью Монте-Карло правдоподобия, доверительное оценивание и задачи проверки параметрических статистических гипотез.

Одним из традиционных потребителей указанных методов является пространственная экология, которая может рассматриваться как раздел популяционной экологии, связанной с изучением экологических процессов, для которых пространственные взаимоотношения между особями играют существенную роль. Интерес экологов к пространственной структуре объясняется попыткой связать экологические процессы и наблюдаемые пространственные паттерны, которые являются результатом взаимодействия индивидуумов в популяции или реакцией на внешние воздействия разнообразных экологических факторов.

Уже самые простые вопросы пространственной экологии ведут к постановкам задач, которые не могут быть удовлетворительно решены в рамках классических биометрических методов. Рассмотрим, например, задачу диагностики размещения растений по территории. Типичные процедуры анализа точечных паттернов (или конфигураций точек) основаны на оценках так называемых мер второго порядка, или, используя популярное название, Рипли К-функции. Для некоторых моделей точечных конфигураций удается вычислить теоретическое значение среднего этой величины (Diggle, 1983), однако уже ошибка (или дисперсия) для К-функции не имеют точного выражения даже для простейшего случая пуассоновского точечного процесса. Задачи подобного рода стимулировали развитие специального раздела теории вероятностей, стохастической геометрии, которая занимается изучением свойств различных случайных пространственных структур.

Привлекательной стороной методов, основанных на статистическом моделировании (Monte Carlo simulation) или рандомизации выборочных данных, является принципиальная возможность их программной реализации. Таким образом, статистические методы, которые могут быть использованы для сложных, не описанных в классических учебниках ситуаций, становятся доступны широкому кругу исследователей. Одной из типичных задач, с которыми сталкивается исследователь на практике, является проверка гипотез о параметрах распределения или о согласии моделей и данных (Besag and Diggle, 1977). Как правило, в таких ситуациях используются критерии значимости, так как альтернативная гипотеза не может быть точно специфицирована.

Интуитивно, построение критерия значимости с помощью метода Монте-Карло не вызывает трудностей. Необходимо многократно сгенерировать модель (или выборку), соответствующую нулевому распределению и оценить границу критической области. Сравнение наблюдаемой статистики и оценки критического значения ведет к «принятию» или отклонению нулевой гипотезы. Понятно, что описанный метод не гарантирует, что тест имеет фиксированный размер (скажем, 5%, как в классической ситуации). Несколько иной подход был предложен Барнардом (Barnard, 1963). Его предложение заключалось в том, чтобы критическая граница определялась с помощью ранга статистики критерия. Таким образом, для этого теста критическая область является случайным множеством, т.е. она может меняться от выборки к выборке, в то время как ошибка первого рода (ошибочно отклонить нулевую гипотезу) в точности равна предписанной величине (уровню значимости). Как было впоследствии замечено (Diggle, 1983), число необходимых реализаций нулевой модели, соответствующей проверяемой гипотезы, не должно быть большим, так как потеря мощности из-за «неточности» критерия, использующего Монте-Карло оценки нулевого распределения, быстро становятся пренебрежимо малы.

Интересно, что в контексте задач пространственной статистики, приобрел популярность вариант теста Барнарда, так называемый метод огибающих (simulation envelope test), который в отличие от скалярной статистики критерия для теста Барнарда использует функциональную статистику, например, К-функцию Рипли. Практика применения метода огибающих состоит в том, чтобы построить критерий для каждого значения аргумента функциональной статистики так же, как в тесте Барнарда. Тогда критические значения (ранги скалярных статистик) образуют две огибающие, нижнюю и верхнюю (в случае двухстороннего теста). Нулевая гипотеза отвергается, если статистика, вычисленная для наблюдений (например, закартированного размещения растений по территории), не будет полностью лежать между нижней и верхней огибающими.

В статистической литературе, чтобы подчеркнуть, что выбранный уровень значимости относится к индивидуальным тестам, отвечающим фиксированным значениям аргумента, тест, использующий огибающие, называется поточечным (pointwise). Однако, вероятность ошибки первого рода может быть неприемлемо большой (40-70%), если интерес представляет поведение функции (статистики критерия) на интервале изменения аргумента.

Эта ситуация хорошо известна в случае задач множественных сравнений или тестирования большого числа гипотез одновременно (Westfall and Young, 1993).

В данной работе мы показываем, что популярный тест огибающих может быть исправлен так, чтобы глобальный тест имел вероятность ошибки первого рода, соответствующую выбранному уровню значимости. В отличие от работы Лусмора и Форда (Loosmore and Ford, 2006), в которой авторы предостерегали использовать метод огибающих для статистических выводов из-за необоснованно частой отбраковки нулевой гипотезы, мы рекомендуем не исключать этот метод из набора средств для проверки статистических гипотез, где критериальная статистика представлена функцией, а не скалярной величиной.

Литература

Barnard, G.A. Discussion of paper by M.S. Bartlett // J. R. Stat. Soc. -1993.- B25.- 294 p.
Besag, J., Diggle. P.J. Simple Monte Carlo tests for spatial pattern // Appl. Stat.- 1977.- V. 26.- P. 327–333.
Diggle, P. J. Statistical Analysis of Spatial Point Patterns. London:Academic Press.- 1983.- 148p.
Loosmoore, N.B., Ford E.D. Statistical inference using the G or K point pattern spatial tatistics // Ecology.- 2006.- V.87.- P. 1925–1931.
Westfall P.H., Young S. S. Resampling-Based Multiple Testing: Examples and Methods for P-Value Adjustment. New York: Wiley & Sons.- 1993.- 360 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОДНОЙ ЭРОЗИИ ПОЧВ ЮЖНОГО ПРИУРАЛЬЯ

Давлетшина М.Р.

Башкирский государственный аграрный университет
davletshina@yandex.ru

Аннотация: в работе анализируются модели процессов эрозии, исследуются зависимости интенсивности эрозионных процессов от различных природно-климатических факторов. Эксперименты проводились на стоковых площадках и на малом водосборе потяжины с малыми уклонами. Построены уравнения линейной и множественной регрессии, определены коэффициенты корреляции. Полученные уравнения позволяют оценить степень влияния разных факторов на процессы водной эрозии.

Вопросы эрозии почв носят междисциплинарный характер. Для их эффективного решения необходимо использование физико-математического моделирования, учитывающее все основные факторы эрозии. Это позволит проводить компьютерный эксперимент для оценки и прогноза последствий эрозионных процессов, разрабатывать мероприятия по защите почв.

Эрозия почв представляет собой естественный и постоянный процесс, и в ненарушенных экосистемах, происходящие разрушения обычно восстанавливаются. Однако если равновесие между почвой и растительностью нарушено, что нередко происходит под влиянием деятельности человека, то эрозия усиливается и зачастую приводит к необратимым последствиям. Скорость эрозии превышает скорость естественного формирования и восстановления почвы. Южное Предуралье – регион активного проявления водной и ветровой эрозии почв. Площадь эродированных сельскохозяйственных угодий в Республике Башкортостан составляет 4,7 млн. га или 64% угодий всех категорий земель, еще 1,4 млн. га являются эрозионно-опасными. Эрозия почв вызывается, как известно, совокупным влиянием многих природных и антропогенных факторов. Территория Южного Предуралья характеризуется большой расчлененностью рельефа, разностью высот (от 50 до 1692 м.), высокой распаханностью земель, а также глубоким промерзанием почвы к началу снеготаяния. Кроме того, почти 75% всех угодий расположено на склонах различной крутизны (Гарифулин,1984). Водной эрозии, подвержено 3,4 млн. га сельхозугодий. Особенно она проявляется на пашне - 2,6 млн. га, что составляет 55% всех пахотных земель

республики. В среднем по региону потенциально возможный смыв почвы составляет 9,6 т/га в год или 45,5 млн. т мелкозема со всей площади пашни (Хазиев и др., 1997). Смыв весенними талыми водами с зяби на склоновых землях на серых лесных почвах составляет от 11 до 121 т/га, на черноземах выщелоченных - до 88 т/га, типичных – до 134 т/га, карбонатных – до 388 т/га (Гареев, 2010). Поэтому для Республики Башкортостан стали актуальными вопросы оценки стока, определения количественных критериев по ограничению смыва почвенной массы.

Для описания процессов эрозии используются логико-математические модели. Математическое моделирование формализует процедуру описания природных механизмов, что облегчает решение сложных экологических вопросов с множеством переменных и взаимозависимых величин. На водосборах в период снеготаяния происходит несколько процессов, в том числе:

- формирование поверхностного потока талой воды;
- формирование ручейковой сети;
- перенос мелкозема ручейковыми потоками.

Аналогичные процессы наблюдаются при дождевой и ирригационной эрозии. Вопрос моделирования процесса водной эрозии почв тесно связан с задачами переноса вещества (Керженцев А.С., 2006). Для расчета ручейковой эрозии используются эмпирические модели серии USLE.

$$A=R*k*L*S*C*p,$$

где A – потери почвы, R – эрозионный индекс осадков, к – коэффициент размываемости (т/га), S – уклон, C - коэффициент землепользования, L – коэффициент длины, P – коэффициент противоэрозионных мероприятий.

Целью данной работы является определение количества смываемого мелкозема с талыми водами и ливнями на водосборах с малыми уклонами, используя математическое описание процессов формирования стока и выноса мелкозема. В соответствии с этим решались задачи по измерению параметров, формирующих сток, их количественное описание методами математического моделирования, изучение развития эрозионных процессов.

Объекты и методы исследований**.** Исследования проводились на основе экспериментальных данных 2000 - 2010 гг. на водосборах естественных потяжин с небольшими уклонами, расположенных на территории, прилегающей к водно-балансовой станции (ВБС). Определялись такие показатели как среднесуточная температура, высота снежного покрова, запасы воды в снеге, интенсивность дождя, глубина промерзания почвы, влажность почвы, расход талых вод и другие параметры.

Статистический анализ основных параметров стока проводился с использованием методов многофакторного статистического анализа, корреляционного анализа, множественной регрессии на базе встроенного пакета анализа в Ms Excel и прикладного пакета STATISTIKA.

Результаты исследований. Для оценки смыва почвы талыми водами и ливнями построены математические модели. Используя статистические методы и информационные технологии, определены зависимости выноса почвы от различных факторов, в том числе зависимости расхода воды от глубины оттаивания почвы, интенсивности снеготаяния, среднесуточной температура воздуха. Зависимость расхода воды от вышеперечисленных факторов описывается уравнением линейной регрессии:

$$Q= 0,6-0,06h+0,07p+0,12t$$

где Q– расход воды, л/с, h - глубина оттаивания почвы, см, p –интенсивность снеготаяния, мм/сут., t– среднесуточная температура, ^{0}С. Полученные уравнения позволяют определить критические значения и поправочные коэффициенты, при которых начинается поверхностный сток. Результаты показали, что на водосборах с малыми уклонами (1-2°) на

распаханном черноземе, выщелоченном, в период снеготаяния с 1 $м^3$ талой воды, выносится 0,25-0,59 кг мелкозема, в то числе 0,021-0,049 кг гумуса. Полученные уравнения регрессии позволяют прогнозировать объём поверхностного и твёрдого стока вызванного снеготаянием и ливнями.

В работе исследуются зависимость интенсивности стока при снеготаянии и вынос мелкозема от различных факторов. Изучаются как влияния отдельных факторов, а также их различные сочетания на смыв почвы. Эксперименты проведены на четырех стоковых площадках и на малом водосборе естественных потяжин. По результатам проведен статистический анализ, построены уравнения линейной регрессии, определены коэффициенты корреляции, множественной регрессии. Полученные статистические модели позволяют оценить степень влияния каждого фактора на процессы водной эрозии, сделать прогнозы на основании метеорологических данных и свойствах почвы.

Литература

Абдрахманов Р.Ф., Батанов Б.Н., Габбасова И.М. и др. Водно-балансовая станция. Уфа: БГАУ, 2002.- 82 с.

Гареев А.М., Хабибуллин И.Л. Естественные и антропогенные факторы активизации развития эрозионных процессов.- Уфа: РИЦ БашГУ, 2010.- 124 с.

Керженцев А.С. и др. Моделирование эрозионных процессов на территории малого водосборного бассейна.- М.: Наука, 2006.- 224 с.

Методы изучения и расчеты водного баланса.- Л.: Гидрометеоиздат.- 1981.- 398 с.

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПОЧВ БАШКОРТОСТАНА

Давлетшина М.Р., Асылбаев И.Г.

Башкирский государственный аграрный университет
davletshina@yandex.ru

Почва представляет собой пространственно-временную функциональную систему, которая динамически изменяется, следовательно, актуальными являются вопросы создания новых и корректировки существующих почвенных карт.

Глобальные закономерности, как правило, выявляются на основе комплексного анализа многолетних наработок сведенных в единую базу данных. В лаборатории почвоведения Института биологии УНЦ и кафедрой почвоведения БГАУ активные исследования ведутся с 60-х годов. В области почвенных исследований накоплен большой объем информации – это материалы экспедиций и лабораторных опытов, результаты исследований многих поколений. В течение этих лет информация накоплена в различных формах, часто в не систематизированном виде в картотеках лаборатории и в публикациях сотрудников. С 1995 года разрабатываются актуальные вопросы биогеоценологии – круговорот и трансформация органического вещества в различных биогеоценозах. Основное внимание уделяется соединениям углерода, азота, содержанию тяжелых металлов.

Применение ГИС-технологий для решения задач по систематизации и обработке данных дает возможность эффективного и оперативного использования, организации упорядоченных информационных потоков. Они сочетают в себе достижения машинной графики и баз данных, обеспечивая оценку и визуализацию пространственно-распределенных данных. Исследования в этом направлении успешно проводятся во многих регионах. Однако, в Республике Башкортостан на сегодняшний день вопросы использования ГИС-технологий в оценке почв недостаточно изучены. Поэтому становится очевидным, что для многосторонней характеристики агроэкологических свойств почвы, ранжирования участков почвенного покрова и осуществления мониторинга почв Республики Башкортостан

необходимо автоматизированное картографирование почвенного покрова на базе геоинформационных технологий.

С этой целью ставятся следующие задачи

- составить карту продуктивности пахотных земель Башкортостана;
- построить многофакторные модели взаимосвязи плодородия почв и продуктивности почв сельскохозяйственного назначения в различных зонах республики;
- оставить крупномасштабные почвенные карты охраняемых территорий Республики Башкортостан;
- имеющиеся почвенные карты РБ необходимо переработать и оцифровать, отредактировать;
- полученный за многолетний период обширнейший и разнообразный объем данных по различным характеристикам почв Башкортостана требует систематизировать и унифицировать.

На первоначальной стадии разработки почвенной геоинформационной системы необходимо провести большую работу по созданию базы данных, в которой интегрируются картографическая, аналитическая, текстовая информация об объекте исследования. Основное назначение БД как главного звена ГИС заключается в обслуживании информационных потребностей пользователя. Создание БД предполагает структуризацию, классификацию информации по уровням иерархии. База данных должна

- содержать строго классифицированные данные без избытка и противоречивости;
- учитывать вновь вносимые изменения данных;
- связывать различные информационные блоки по общим параметрам.

В качестве инструментального средства для создания БД может быть выбрана одна из современных систем управления базами данных (СУБД). С этой целью предлагается провести исследования по созданию единой цифровой базы данных. В целях обобщения и систематизации многолетних данных о почвах Башкортостана собранных лабораторией почвоведения УНЦ РАН и кафедрой почвоведения и общего земледелия БГАУ, предлагается на базе стандартных СУБД создать оболочку для базы данных «Почвы Башкортостана».

Блок ввода данных должен содержат 10-15 позиций ввода, часть которых представляют собой почвенные характеристики, другая часть – сельскохозяйственное использование, и несколько дополнительных.

В целях удобства работы и стандартизации вводимых данных ввод должен осуществляться с помощью выпадающих списков вариантов ввода. Данные списки вариантов автоматически корректируются по мере ввода информации, что позволит оперативно вводить большие объемы информации. В качестве основы можно выбрать региональную классификацию почв, представленную в монографии «Почвы Башкортостана» 2 Т.. Подобная стандартизация предоставит возможность конвертировать БД в любую российскую либо международную классификацию. Дополнительные данные могут содержать такую информацию как место и год закладки разреза, а также ссылка на публикацию, позволят при необходимости в любой момент найти исходные данные. Для каждого разреза необходимо ввести достаточное количество горизонтов. Для каждого горизонта, в свою очередь, должны вводиться соответствующие физико-химические, химические параметры и данные мех состава.

При построении базы данных необходима формализация экспериментального материала: классификация информации, ее структурирование и унифицирование. Классификация материала определяет логическую схему создания файлов по отдельному признаку – территориальному, тематическому, масштабному. Возможно использование БД, составленной в разных форматах: Excel, Access и др. В условиях Республики Башкортостан при создании тематической карты на базе ГИС-технологий большое значение имеет составление тематических электронных слоев рельефа, растительности, гидрологии, содержания органического вещества почвы и др. На первом этапе в хозяйстве создаются

цифровые модели территории (ЦМТ) с привязанными данными и БД для последующего моделирования. В качестве исходных данных необходимо использовать базу данных почв хозяйства с характеристиками агроэкологических свойств. Это позволит моделировать динамику природных экосистем в условиях антропогенных нагрузок (Дитц, Смоленцев, 2002).

Контроль состояния почвы включает комплекс измеряемых параметров и показателей, которые содержатся в БД. В наших исследованиях предполагается конкретная информация БД для отдельных почвенных разрезов в определенный момент времени. В этот блок входят следующие данные:

- определение потерь запасов и содержания гумуса с изменением мощности гумусовых горизонтов в связи с развитием водной эрозии;
- выявление участков с нарушенным балансом основных элементов питания;
- выявление участков почвы, загрязненных тяжелыми металлами;
- контроль за загрязнением почвы нефтепродуктами;
- контроль за водно-физическими свойствами.

В результате проведенных работ создается ГИС для комплексного анализа почвенных ресурсов на базе компьютерного моделирования и прогноза возможных изменений почвы.

Литература

Дитц Л.Ю., Смоленцев Б.А. Геоинформационная система в почвенной картографии.– Новосибирск: Наука, 2002.- 78 с.

Симакова М.С. О компьютерной картографии почв // Почвоведение.– 2002.-№2.- С 133-139.

Шапиро М.Б. Новая методика составления крупномасштабных агроэкологических почвенных карт / Почвоведение.- 2008.- №5.- С 626-628.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ МИКРОБНОЙ ПОПУЛЯЦИИ В РЕЧНОЙ ВОДЕ

Долгоносов Б.М.[1], Корчагин К.А., Мессинева Е.М.

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

Аннотация: рассматривается динамика популяции с учетом флуктуаций среды в виде мультипликативного шума. Совершается переход к статистическому ансамблю и находится плотность распределения численностей микроорганизмов, которая при определенных условиях описывается логнормальным законом. Полученное распределение проверяется с привлечением многолетних временных рядов численностей некоторых групп микроорганизмов в речной воде.

Контроль качества воды в источнике водоснабжения включает регулярный мониторинг численности групп микроорганизмов. Численности микроорганизмов подвержены сезонным изменениям, на которые накладываются нерегулярные флуктуации, перемежаемые апериодическими всплесками переменной амплитуды. Актуален вопрос о вероятности возникновения высокой численности, которая может быть опасна для системы водоснабжения. Для ответа на этот вопрос необходимо проанализировать факторы, определяющие численность микроорганизмов. В условиях быстрого изменения параметров среды отклик микробной популяции описывается уравнением $dN/dt = rN$, где N – численность популяции, r – результирующая скорость прироста численности, равная разности скоростей размножения и отмирания организмов, t – время. Вследствие флуктуаций среды r можно представить в виде $r = k + \sigma\xi(t)$, где k – среднее значение r, $\xi(t)$ – белый шум, σ – интенсивность шума. В результате получаем стохастическое дифференциальное уравнение (СДУ) $dN/dt = kN + \sigma N\xi(t)$, которое описывает случайный

процесс с мультипликативным шумом (так как последний член содержит произведение случайных величин N и ξ).

Попадая в водную среду в начальный момент времени в количестве N_0, микробная популяция затем переносится течением. По мере продвижения боковая приточность поставляет небольшое количество новых микроорганизмов. Этот вклад неявно учитывается в параметрах k и σ. При импульсном источнике полученное выше СДУ характеризует случайную величину с логнормальным распределением

$$f(N) = \frac{1}{N\sqrt{2\pi\sigma^2 kt}} \exp\left(-\frac{[\ln(N/N_0) - kt]^2}{2\sigma^2 kt} \right), \quad F(N) = \Phi(\alpha \ln N - \beta),$$

где f и F – плотность и функция распределения, Φ – стандартное нормальное распределение, $\alpha = (2\sigma^2 kt)^{-1/2}$, $\beta = \alpha(kt + \ln N_0)$.

Полученный теоретический результат применен к описанию статистики микробных популяций в водной среде, среди которых рассмотрены общие и термотолерантные колиформные бактерии, сульфитредуцирующие клостридии, фекальные стрептококки, колифаги, а также суммарный показатель – общее микробное число (Долгоносов и др., 2005; Долгоносов, 2009). В отношении колиформ можно отметить следующее. В водоисточниках допускается численность общих колиформ не более 1000 КОЕ/100 мл (КОЕ – колониеобразующие единицы), а термотолерантных колиформ – не более 100. В москворецкой воде колиформы представлены преимущественно термотолерантными видами. Временной ряд (рисунок 1) показывает, что в летнюю межень колиформные бактерии присутствуют в небольших количествах, обычно от ста до нескольких сот единиц, и лишь в периоды дождевых паводков кратковременно повышаются до 1000 ед. Парадоксально, но в зимний период, несмотря на низкую температуру воды, численность бактерий на один–полтора порядка выше, чем летом.

Рисунок 1. Временной ряд колиформ

Низкая численность летом обусловлена цветением фитопланктона, приводящего к повышению pH (летом обычно pH 8–9, зимой 7.5–8) и выделению в воду метаболитов, что подавляет жизнедеятельность бактериальной флоры. Кроме того, губительно действует солнечная радиация. Зимой эти факторы ослабляются, а популяция возрастает до нескольких тысяч единиц. Наиболее высокие максимумы попадают на периоды обильного таяния снега, особенно весной, в половодье, когда талые воды смывают бактерии с поверхности водосбора. В эти периоды численность колиформ возрастает иногда до 6000 ед., что в 6 раз превышает нормативный предел для водоисточников (1000 ед.). Поскольку в воде Москворецкого водоисточника практически все колиформы термотолерантные, лимит

численности более жесткий – до 100 ед. Но тогда нормативный предел превышен в 60 раз, что говорит о высокой бактериальной загрязненности водоисточника в периоды половодья.

Результаты аппроксимации логнормальным распределением представлены на рисунке 2. Отметим удовлетворительное согласие теоретического распределения с эмпирическими данными в широком интервале значений показателей, охватывающем 1–3 порядка изменения величин. Присутствуют две ветви распределения, соответствующие летнему и зимнему сезонам. Переход между ними происходит при N = 800 ед. Интенсивность σ флуктуаций численности бактерий летом в 2.5 раза выше, чем зимой.

Рисунок 2. Функция распределения колиформ в виде двух логнормальных ветвей

Применение модели к данным по р. Москве показало, что микробное загрязнение водоисточника недопустимо велико, за исключением летних периодов. По общим колиформам нормативный предел превышен в среднем в течение 128 сут в году, по термотолерантным – в течение 318 сут, по колифагам – в течение 314 сут. Максимальная кратность превышения норматива в отдельные периоды (обычно в половодье) достигает: по общим колиформам – 6 раз, по термотолерантным колиформам – 60 раз, по колифагам – 28 раз.

Литература

Долгоносов Б.М., Корчагин К.А., Мессинева Е.М. Модель флуктуаций бактериологических показателей качества речной воды // Водные ресурсы.- 2006.- Т. 33.- № 6.- С. 686-700.

Долгоносов Б.М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов.- М.: Либроком / URSS, 2009.- 440 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТОРФЯНОЙ ПОЧВЫ

Дюкарев Е.А.

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

Аннотация: в работе представлены результаты инструментальных исследований и математического моделировании температурного режима торфяной почвы.

Температура почвы является важным параметром энергообмена между почвой и атмосферой, который часто используется при прогнозировании изменения климата. Суточная и сезонная динамика температуры почвы оказывает влияние на многие

биотические и абиотические процессы, протекающие в почвах, такие как: скорость роста растительности, разложение и минерализация органического вещества, углеродный баланс экосистемы и пр. Тепловой режим торфяных почв существенно отличается от минеральных почв. Торфяная залежь представляет собой сложную органоминеральную систему, обладающую специфическими свойствами: высокой обводненностью и пористостью.

В настоящей работе представлены результаты инструментальных исследований и математического моделировании температурного режима торфяной почвы. Мониторинг температуры выполнялся на олиготрофном сосново-кустарничково-сфагновом биогеоценозе (низком ряме) на территории Бакчарского болотного массива с помощью автоматической станции температурного мониторинга почвогрунтов МОДУЛ-Т производства Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск).

Рисунок 1. Временной ход среднесуточных значений температуры воздуха (Та) и температуры почвы на разных глубинах (Т2, Т5, Т10, Т15, Т25, Т40, Т60, Т80)

Датчики температуры находились на глубинах 2, 5, 10, 15, 25, 40, 60 и 80 см. Измерение температуры торфяной залежи проводилось с 28 июня 2005 г. по 7 сентября 2010 года с периодичностью 1 час (в зимнее время) или 15 минут (в летнее время).

Анализ временного хода температур почвы на разных глубинах (см. рис. 1) показал, что годовой ход температуры почвы в верхних слоях повторяет годовой ход температуры воздуха. Летом поверхность почвы нагревается под воздействием энергии солнца, тепло передается в верхние, а затем и в более глубокие слои. С увеличением глубины наблюдается затухание высокочастотных колебаний температуры. Рыхлые верхние слои мохового очеса из-за своей высокой теплоизолирующей способности существенно снижают амплитуду колебаний температуры в нижележащих слоях торфяной залежи. Кроме того, на глубине 10-20 см располагаются болотные воды, и температура в нижележащих насыщенных водой слоях меняется медленнее. При проникновении тепловой волны вглубь почвы происходит уменьшение амплитуды и фазовый сдвиг волны годового хода температуры.

Для определения теплофизических характеристик торфяной залежи и мохового очеса по данным инструментальных наблюдений использовалась одномерная модель

теплопереноса, учитывающая неоднородное распределение коэффициента температуропроводности по глубине и наличие дополнительных источников/стоков тепа за счет фазовых переходов и инфильтрации дождевой влаги. Численное решение данной модели позволило рассчитать эффективную температуропроводность среды для разных глубин и определить величину потока тепла в грунт, являющимся одним из основных элементов теплового баланса земной поверхности.

ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ НАЗЕМНОЙ БИОТЫ НА НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЬ ОЦЕНОК ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КЛИМАТА И УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА В XXI ВЕКЕ

Елисеев А.В.

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

Аннотация: с использованием байесовой статистики проведён анализ численных экспериментов с климатической моделью ИФА РАН. Получено, что различные варианты калибровки управляющих параметров наземного углеродного цикла модели приводят к статистической неразличимости различных сценариев антропогенного воздействия семейства SRES между собой в терминах потоков углерода из атмосферы в наземные резервуары и запасов углерода в них.

Проведён анализ ансамблевых численных экспериментов с КМ ИФА РАН для XXI века с заданием антропогенного воздействия по сценариям SRES A2, A1B и B1, за исключением площади распространения сельскохозяйственных угодий, изменение которых было предписано в соответствии со сценариями проекта Land Use Harmonization. Различные реализации внутри этих ансамблевых экспериментов были построены изменением модельных параметров наземного углеродного цикла. Ансамблевые численные эксперименты анализировались с использованием байесовой статистики, позволившей исключить влияние нереалистичных членов этих экспериментов на результаты. Получено, что для глобальных величин основных характеристик наземного углеродного цикла использованные между собой сценарии SRES статистически неразличимы между собой, так что в модели в XXI веке чистая первичная продукция наземной растительности увеличивается от 74 ± 1 ПгС/год до 102 ± 13 ПгС/год (рисунок 1), запас углерода в наземной растительности - от 511 ± 8 ПгС до 611 ± 8 ПгС (здесь и далее указаны ансамблевые средние ± стандартные отклонения). Взаимная компенсация изменения запаса углерода в почве в различных регионах приводит к тому, что глобальное изменение запаса углерода в почве в XXI столетии статистически незначимо. Глобальное поглощение CO_2 наземными экосистемами возрастает в первой половине XXI века, а затем уменьшается. Интервал неопределённости этой переменной в середине (конце) XXI столетия составляет от 1.3 ПгС/год до 3.4 ПгС/год (от 0.3 ПгС/год до 3.1 ПгС/год). В большинстве регионов устойчиво по ансамблю в XXI веке проявляется увеличение чистой продукции наземной растительности (особенно вне тропиков) и накопление углерода в этой растительности, а также изменение запаса углерода в почве (с общим накоплением углерода в почве тропиков и субтропиков и регионами как накопления, так и потерь углерода почвы в более высоких широтах). В XXI веке устойчиво по ансамблю CO_2 из атмосферы поглощается лишь наземными экосистемами внетропических широтах Евразии, в первую очередь - сибирской тайгой. Однако существенное различие антропогенных эмиссий между сценариями SRES в XXI веке приводит к статистически значимому между этими сценариями различию поглощения углекислого газа океаном, содержания углекислого газа в атмосфере и изменения температуры атмосферы у поверхности. В частности, в 2071-2100 гг. поток углерода из атмосферы в океан при сценарии SRES A2 (A1B, B1) равен 10.6 ± 0.6 ПгС/год (8.3 ± 0.5 ПгС/год, 5.6 ± 0.3 ПгС/год), концентрация углекислого газа в атмосфере к 2100 г.

достигает значения 773 ± 28 млн-1 (662 ± 24 млн-1, 534 ± 16 млн-1). Среднегодовое потепление в 2071-2100 гг. относительно 1961-1990 гг. при этом составляет 3.19 ± 0.09 K (2.52 ± 0.08 K, 1.84 ± 0.06 K) (см. рисунок 2).

Рисунок 1. Изменение глобальной чистой первичной продуктивности наземных экосистем в ансамблевых численных экспериментах с КМ ИФА РАН; для каждого из сценариев SRES (указанных на рисунке) представлены байесовы средние по ансамблям значения (тонкие чёрные линии) и интервал неопределённости, характеризуемый байесовым внутриансамблевым стандартным отклонением (область, заштрихованная серым цветом)

Рисунок 2. Изменение температуры атмосферы у поверхности при глобальном и годовом осреднении в ансамблевых численных экспериментах с КМ ИФА РАН; жирной чёрной кривой представлены эмпирические данные HadCRUT3v.; обозначения линий и штриховки для модельных результатов идентичны использованным на рисунке 1

Литература

Елисеев А.В. Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учётом неопределённости значений параметров наземной биоты // Изв.РАН. Физика атмосферы и океана.- 2011 – Т. 47.- №2 [в печати].

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА И АЗОТА В БОЛОТНЫХ И ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ БОРЕАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Завалишин Н.Н.

Учреждение Российской академии наук Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Лаборатория математической экологии, Москва, Россия
nickolos@ifaran.ru

Аннотация: по агрегированным схемам построены динамические блоковые модели совместного круговорота углерода и азота в ряде болотных и лесных экосистем бореальной зоны России. На их основе моделируются их возможные трансформации при антропогенных воздействиях и изменениях климата, вероятных для конкретных территорий по сценариям нескольких глобальных климатических моделей.

Трансформации наземных экосистем, порождаемые изменениями климата, отражаются в функционировании их биогеохимических циклов. Массо-балансовые схемы круговоротов органического вещества и азота в смежных экосистемах верхового, переходного болот и елового леса южной тайги в Европейской части России (Базилевич и др., 1986; Alexandrov et al., 1994) послужили источником данных о внутри- и межэкосистемных взаимодействиях, существенных с точки зрения прогнозирования реакции этих экосистем на вероятные климатические изменения и антропогенные воздействия. Полные схемы такого типа сложны для аналитического исследования, чувствительны к выбору потоковых зависимостей и допускают только имитационные эксперименты. Для построения минимальных динамических моделей биогеохимических циклов необходима агрегация статических схем. Она основана на принципе учета биологической формы и функциональной роли различных компонентов биотического круговорота, разделении живого и мертвого органического вещества, наземной и подземной фитомассы, объединении организмов-потребителей живой биомассы и деструкторов мертвой в отдельные блоки независимо от их местообитания. В настоящей работе с целью оценки трансформации болотных и лесных экосистем бореальной зоны России создано несколько вариантов агрегированных схем, каждая из которых отвечает количеству и полноте собранных экспериментальных данных. Для экосистем южной тайги Европейской территории России используется схема с тремя компонентами, включающая живое органическое вещество, мертвое органическое вещество, объединенный блок потребителей и деструкторов (Alexandrov et al., 1994) (рис. 1). Для нескольких типов олиготрофных болот и сосняков таежной зоны Западной Сибири выбрана другая схема, включающая несколько фракций фитомассы (Golovatskaya, Dyukarev, 2009; Ведрова, 1997; Наумов и др., 2007; Наумов, 2009). По этим схемам построены динамические блоковые модели функционирования совместного круговорота углерода и азота в среднегодовом масштабе времени, параметры которых связываются с климатическими характеристиками. Взаимодействие углеродного и азотного циклов основано на двух биохимических закономерностях, ставших основой одной из первых моделей совместного функционирования этих круговоротов (Александров и Логофет, 1985): 1) уменьшение отношения *N*/*C* в живой органике ведет к увеличению опада (азотное голодание растений); 2) увеличение отношения *N/C* в мертвом органическом веществе приводит к повышению скорости его разложения. Функциональная форма потоковых зависимостей выбирается на основе экспертной информации о межблоковых взаимодействиях по азоту и углероду и может быть как линейной донорного или реципиентного типов, так и нелинейной вольтерровского типа или с насыщением (Zavalishin, 2008). Входные и выходные потоки связывают систему с окружающей средой. Любые из потоков могут зависеть от внешних климатических переменных – средней температуры и суммы осадков за вегетационный период и некоторых характеристик водного цикла - суммы

осадков, уровня болотных вод, стока и влагосодержания почвы. Коэффициенты потоков азотного цикла вычисляются с помощью базы данных по биотическому круговороту азота и минеральных элементов в экосистемах мира (Базилевич и Титлянова, 2008). После калибровки коэффициентов модели можно получить совместную динамику обоих круговоротов как выражение реакции экосистемы на климатические изменения (среднегодовой температуры, суммы осадков, содержания CO_2 в атмосфере) и антропогенные воздействия (осушение болот, торфоразработки).

Стационарные состояния моделей соответствуют лесному, лесо-топяному и топяному состояниям каждого из типов болот. Сочетание аналитических и численных методов теории бифуркаций позволяют найти границы устойчивости равновесий системы в пространстве параметров, отвечающих за интенсивность поглощения углерода из атмосферы, скорость торфообразования, интенсивность разложения мертвого органического вещества подстилки. Перемещение через границы устойчивости соответствует переходу экосистемы в другое стационарное состояние или к колебательному режиму в зависимости от типа границы. Для моделирования последствий изменения климата используются набор сценариев двух климатических моделей (MPIM-ECHAM5, UKMO-HADGEM1), результаты которых включены в 4-й отчет МГЭИК (2007), характеризующихся удвоением содержания CO_2 в атмосфере со скоростью 1% в год и постоянным уровнем после удвоения до 2100 г. На локальном уровне в Европейской части России такие сценарии приводят к переходу олиготрофных болот в мезотрофные состояния, эвтрофикации мезотрофных, сопровождающейся разрастанием ельников. В средней тайге Западной Сибири часть олиготрофных болот может перейти в категорию сосняков, а болота переходного и низинного типов на этой территории имеют тенденцию переходить в топяное (безлесное) состояние. Рост среднегодовой температуры на Европейской территории России и повышение атмосферного содержания CO_2 способствует наступлению ельников на болота, хотя более детальный учет водного цикла может внести в эту картину существенные поправки из-за возможного процесса усыхания ели в случае недостаточной годовой суммы осадков. Согласно результатам моделирования, в Западно-Сибирской южной тайге процессы будут протекать более противоречиво: возможно как превращение рямов (верховых болот, облесенных сосной) в сосняки, так и переход их в категорию травяных топей. Антропогенные воздействия в виде пожаров и торфоразработок вносят коррективы в траектории эволюции рассматриваемых типов леса и болот.

Рисунок 1. Агрегированная трехкомпонентная модель биотического круговорота углерода и азота в экосистемах болот и лесов южной тайги (Alexandrov et al., 1994).

Обозначения: C_i, N_i - запасы углерода (гC/м^2), азота (гN/м^2) в растительности, деструкторах, опаде и подстилке. Потоки (гC/м^{2}год для углерода, гN/м^{2}год для азота): q_1^C , q_1^N – ассимиляция C и N из атмосферы, q_3^C – привнос углерода из соседних экосистем (отсутствует в олиготрофном случае), q_2^N – фиксация атмосферного азота микроорганизмами, q_3^N – привнос азота с поверхностными водами (отсутствует в олиготрофном случае), y_1^C, y_2^C – дыхание и потребление фитофагами из других

экосистем, y_2^N – денитрификация, y_3^C – торфообразование, вынос углерода со стоком, абиотическое окисление мертвой органики, y_3^N – вынос азота в другие экосистемы и торфообразование, ,f_{12}^C, f_{12}^N– потребление растительности фитофагами, f_{13}^C, f_{13}^N – опад, f_{23}^C – отмирание животных и микроорганизмов, f_{23}^N – переход азота в подвижную форму при разложении мертвой органики, f_{32}^C – разложение мертвой органики деструкторами, f_{32}^N – потребление азота потребителями и деструкторами.

Работа поддержана Программой № 11 Отделения наук о Земле РАН и проектом 10-05-00265а РФФИ.

Литература

Alexandrov G.A., Bazilevich N.I., Logofet D.O., Tishkov A.A., Shytikova T.E., 1994, Conceptual and mathematical modelling of matter cycling in Tajozhny Log bog ecosystem. In: B.C.Patten et al. (eds.), Wetlands and Shallow Continental Water Bodies, SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands, vol. 2.- P. 45-93.

Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A., Carbon budget of oligotrophic mire sites in the southern taiga of Western Siberia. // *Plant and Soil*, 2009, v. 315, #1-2.- P. 19-34.

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

Александров Г.А., Логофет Д.О., Динамическая модель совместного круговорота органического вещества и азота в биогеоценозе переходного болота. // В сб. «Математическое моделирование биогеоценотических процессов», М., Наука, 1985.- С. 80-97.

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.

Ведрова Э.Ф., Баланс углерода в сосняках Средней Сибири. // *Сибирский экологический журнал*, т.4, 1997.- С. 375-383.

Наумов А.В., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Паршина Е.К., Углеродный баланс в болотных экосистемах Западной Сибири. // *Сибирский Экологический Журнал*, т. 5, 2007.- С. 771-779.

Наумов А.В., Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2009.- 208 с.

СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТРОФИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ТИПА «РЕСУРС-ПОТРЕБИТЕЛЬ»

Завалишин Н.Н. [1]

[1]*Учреждение Российской академии наук Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Лаборатория математической экологии, Москва, Россия*
nickolos@ifaran.ru

Аннотация: рассматриваются динамические модели частично замкнутых трофических цепей типа «ресурс-потребитель» с возможным присутствием эффекта всеядности и множественным поступлением ресурса на несколько уровней. С помощью теории бифуркаций проводится численно-аналитическое исследование границ устойчивости равновесий в пространстве параметров интенсивности внешнего поступления ресурса и промысла на концевом и промежуточном уровнях. Трехуровневая модель с эффектом всеядности может использоваться для анализа движения загрязнителей по пищевым цепям в экосистемах.

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». Особенностью этого представления цепей является отсутствие самолимитирования первого вида, что позволяет при исследовании регуляции жертвы хищником избежать наложения эффекта саморегуляции популяции жертв (Свирежев, Логофет, 1978; Свирежев, 1987).

Пусть трофическая цепь состоит из n видов с численностями N_i, первый из которых потребляет ресурс R, поступающий в систему с фиксированной скоростью Q (рис. 1). Удельная зависимость скорости выедания жертв N_{i-1} особями хищника N_i от численности популяции жертв называется трофическим откликом V_i и в произведении с численностью хищников дает поток биомассы от одного уровня цепи к другому. Трофический отклик чаще всего имеет вольтеровскую форму или вид функции с насыщением (“отклик” типов II и III по Холлингу). Балансовые уравнения трофической цепи имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{dN_0}{dt} &= Q - V_0(N_0)N_1 + \sum_{i=1}^{n} a_i m_i N_i \\ \frac{dN_i}{dt} &= k_i V_{i-1}(N_{i-1})N_i - V_i(N_i)N_{i+1} - m_i N_i, N_{n+1} \equiv 0 \end{aligned}, \qquad \textbf{(1)}$$

где m_i - коэффициенты смертности на i–ом уровне, a_i - коэффициенты утилизации ресурса. Частично замкнутой трофической цепью называется цепь с $0<k_i<1$, $0<a_i<1$ и $Q>0$. Модель (1) была исследована в нескольких частных случаях с вольтеровскими трофическими откликами (Свирежев, 1987). Наблюдения за реальными популяциями показывают, что динамика трофических уровней в частично замкнутых цепях может быть как равновесной, так и колебательной, демонстрируя нерегулярные колебания, похожие на детерминированный хаос и затрудняющие организацию промысла. В частности, повышение промысловой нагрузки на верхние трофические уровни в морской среде может вести как к плавному исчезновению промысловой популяции, так и к всплеску нерегулярных колебаний численности, за которым следует короткий промежуток кажущегося равновесия. Оно при малом увеличении промысла в свою очередь сменяется катастрофой: цепь укорачивается с полным исчезновением верхнего уровня (Свирежев, 1987). Этот эффект для системы (1) при n=2 и n=3 с трофическими функциями с насыщением исследуется посредством бифуркационного анализа по скорости поступления ресурса Q и интенсивности промысловой нагрузки концевого и промежуточных видов цепи. На параметрическом портрете выделены области устойчивости равновесных состояний и периодических решений, а численное исследование показало и присутствие хаотического аттрактора, что не было установлено в аналогичных цепях с вольтерровским типом трофического отклика. В качестве примеров используются наземные трофические цепи кустарничковой тундры и луговой степи, а также естественная и искусственная цепи в морской экосистеме Средиземного моря.

Рис. 1.

Частично замкнутая трофическая цепь длины n с ресурсом R, поступающим с постоянной скоростью Q из внешней среды (Свирежев, 1987; Jorgensen and Svirezhev, 2004).

N_i – биомасса i-ого уровня, V_i – функциональный отклик i-го уровня, m_i – естественная смертность и интенсивность промысла, a_i – коэффициент возобновления ресурса,

k_i – коэффициент утилизации ресурса на i–ом уровне.

Расширением данного класса цепей является цепь с эффектом всеядности (ресурс, циркулирующий в системе, поглощается не только первым, но и вторым трофическим уровнем) и множественным поступлением ресурса из внешней среды (рис. 2). Балансовые уравнения трофической цепи имеют вид:

$$\begin{aligned}
&\frac{dN_0}{dt} = Q - V_{01}(N_0)N_1 - V_{02}(N_0)N_2 + \sum_{i=1}^{n} a_i m_i N_i, \\
&\frac{dN_i}{dt} = k_i V_{i-1}(N_{i-1})N_i - V_i(N_i)N_{i+1} - m_i N_i, N_{n+1} \equiv 0, V_0 \equiv V_{01}, i = 1,3...n \qquad . \qquad (2) \\
&\frac{dN_2}{dt} = k_2 V_1(N_1)N_2 + h_2 V_{02}(N_0)N_2 - m_2 N_2 - V_2(N_2)N_3
\end{aligned}$$

Отличием системы (2) от (1) является присутствие среди её стационарных режимов состояний с нулевыми биомассами на промежуточных уровнях цепи. Даже для цепи длины два это приводит к более сложной структуре параметрического портрета, на котором появляются дополнительные области устойчивости периодических решений и существования стохастических режимов. Модель цепи такого вида применима для исследования роли «микробиальной петли» в водных экосистемах, поскольку всеядность зоопланктона является её принципиальным конструктивным эффектом. Проведено численно-аналитическое исследование бифуркационного портрета модели агрегированной двухуровневой трофической цепи Охотского моря с микробиальной петлей.

Рис. 2.

Частично замкнутая трофическая цепь длины n с ресурсом R, поступающим с интенсивностью Q_0 на нулевой и Q_2 на второй уровни трофической цепи.

N_i – биомасса i-ого уровня, V_1 (N_1)… V_{n-1} (N_{n-1})– функциональные отклики стандартных уровней,

V_{01} (N_0), V_{02} (N_0) – функциональные отклики всеядности для 1-го и 2-ого уровней, h_2 – коэффициент утилизации для дополнительного функционального отклика.

Поскольку биомассы видов цепи измеряются при данном подходе в единицах поступающего ресурса, возможна другая интерпретация динамической модели (2), при которой в качестве ресурса выступает загрязнитель, перемещающийся по трофической цепи вместе с поглощаемой биомассой. Такими загрязнителями чаще всего являются тяжелые металлы, попадающие в пищевые цепи через почву и растительность. Динамика простой цепи длины три исследована методами теории бифуркаций. Загрязнитель может поступать непосредственно и на второй уровень цепи, что влияет на структуру и условия устойчивости стационарных и периодических режимов. Стационарные состояния с нулевыми биомассами на промежуточных уровнях хорошо соответствуют наблюдаемому накоплению загрязнителей на верхних уровнях цепи.

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

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.
Jorgensen S.-E., Svirezhev Y.M., Towards a thermodynamic theory for ecological systems. Elsevier, 2004, 366 p.

АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПАЛЕОЦИКЛОВ

В.Н. Зайцев

Институт биологического приборостроения РАН[1]*, г. Пущино, Россия* tobil@rambler.ru

Аннотация: аналоговым моделированием механизмов эволюционного почвообразования при формировании биогеохимических палеоциклов на примере фасоли выявлена первичная реакция раздражения, которая посредством ионно-катионной индукции от организма к предпочве могла служить донорно-акцепторным сопряжением между организмами в палеосообществах.

В.И. Вернадский (1926г.), сформулировав основополагающий подход по изучению концептуальной модели биосферы, фактически положил начало исследованию моделей тематической направленности (математические, аналоговые и др.). Ныне сформировалась часть фундаментальной науки – системный анализ, включающий моделирование сложных биологических систем, биогеохимических циклов в различных формациях. Аналоговое моделирование, выяснение условий формирования массо-энергообменных сопряженностей между компонентами биогеоценозов, донорно-акцепторных механизмов биогеохимических палеоциклов также входит в этот тематический раздел. Поэтому, аналоговое моделирование, имитирующее формирование донорно-акцепторных сопряженностей между компонентами в первичных палеоценозах на ранних этапах эволюции биологических форм жизни представляет интерес. Методологическую основу исследования закономерностей биологического круговорота, составляет выявление донорно-акцепторных сопряженностей между компонентами биологических сообществ. Одним из промежуточных компонентов во взаимосвязях большинства организмов является почва и ее аналоги. Взаимообмен педо-, геохимическими элементами между организмами наземных, почвенных экосистем и литоморфными структурами связан с биокосностью почвы как энергетической основы жизнеобеспечения в гетерогенных оболочках биосферы при контактах косной материи (почвы, коры выветривания, рудные месторождения и т.д.) с комплексами микроорганизмов. Ранее было доказано, что на прямом контакте бактерий с поверхностью сульфидной частицы, бактериальной клеткой стимулируется окисление минерала с перекачкой электронов на клеточный организм. Это позволило признать анодно-катодный, (донорно-акцепторный - электрохимический механизм) биокоррозии минеральной частицы микроорганизмом. Распределение, перенос зарядов на контактах клеточных структур микроорганизмов с косными, минеральными частицами, возможно, имеет энергетическую и донорно-акцепторную сходственность с биокосной функциональностью почвенных структур при их контактах с ризосферной, прикорневой средой фототрофных организмов (растений). Первые организмы обеспечивали микробиологическое выветривание литоморфных тел, минералов (биовыветривание), преобразовывали литоморфные структуры в предпочвенные коры, формирующие биокосные поверхности, компоненты протобиосферы - предшественника будущих биосфер. В целом, наблюдалась коэволюция абиотических, геохимических и биотических процессов в формировании предпочвенных кор при преобразованиях экзогенной (солнечной) и эндогенной энергий, соответствующими эволюционному этапу биосферами. В ранние этапы эволюции Земли жизнь, индивидуального организма определялась наличием элементов питания, и первые организмы имели свойства лабильных к среде особей. При благоприятном доступе к источникам энергии они выполняли функции продуцентов, а организмы с дефицитом органических, минеральных элементов, вероятно, могли создавать ценотические сообщества, выполняющие и функции продуцентов, и редуцирование разложения органической мортмассы. Следовательно, к этому моменту сформировались и деструкторы (редуценты) органического

материала. Разложившаяся до молекулярных комплексов органика, образуя иловые (в воде), переработанные отложения мортмассы на поверхностях кор выветривания подвергалась физико-химическому воздействию среды, преобразовывалась в предпочвенные конденсированные аналоги почвенных поглощающих комплексов. Признаки процессов формирования аналогов почвенных структур, выполняющих функции доступного резервуара для временного хранения элементов минерального питания, влаги появились не позднее 3.5 - 4.3 млрд. л. н. С другой стороны, эволюцию почвенного покрова невозможно отделить от эволюционного совершенствования биологической жизни в процессе адаптации организмов к условиям среды. Адаптации отображают специфические, конкретные формы связи живых систем сформировавшиеся в процессе эволюции на разных уровнях организации - от раздражимости до высших форм реакций массо-, энергообмена в сложно организованных сообществах. Организмы-продуценты преобразовывая косные литосферные структуры обусловливали адаптивность предпочв. Она заключалась в передаче раздражающего активного воздействия на посредника (почву) и, возможно, от почвы к - организмам-редуцентам. Адаптивное сопряжение взаимообмена между членами сообщества можно связать с ролью организмов в активном биопреобразовании среды, что проявилось с появлением жизни в архее - 4,4 млрд. л.н. Это обусловливалось климатическим выветриванием, разложением, а микробиологическое биовыветривание приводило к образовыванию примитивных предпочв. В экспериментах по аналоговому моделированию механизмов эволюционного почвообразования при формировании биогеохимических палеоциклов выявлена индуцируемая светом донорно-акцепторная взаимосвязь, надземной, корневой частей растений с прикорневыми биокосными зонами (Зайцев, 2010). Анализ этих реакций приводит к выводу, что участие почвы как структурно-функционального компонента проявляется в генерации организмом продуцентом (растением) градиента электропотенциала в системе “атмосфера-ценоз-почва”, а затем этот потенциал индуцирует анионно-катионную упорядоченность в прикорневых, а, следовательно, и почвенных зонах. Это свидетельствует о том, что биокосные структуры почвенного поглощающего комплекса составляют звенья в цепи гетеротрофной утилизации энергетических эквивалентов генерируемых фототрофным организмом. Биогенно-абиогенное преобразование энергии света в аэро-фитоцено-почвенной системе сопровождается появлением автоколебательных циклов газообмена, которые восстанавливают убыль энергетической емкости организма, обеспечивают генерацию биоэлектрического потенциала действия (БЭП), генерируют реакции ионно-катионных потенциалов (ИКП). Благодаря этому формируется донорно-акцепторная “непрерывность”, т.е. градиент электропотенциала между растением и почвенным локусом, где и осуществляется почвенно-ризосферный (корневой) метаболизм. Электрохимическое сопряжение в палеосообщаствах могло формироваться посредством индукции формирования электрохимического сопряжения между организмами последовательностью реакций: 1).раздражением биологического организма, через автогенерацию волны биоэлектрического возбуждения (потенциал действия); 2).индукцией формирования градиента электрохимического и ионного потенциала в системе организм - продуцент (термотроф, хемотроф, фототроф) – (пред) почвенный локус; 3). индукцией электрохимических реакций анионно-катионных обменов между продуцентом (термо-, хемо-, фототрофом) и предпочвенным (прикорневым) локусом.

Литература:

Зайцев В.Н., Палеореконструкция механизмов эволюционного почвообразования при формировании биогеохимических циклов // В кн.: География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов.- М.: 2010, часть II на CD.- С.310-315.

БИМОДЕЛЬНЫЙ РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ УГЛЕРОДНОГО БЮДЖЕТА ЛЕСОВ РОССИИ ЗА 1988-2008 ГГ.

Замолодчиков Д.Г. [1], Коровин Г.Н. [1], Грабовский В.И. [1], Корзухин М.Д. [2]

[1]*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия*
[1]dzamolod@cepl.rssi.ru

[2]*Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, Москва, Россия*

Аннотация: проведена ретроспективная оценка бюджета углерода лесов России по моделям ЦЭПЛ и CBM-CFS3. Результаты оценки количественно совпадают для бюджета по пулу фитомассы и показывают некоторые расхождения для бюджета по всем пулам углерода лесов. Современное поглощение углерода лесами России составляет 150-200 Мт С год$^{-1}$, рост стока углерода в начале 1990-х годов вызван резким снижением объема лесозаготовок.

Современное потепление климата, вызванное ростом концентраций парниковых газов атмосферы, сфокусировало внимание исследователей на оценке бюджетов углерода различных типов наземных экосистем и территориальных объектов. Интенсивная проработка проблемы пока не привела к формированию общей точки зрения на пространственное распределение наземных стоков и источников углерода. Не являются исключением и леса России: даже в недавних публикациях оценки стока углерода варьируют от 100 до 700 Мт С в год (Замолодчиков и др., 2007, Моисеев, Филипчук, 2009, Shvidenko et al., 2010 и др.). Основная цель настоящей работы состояла в ретроспективной оценке бюджета углерода лесов России на основе бимодельного подхода, то есть путем расчетов по двум различным моделям (ЦЭПЛ и CBM-CFS3), но с одинаковыми наборами исходных данных и сценариев.

Модель ЦЭПЛ представляет собой комбинацию блока моделирования динамики лесного фонда и расчетных процедур оценки запасов углерода для различных пулов. Модель CBM-CFS3 разработана в Лесной службе Канады и признана соответствующей стандартам МГЭИК (Kurz et al., 2009). Обе модели в качестве исходных данных используют информацию по площадям и запасам древесины различных категорий лесных насаждений, сценарии управляющих и нарушающих воздействий на период имитации, климатические характеристики оцениваемых регионов.

Исходными данными в настоящей работе служили материалы учета лесного фонда по состоянию на 1988 г. для лесной площади 717.3 млн. га. Расчеты осуществляли для 160 пространственных единиц, образованных пересечением границ субъектов РФ и лесных районов. Элементарной учетной единицей служила совокупность лесных насаждений данной преобладающей породы в пределах пространственной единицы. При формировании сценария 1 использовали объемы лесозаготовок и площади лесных пожаров из статистических обследований лесного хозяйства. Ключевая черта этого сценария состоит в снижении заготовок древесины от 350 млн. м^3 год$^{-1}$ в 1988-1990 гг. до 150 млн. м^3 год$^{-1}$ к 1995 г., с последующим небольшим ростом и стабилизацией на уровне 200 млн. м^3 год$^{-1}$. Дополнительно был рассмотрен сценарий 2, предусматривающий сохранение объема лесозаготовок на уровне 1988-1990 гг.

Обе модели дают количественно близкие результаты для бюджета углерода по пулу фитомассы (рисунок 1*А*). При сценарии 1 отмечается усиление стока углерода в пул фитомассы в среднем от 40-50 Мт С год$^{-1}$ за 1988-1992 гг. до 100-110 Мт С год$^{-1}$ за 1993-2008 гг. Заметные вариации бюджета углерода в 1995-2006 гг. связаны с влиянием лесных пожаров. При сохранении лесозаготовок на уровне 1988-1990 гг. (сценарий 2) фитомасса лесов после 1992 г. поглощает в среднем 30 Мт С год$^{-1}$. Ретроспективные оценки для всех пулов углерода лесов (рисунок 1*Б*) заметно отличаются по моделям: модель ЦЭПЛ недооценивает сток по сравнению с CBM-CFS3. Здесь сказывается упрощенный подход к расчету эмиссий при пожарах, предполагающий немедленное окисление всей биомассы.

Разность средних величин бюджета углерода в 1993-2008 гг. между сценариями 1 и 2 по обеим моделям близка и составляет около 100 Мт С год$^{-1}$.

Рисунок 1. Ретроспективная оценка бюджета углерода лесов России для пула фитомассы (*А*) и всех пулов (*Б*) по моделям ЦЭПЛ и CBM-CFS3

Полученные результаты приводят к выводу, что величины современного поглощения углерода лесами на землях лесного фонда России находятся в пределах 150-200 Мт С год$^{-1}$. Усиление стока углерода в первой половине 1990-х годов вызвано резким снижением лесопользования, то есть имеет антропогенную природу.

Работа выполнена при поддержке ICF Consulting Ltd. (проект «Совершенствование показателей оценки запасов углерода в лесах») и РФФИ (11-04-01486-а).

Литература

Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации // Лесоведение.- 2007.- № 6.- С. 23-34.

Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н. Методика МГЭИК для расчета годичного депонирования углерода и оценка ее применимости для лесов России // Лесное хозяйство. - 2009.- № 4.- С. 11-13.

Kurz W.A., Dymond C.C., White T. et al. CBM-CFS3: a model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards // Ecological Modelling.- 2009.- V. 220.- No 4.- P. 480-504.

Shvidenko A., Schepaschenko D., Maksyutov S. Impact of terrestrial ecosystems of Russia on the global carbon cycle from 2003-2008: An attempt of synthesis // Proceedings of the International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2010.– Tomsk: 2010.- P. 48-52.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РЕПРЕЗЕНТАТИВНОГО ИНТЕРВАЛА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОБЛАСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ВИДОВ СПЕЦИАЛИСТОВ И ГЕНЕРАЛИСТОВ ПО ШКАЛАМ Д.Н. ЦЫГАНОВА

Зубкова Е.В.

Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
elenazubkova@rambler.ru

Аннотация: выполнена работа по оцениванию соотношения видов специалистов и видов генералистов в сообществах растений на разных сукцессионных стадиях при разном интервале выделения группы видов специалистов и генералистов по шкале влажности почв Д.Н.Цыганова. Показано, что наблюдаемые тенденции доли видов специалистов в сообществе на разных стадиях сукцессии устойчивы при разных интервалах выделения группы по шкале.

Модели инвазии новых видов растений при изменении условий, в том числе и при изменениях климата, используют понятие экологической ниши (Guisan, Zimmerman 2000, Austin et al. 2006). В этом случае экологической характеристикой вида является способность жить в узком или широком диапазоне изменения определённого фактора среды его обитания. Точное вычисление распределения вероятности выживания особей вида внутри этого диапазона пока невозможно, хотя такие попытки делаются (Heikkinen, Makipaa, 2010). Однако ширину диапазона условий выживания особей конкретного вида растений можно оценить по диапазонным экологическим шкалам, например, Д.Н.Цыганова (1983). Также относительной оценкой диапазона условий является широко распространенное в западной литературе отнесение вида к специалистам, – видам, особи которых живут в узком диапазон условий, и генералистам, у которых особи живут в широком диапазоне фактора. Данная характеристика является важной, так как позволяет прогнозировать динамику особей вида при инвазии или изменении условий, которое неизбежно происходит с течением времени (Evangelista et al. 2008). Одним из методов работы с этой характеристикой является использование информации, содержащейся в диапазонных экологических шкалах, например Д.Н.Цыганова (1983). Анализ свойств шкал Д.Н.Цыганова опубликован ранее (Зубкова, 2011). Была поставлена задача оценить постоянство проявления наблюдаемых тенденций соотношения видов специалистов и видов генералистов в сообществах растений на разных сукцессионных стадиях при разном интервале выделения группы видов специалистов и генералистов по шкале влажности почв Д.Н.Цыганова. Работа выполнена на материалах геоботанических описаний (ГБО) заповедника Брянский лес – данные О.И. Евстигнеева (2004) с применением программы EcoScaleWin (Грохлина, Ханина, 2006, Зубкова и др., 2008).

Для выявления устойчивости наблюдаемых тенденций были проанализированы ГБО четырёх стадий сукцессии: I - сосняк зеленомошный, II - сосняк бруснично-зеленомошный с дубом и сосняк чернично-зеленомошный с дубом, III - березово-дубово-елово-сосновый лес с подростом липы, клена и подлеском лещины, IV - полидоминантный хвойно-широколиственный лес с дубом (Зубкова, 2009). Для каждого ГБО было определена доля видов с диапазонами разной ширины, рассчитаны средние для каждого сообщества. Протестировано выделение видов-специалистов с разным диапазоном по шкале влажности почв: от 1 до 4 баллов, от 1 до 5 баллов, от 1 до 6 баллов, от 1 до 7, от 1 до 8 баллов, от 1 до 9 баллов. Размах шкалы 23 балла, то есть диапазоны менялись от 17 до 39%. На рисунке 1 приводятся данные доли участия видов специалистов в сообществах на разных сукцессионных стадиях.

Рисунок 1. Распределение специалистов (%) на разных стадиях сукцессии (I - сосняк зеленомошный, II - сосняк бруснично-зеленомошный с дубом и сосняк чернично-зеленомошный с дубом, III - березово-дубово-елово-сосновый лес с подростом липы, клена и подлеском лещины, IV - полидоминантный хвойно-широколиственный лес с дубом (в ГБО заповедника Брянский лес при разном тестовом диапазоне по фактору влажности почв; выделенных по разной ширине диапазона: 1-4, 1-5, 1-6, 1-7, 1-8, 1-9 для шкалы влажности почв Hd. Для значений отложены среднеквадратичные отклонения, вычисленные по обработанным ГБО

Таким образом, из графиков видно, что тенденции изменения доли видов специалистов в ходе сукцессии имеют одинаковые закономерности – процент их возрастает вне зависимости от выбранных диапазонов выделения. Для дальнейшего анализа мы посчитали целесообразным отнести к специалистам по шкале влажности почв виды с диапазонами от 1 до шести включительно (26%), так как в группу с диапазонами до пяти входит слишком мало видов, а в группу с диапазонами до семи на последней из рассмотренных стадий входит число видов, близкое к 50%, что выглядит чрезмерным для видов-специалистов. Аналогичным образом нами были протестированы и другие территории (Зубкова, 2009) (Рисунок 2.)

Были также проанализированы диапазоны для видов-специалистов по факторам богатства и кислотности почв. В результате показано, что наблюдаемые тенденции изменения доли видов-специалистов и видов-генералистов в сообществах растений в ходе сукцессии проявляют сходные тенденции по разным факторам. Оптимальным для выделения видов специалистов по различным шкалам, на наш взгляд, являются интервалы от 20 до 30% от максимального числа градаций соответствующей шкалы. Этот интервал наилучшим образом соответствует понятию «вид-специалист»; в рассмотренных сообществах доля видов-специалистов составляет от 3-10% до 13-25% от общего числа видов, что, по нашему мнению, позволяет использовать этот интервал для характеристики видов-специалистов.

Рисунок 2. Процент видов растений специалистов по фактору влажности почв (Hd) на разных стадиях сукцессии: А - Печоро-Илычский заповедник, Б – Костромская область; В – заповедник Брянский лес; по горизонтальной оси - стадии сукцессии (Зубкова, 2009), по вертикальной – процент видов специалистов в сообществе с диапазоном 1-6. Для каждой стадии отложены среднеквадратичные отклонения, вычисленные по обработанным ГБО

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 (на примере заповедника «Брянский лес» и окружающих территорий) // Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность / Отв. ред. О.В. Смирнова. В 2-х книгах.- М.: Наука, 2004.- Кн.2.- С. 245-260.

Зубкова Е.В. Изменения соотношения реализованных экологических ниш растений в сообществах при сукцессии // Известия Самарского научного центра РАН.- Т. 11, № 7(11).- 2009.- С. 1634-1639.

Зубкова Е.В. О некоторых особенностях диапазонных экологических шкал растений Д.Н.Цыганова // Известия Самарского научного центра РАН.- 2011.- №5. принята в печать.

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.

Austin M.P., Belbin L., Meyers, J.A., Doherty M.D., Luoto M. Evaluation of statistical models used for predicting plant species distributions: Role of artificial data and theory // Ecological Modelling.- 199.- 2006.- P. 197-216.

Evangelista P.H., Sunil Kumar, Th.J. Stohlgren, C.S.Jarnevich, A.W. Crall, J.B. Norman III, D.T. Barnett. Modelling invasion for a habitat generalist and a specialist plant species // Diversity and Distributions.- 2008.- 14.- P. 808–817.

Guisan H. A., Zimmermann, N.E. Predictive habitat distribution models in ecology // Ecological Modelling 135.- 2000.- P. 147-186.

Heikkinen, J., Mäkipää, R. Testing hypotheses on shape and distribution of ecological response curves // Ecological Modelling.- 2010.- 221 (3).- P. 388-399

БАЗА ДАННЫХ «РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛОБАРИИ ЛЕГОЧНОЙ *(LOBARIA PULMONARIA)*»

Иванова Н.В. [1], Шашков М.П.[2]

[1] *НИЛ Устойчивости лесных экосистем Костромского ГУ им. Н.А. Некрасова, г. Кострома, Россия*
Natalya.dryomys@gmail.com

[2] *ЦЗЛ Ленинградской области, г. Санкт-Петербург, Россия*
Max.carabus@gmail.com

Аннотация: описана структура информационной системы, предназначенной для хранения и визуализации данных о распространении редкого вида лишайника – лобарии легочной (*Lobaria pulmonaria).*

Объект исследования – эпифитный фолиозный лишайник лобария легочная (*Lobaria pulmonaria (L.) Hoffm.*). Этот вид поселяется на коре старых лиственных, иногда хвойных деревьев (Красная книга РСФСР, 1988), на северной границе ареала отмечен на замшелых камнях (Silke Werth., 2005). Лишайник распространен практически по всему миру: в Европе, Азии, Северной Америке, Африке и Австралии. Зависимость жизненного цикла лобарии от динамики коренных лесов определила ее уязвимость к хозяйственной деятельности человека. Сокращение ареала лобарии под влиянием рубок и загрязнения воздуха послужило причиной внесения вида в Red List МСОП (Иванова, 2008).

В связи с этим актуальны исследования по выявлению мест обитания *Lobaria pulmonaria,* а также мониторинг состояния уже известных популяций. Необходимость обработки большого объема разнокачественных данных обусловила создание информационной системы, с помощью которой можно получать тематические выборки, а также карты распространения изучаемого вида на конкретных территориях.

На основе собственных полевых исследований и анализе гербарных образцов, хранящихся в Ботаническом институте им. Комарова, разработана база данных для хранения информации о местах обитания лобарии. В качестве СУБД выбрана открытая программа PostgreSQL. В структуре базы справочные таблицы с названиями регионов и административных районов РФ, а также справочная таблица древесных пород – возможных форофитов для лишайника. Рабочая таблица предназначена для внесения параметров мест обитания лобарии.

Для удобства работы с базой на языке программирования Delphi разработано пользовательское приложение. Приложение представляет собой визуальную форму, связанную с базой набором запросов. Запросы, помимо функций добавления и просмотра записей, обеспечивают контроль целостности и непротиворечивости данных в базе. Форма позволяет вносить данные о находках, редактировать и удалять уже имеющиеся в базе записи. Также предусмотрена функция выбора записей по определенному параметру, например, можно выбрать все находки, сделанные в определенном административном районе, или определенном типе сообщества.

Вносимые данные делятся на 4 блока:

- общие сведения о географическом расположении места обитания вида, включая ссылку на автора находки;
- сведения о лесном сообществе, в котором обнаружен лишайник;
- описание форофита (дерева-носителя лобарии);
- описание талломов лобарии на форофите (описание функционального индивидуума).

Пространственная информация, содержащаяся в базе данных (географические координаты или привязка к населенному пункту) позволяет, получать карты распространения вида. Для визуализации данных выбрана открытая ГИС QuantumGIS, связанная с базой.

Организация сведения о находках лобарии легочной в базу данных позволила составить карту ареала вида на территории Костромской области.

Литература

Иванова Н. В. Стратегия сохранения лобарии легочной (Lobaria pulmonaria (L.) Hoffm.) во вторичных лесах южной тайги // Материалы докладов I Всероссийской молодежной научной конференции Молодежь и наука на севере» (в 3-х томах). Том III. XV Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы биологии и экологии» (Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 14-18 апреля, 2008 г.).– Сыктывкар, 2008.– С. 99.

Красная книга РСФСР (растения).- М., 1988.– 591 с.

Silke Werth. Dispersal and persistence of an epiphytic lichen in a dynamic pasture – woodland landscape.– Bern, 2005.- 121 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО РОСТА ДВУХ ЛЕСООБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Иванова Н.С.

Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Россия
i.n.s@bk.ru

Аннотация: на основе систем связанных дифференциальных логистических уравнений дано математическое описание совместного роста сосны (*Pinus sylvestris* L.) и березы (*Betula pendula* Roth. и *B. pubescens* Ehrh.) в двух альтернативных экодинамических рядах формирования лесной растительности на сплошных вырубках: восстановление исходных лесов (после рубок в сосняках брусничниковых) и формирование длительно-производных березняков разнотравно-вейниковых (после рубок в сосняках разнотравных).

В связи со сложностью лесных экосистем, повсеместной их антропогенной трансформацией, поливариантностью и нелинейностью дигрессивно-демутационных смен остро необходимы контроль и прогнозирование изменений, происходящих в лесах. Нами изучается формирование древесного яруса на сплошных вырубках (до древостоев 50–55-летнего возраста) в Зауральской холмисто-предгорной провинции. Восстановительно-возрастная динамика рассмотрена для двух типов леса (Колесников и др., 1974): сосняка брусничникового и сосняка разнотравного (таблица 1).

Изучение древесной растительности на пробных площадях выполнено по общепринятым методикам (Изюмский, 1972). В качестве интегральной характеристики использована фитомасса в абсолютно-сухом состоянии. Масса лесообразующих древесных видов определена расчетным путем (Изюмский, 1972; Усольцев, 1997). Для описания динамики плотности (фитомассы) сосны и березы, их взаимовлияния в процессе формирования древостоя построены на основе систем связанных логистических уравнений модели их совместного существования. Использована следующая система дифференциальных уравнений:

Таблица 1. Характеристика объектов исследований

Показатель	Лесорастительные условия	
Увлажнение	Неустойчиво-свежие, периодически сухие	Устойчиво-свежие, периодически влажные
Положение в рельефе	Вершины и верхние половины склонов возвышенностей	Нижние части пологих дренированных склонов
Особенности почв	Мелкие (до 30 см) неполноразвитые буроземовидные горно-лесные примитивно-аккумулятивные хрящеватые легкие суглинки	Мощные (более 50 см) суглинистые дерново-подзолистые на суглинистом элювии-делювии горных пород
Тип леса		
Коренной	Сосняк брусничниковый	Сосняк разнотравный
Состав; бонитет	10С+Б, Л; II–III	10С+Б, Лп, Е; II–III
Тип вырубки	Вейниковые	Разнотравно-вейниковые

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = A_1 x_1 - B_1 x_1^{\ 2} + C_1 x_1 x_2 \\ \dfrac{dx_2}{dt} = A_2 x_2 - B_2 x_2^{\ 2} + C_2 x_1 x_2 \end{cases}$$

где x_1 – плотность (надземная масса, г/м^2 в абсолютно сухом состоянии) сосны обыкновенной; x_2 – плотность березы пушистой и березы бородавчатой; A, B, C – параметры, которые определяются в процессе решения обратной задачи. Методика и программный продукт численного решения системы дифференциальных уравнений разработаны Г.П. Быстраем и подробно изложены ранее (Иванова, 2009).

Формирование древесного яруса после сплошной рубки сосняка брусничникового изображено на рисунке 1а. На всем изученном промежутке восстановительно-возрастных смен явно преобладает по массе сосна. Разница в плотностях изучаемых древесных видов составляет 1–2 порядка. Однако полного выпадения березы из структуры формирующихся лесов не наблюдается. Коэффициенты уравнений составляют: A_1=0.625; B_1=0.000043; C_1=0; A_2=0.292; B_2=0.00113; C_2= –0.000019.

Рисунок 1. Восстановительно-возрастная динамика плотности (фитомассы) сосны и березы на сплошных вырубках: а – крутые склоны южной экспозиции с мелкими каменистыми почвами, б – нижние части пологих склонов с мощными (более 50 см) дренированными почвами, 1 – плотность сосны (г/м^2), 2 – плотность березы (г/м^2), точки – статистические данные, линии – результаты решения системы логистических уравнений (две последние точки на них – прогноз динамики)

Формирование древесного яруса после сплошной рубки сосняка разнотравного приведено на рисунке 1б. В этих лесорастительных условиях наблюдается противоположное соотношение плотностей сосны и березы: явно преобладает береза, сосна находится под ее угнетением. Формируются длительно-производные березняки разнотравно-вейниковые с сильно угнетенной сосной во втором ярусе. Коэффициенты уравнений: A_1=0.575; B_1=0.0017; C_1=0; A_2=0.805; B_2=0.000069; C_2=0.

Таким образом, на основе систем связанных дифференциальных логистических уравнений дано математическое описание совместного роста сосны (*Pinus sylvestris* L.) и березы (*Betula pendula* Roth. и *B. pubescens* Ehrh.) в двух альтернативных экодинамических рядах формирования лесной растительности на сплошных вырубках: восстановление исходных лесов (после рубок в сосняках брусничниковых) и формирование длительно-производных березняков разнотравно-вейниковых (после рубок в сосняках разнотравных).

Работа выполнена при частичной поддержке Программы Президиума РАН «Биологическое разнообразие» (проект 09-П-4-1039).

Литература

Иванова Н.С. Исследование сопряженности восстановительно-возрастной динамики древостоя и подчиненных ярусов в коротко-производных березняках западных низкогорий Южного Урала // Аграрный вестник Урала. – 2009. – № 1. – С. 76–79.

Изюмский П.П. Таксация тонкомерного леса. – М.: Лесная пром-сть, 1972. – 88 с.

Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1974. – 176 с.

Усольцев В.А. Биоэкологические аспекты таксации фитомассы деревьев. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 216 с.

ОБ ОДНОЙ МОДИФИКАЦИИ МОДЕЛИ БЕДДИНГТОНА-ФРИ-ЛАУТОНА ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ПАРАЗИТ-ХОЗЯИН

[1]Иванчиков П.В., [2]Недорезов Л.В.

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

[2]*Учреждение Российской академии наук Центр междисциплинарных исследований по проблемам окружающей среды РАН, Санкт-Петербург, Россия*

pavel.ivanchikov@gmail.com

Аннотация: производится анализ модификации модели Беддингтона-Фри-Лаутона, в рамках которой учитывается влияние эффекта перезаражения. Изучаются динамические режимы модели.

Рассматривается одна из возможных модификаций известной дискретной модели динамики системы паразит – хозяин, предложенной в работе Дж. Беддингтона, К. Фри и Дж. Лаутона (Beddington, Free, Lawton, 1975). В указанной работе авторы использовали следующий подход при модификации известной дискретной модели динамики системы паразит – хозяин Николсона – Бейли (Nicholson, Bailey, 1935). Авторами предполагалось, что при заданных значениях численностей популяций доля незараженных особей хозяина, которые и порождают особей следующей генерации, в точности равна вероятности P того, что случайная величина, распределенная по закону Пуассона, равна нулю. Соответственно, доля зараженных особей в популяции равна $1-P$. Авторами также предполагалось, что численность паразитов новой генерации равна численности зараженных особей хозяина, умноженной на некий постоянный понижающий коэффициент (меньший единицы), поскольку не из всех зараженных особей хозяина появляются жизнеспособные особи паразитов новой генерации.

Еще одно предположение авторов модели (Beddington, Free, Lawton, 1975) заключается в том, что доля зараженных особей зависит только от численности паразитов. В настоящей работе мы следовали этому предположению и считали, что доля зараженных особей хозяина определяется только численностью паразита. В отличие от оригинальной в рассматриваемой модели предполагалось, что успешное развитие паразита в теле хозяина происходит тогда и только тогда, когда особь хозяина атакована ровно один раз. С учетом этого модель принимает следующий вид (после приведения к безразмерному виду):

$$x_{k+1} = Ax_k e^{-y_k - x_k}, \; y_{k+1} = Cx_k y_k e^{-x_k - y_k}, \tag{1}$$

где x_k – численность популяции хозяев, y_k – численность популяции паразитов в k-ый момент времени, $C < A$. Модель (1) обладает следующими свойствами:

1. При $x_0 = 0$ и $y_0 > 0$ имеем $x_k \equiv 0$, $y_k \equiv 0$ для любого $k > 0$ (паразиты вырождаются за шаг по времени). При $x_0 > 0$ и $y_0 = 0$ имеем $y_k \equiv 0$ для любого $k > 0$, а динамика численности хозяев описывается моделью Морана - Риккера.

2. Существует устойчивый инвариантный компакт Δ в R_+^2:

$$\Delta \subset R_+^2 = \{(x, y) : x \geq 0, y \geq 0\},$$

и, если $(x_0, y_0) \in \Delta$, то для любого $k > 0$ имеем $(x_k, y_k) \in \Delta$. Если $(x_0, y_0) \notin \Delta$, то траектория модели (1) асимптотически входит в Δ:

$$\Delta = \left[Ae^{-1}, Ce^{-2}\right].$$

3. Стационарная точка (0,0) является сложным состоянием равновесия. При $A < 1$ она является глобально устойчивым равновесием. В этом случае в системе реализуется режим безусловного вырождения обоих взаимодействующих видов. При переходе через бифуркационную линию $A = 1$, при $A > 1$ точка (0,0) принимает седловой характер с

характеристическими числами $\lambda_1 = A$ и $\lambda_2 = 0$. При этом на оси x появляется стационарная точка $(\ln A, 0)$.

4. При выполнении неравенств

$$1 < A < e^2,\ C < \frac{A}{\ln A}, \tag{2}$$

стационарная точка $(\ln A, 0)$ является глобально устойчивым равновесием.

5. При нарушении второго условия в (2) в положительной части фазовой плоскости появляется стационарная точка $(A/C, \ln A - A/C)$. Если значения параметров модели (1) лежат в области, ограниченной кривыми

$$C = \frac{4A}{4\ln A - \ln^2 A},\ C = \frac{A}{4l - \ln A},$$

корни характеристического уравнения вещественные и по модулю меньше единицы; соответственно, стационарная точка устойчива.

В модели (1) реализуется весьма интересный динамический эффект. При каждом фиксированном значении параметра C рост величины A (что происходит при увеличении плодовитости особей хозяина и/или их выживаемости) приводит к вырождению паразитов. На рис. 1 представлена бифуркационная диаграмма, построенная при $C = 10$, иллюстрирующая данный эффект.

Рисунок 1. Бифуркационная диаграмма для модели (1) при $C = 10$. По оси ординат откладываются ординаты устойчивых аттракторов (численность паразитов)

Литература

Beddington J.R., Free C.A., Lawton J.H. Dynamic and complexity in predator-prey models framed in difference equations // Nature, 1975.- V. 255.– P. 58-60.

Nicholson A.J., Bailey V.A. The balance of animal populations // Proc. Zool. Soc. London - 1935.– P. 551-598.

ЭКОСИСТЕМА ПРИМОРСКОГО ГОРОДА: КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ, СЦЕНАРНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ

Ильченко И.А.

НОУ ВПО «Таганрогский институт управления и экономики», Таганрог, Россия
i.ilchenko@mail.tmei.ru

Аннотация: разработана когнитивная модель взаимодействия компонентов урбоэкосистемы в процессах переноса загрязнителей и проведено сценарное моделирование различных воздействий на состояние параметров системы. Предложены методы улучшения состояния городской среды обитания.

Городская среда является средой обитания для 70% населения России и др. стран, в связи с чем моделирование влияния компонентов урбоэкосистемы на здоровье горожан с целью выработки эффективных управленческих решений является актуальным.

На рис.1 представлена когнитивная модель, отражающая взаимодействия компонентов экосистемы приморского города в условиях антропогенного загрязнения и их влияние на здоровье жителей г.Таганрога. Построение модели и сценарное моделирование было проведено с помощью вычислительных программ ПС КМ (Пьявченко, 2003). Модель включает 10 вершин: V1 – Загрязнение воздуха, V2 – Здоровье населения, V3 – Состояние растительности, V4 – Загрязнение почв, V5 – Загрязнение грунтовых вод, V6 – Загрязнение подземных вод, V7 – Загрязнение донской воды, V8 – Загрязнение миусской воды, V9 – Шумовое загрязнение, V10 − Загрязнение вод Таганрогского залива Азовского моря. Весовые коэффициенты дуг модели были определены на основании среднемноголетних данных экологического и социально-гигиенического мониторинга г.Таганрога.

Рисунок 1. Когнитивная модель взаимодействия компонентов экосистемы приморского города

Предложенная модель содержит 4 цикла с положительной обратной связью: цикл V1-V3-V1 характеризует влияние растительности на химический состав атмосферного воздуха, цикл V1-V4-V1 – влияние загрязнения воздуха на загрязнение почв, цикл V4-V3-V4 – влияние загрязнения почв на состояние растительности, а цикл V1-V4-V3-V1 отражает взаимодействие аэро-, гео- и биосистем (роль последней представлена ее растительной составляющей) при поддержании естественных параметров среды. Дуги V6-V2, V7-V2 и V8-V2 отражают влияние питьевой воды на здоровье горожан: в г.Таганроге используется

закольцованная система водоснабжения, из которой предварительно смешанные воды от подземных (городские артезианские скважины) и поверхностных водоисточников (реки Дон и Миус) поступают в городскую водопроводную сеть. Дуга V10-V2 отражает влияние загрязнения вод Таганрогского залива Азовского моря на городское население во время купания и приема в пищу морской рыбы. Контуры V1-V3-V2, V1-V4-V10-V2, V1-V10-V2, V1-V4-V5-V6-V2, V1-V4-V5-V6-V10-V2 соответствуют опосредованному влиянию загрязнения атмосферного воздуха на здоровье людей. В городской экосистеме имеется два аккумулятора загрязнителей: воздушная среда и почва, которые по аналогии с биогеохимическими циклами выступают в качестве обменного и резервного фондов миграции загрязнителей. Третьим резервуаром, способным принимать и накапливать городские поллютанты, является Таганрогский залив Азовского моря (V10). В модели не показаны источники загрязнения урбоэкосистемы, т.к. предполагается, что все они обуславливают фоновые уровни загрязнения ее компонентов, принятые в качестве исходных. Данная модель не рассматривает движения воздушных масс, способствующего рассеиванию загрязнителей, поэтому проведенное сценарное моделирование имеет нединамический характер и позволяет оценить вероятные уровни загрязнения городской среды обитания с позиций предельно допустимых уровней загрязнения. Матрица отношений модели включает 10 собственных чисел, из которых максимальное по модулю число составляет 0,689, что позволяет ожидать проявления данной системой некоторой устойчивости (Касти, 1982). В десяти сценариях в различные вершины модели вносились импульсы в соответствии с оказываемыми на урбоэкосистему антропогенными воздействиями, а в качестве контролируемых параметров были выбраны состояния 4-х вершин модели: уровень загрязнения воздуха (V1), состояние растительности (V3), уровень загрязнения почв (V4) и здоровье населения (V2). Оказалось, что проведение мероприятий по снижению загрязнения питьевой воды не вызывает существенных положительных изменений в здоровье горожан, тогда как снижение уровня загрязнения воздуха и совершенствование растительной подсистемы города (в частности, путем фитомелиорации городской территории) способствуют улучшению популяционного здоровья населения.

На основании анализа разработанной модели можно сделать заключение о том, что экосистема приморского города содержит 4 цикла с положительной обратной связью: V1-V3-V1, V1-V4-V1, V4-V3-V4 и V1-V4-V3-V1. Они отражают сложный характер взаимодействия аэро, гео- и растительной подсистем городской экосистемы в процессе распространения химических загрязнителей, а именно, усиление внешнего возмущения, вносимого в вершины V1, V3 или V4, благодаря четырем взаимно сопряженным циклам с положительной обратной связью. Воздушный бассейн города играет роль обменного фонда миграции загрязнителей, а городские почвы и море (Таганрогский залив) – резервных фондов. Результаты сценарного моделирования показывают, что наиболее сильное влияние на компоненты городской экосистемы оказывает загрязнение воздушной среды, которое проявляется и прямо, и косвенно. Для обеспечения приемлемого качества городской окружающей среды и улучшения здоровья горожан наиболее эффективным является комплексный подход, т.к. при его использовании наблюдается существенное улучшение уровня здоровья населения и состояния растительности и значительное понижение уровней загрязнения воздуха и почв по сравнению с их исходными значениями.

Литература

Касти Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы.− М.: Мир, 1982.− С.39-127.

Пьявченко О.Н., Горелова Г.В., Боженюк А.В., Клевцов С.А., Каратаев В.Л., Радченко С.А., Клевцова А.Б. Методы и алгоритмы моделирования развития сложных ситуаций.− Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003.− С. 7-69.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИРОСТА ДРЕВЕСИНЫ ВДОЛЬ СТВОЛА ДЕРЕВА: ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Каплина Н.Ф.

Институт лесоведения РАН, с. Успенское Московской обл, Россия
kaplina@inbox.ru

Аннотация: адекватность модели позволяет минимизировать только систематические отклонения по диаметру (площади сечения) и его приросту на различной высоте стволов у 60-80-летних сосен. Подтверждены результаты модельного эксперимента: сдвиг распределения нетто-продукции в верхнюю часть ствола в случае снижения его прироста в нижней части и обусловленность этого сдвига стабильной формой ствола.

Введение

Распределение прироста древесины вдоль ствола (РПС) – важная составляющая распределения нетто-продукции по органам дерева. Самостоятельный интерес РПС имеет в дендроэкологии и при изучении влияния рубок ухода на форму ствола. Форма РПС по сравнению с формой ствола более сложная и изменчивая. Вместе с тем, она ограничена несколькими типами, что позволяет выделить закономерную составляющую с помощью адекватной модели. Типы РПС и их встречаемость в зависимости от различных факторов наиболее полно описаны в (Дворецкий, 1964).

В современных немногочисленных работах математические модели РПС основаны на морфометрических, механических и физиологических принципах (Courbet, 2002). Однако в них не используются непосредственно параметры формы ствола, что ограничивает их возможности. Ранее предложен подход к исследованию формы продольных профилей древесного ствола и его прироста на основе уравнения образующей ствола дерева, в котором её форма описывается с помощью параметров формы двух функций Вейбулла. В модельном эксперименте получены известные типы РПС для деревьев различного роста и развития и охарактеризованы их параметры (Каплина, 2009).

Цель настоящей работы - применить предложенную модель для анализа и систематизации экспериментального материала на примере приспевающего древостоя сосны.

Объекты и методы

Экспериментальный материал получен в 78-летнем сосняке Владимирской обл., I бонитета, полнотой 0,8. У 10-ти модельных деревьев измерены диаметры и радиальные приросты ствола за ряд 5-летних периодов: на высоте пня, 1,0 м и далее через каждые 2 м. Приросты по высоте ствола измерены по мутовкам.

Для аппроксимации образующей ствола использована модель (Каплина,2009), апробированная на массовом материале обмеров стволов деревьев сосны и на табличных данных для основных лесообразующих пород России ($R^2 > 0{,}99$):

$$p_h = 2/\left(2^{Pd^{C1}} + 2^{Pd^{C2}}\right) \qquad (1)$$

где $p_h = h/H$, $p_d = d_h/b$, h – высота обмера, H – высота ствола, d_h – диаметр на высоте h, b – параметр масштаба, численно равный $d_{1/2H}$ ствола (либо вместо d - другие показатели ствола, например площадь сечения – g, окружность - l); c_1 и c_2 – параметры формы образующей ствола, её «кроново-корневой» и «стволовой» составляющих, соответственно.

Модельную оценку РПС по d_h (zd_h) либо по g_h (zg_h) получали по разности их величин на различных h в начале и конце 5-летнего периода. Для этого оценивали параметры уравнения (1) на начало и конец 5-летки по МНК. На 1-ом этапе получали параметры на конец периода по обмерам ствола без коры. На 2-м этапе – параметры на начало периода, по

обмерам приростов ствола. Поскольку форма ствола и его прирост адекватно описываются моделью, основной задачей было устранение систематических отклонений модели как на 1-м, так и на 2-м этапах, для чего минимизировали только те из них, которые совпадали по знаку с отклонениями от предыдущего и последующего измерений.

Результаты и обсуждение

РПС по диаметру у большинства изученных деревьев и в периоды с различными условиями роста оказалось возрастающим (от основания к вершине) либо вогнутым (с увеличением прироста в нижней и в верхней части ствола) как у угнетенных, так и у хорошо развитых деревьев. Лишь у наиболее крупных деревьев в лучшие периоды роста оно было равномерным на протяжении большей части ствола. РПС по площади сечения (зависящее от «падающей» формы ствола) изменялось от угнетенных до господствующих деревьев от вогнутого до равномерного, что очевидно можно отнести и к распределению нетто-продукции. Лишь у наиболее крупных деревьев в лучшие периоды наблюдалось падающее РПС. При возрастающем и вогнутом распределении нетто-продукции ведущим фактором можно считать конкуренцию за свет, при падающем – повышение прочности ствола.

У большинства стволов (кроме самых тонких) наблюдается некоторое увеличение прироста в их нижней части. В ряде случаев это увеличение полностью описывается моделью, однако чаще прирост по модели меньше, чем в эксперименте. Это может быть вызвано двумя причинами: 1) особенностью формы ствола в комле - с выпуклостями в местах прикрепления корневых лап, что приводит к завышению обмеров диаметра и радиального прироста, 2) недостаточная адекватность модели при описании формы ствола и РПС в комлевой части, что требует дальнейшего изучения.

Анализ экспериментальных данных подтвердил установленное в модельном эксперименте противоположное влияние на РПС относительных приростов по диаметру и по высоте. Снижение прироста по диаметру в неблагоприятные периоды является индикатором преимущественного распределения нетто-продукции в верхнюю часть ствола, что объясняется стабильностью формы ствола и прироста по высоте. Также подтверждено убывание влияния на изменчивость формы РПС относительных приростов ствола в ряду снижения их природной изменчивости: по диаметру (площади сечения), высоте, параметрам формы - «кроново-корневой» и «стволовой».

Выводы

Предложенная модель достаточно адекватна форме как ствола так и его прироста, что позволило при аппроксимации измерений минимизировать только систематические отклонения. Подтвержден установленный в модельном эксперименте факт сдвига распределения нетто-продукции в верхнюю часть ствола при снижении прироста по диаметру в его нижней части и обусловленность этой закономерности стабильной формой ствола. Подтверждено, что степень влияния параметров на изменчивость формы РПС связана с их естественным варьированием. На основе формы РПС по диаметру и площади сечения возможна экологическая классификация деревьев в насаждении, при этом параметры модели позволяют объективно систематизировать экспериментальные данные.

Работа поддержана РФФИ, гранты 09-04-00560, 09-04-01199.

Литература

Дворецкий М.Л. Текущий прирост древесины ствола и древостоя.- М: Изд-во Лесн. пром., 1964.- 125 с.

Каплина Н.Ф. Новый подход к исследованию формы продольных профилей древесного ствола и его прироста // Структура и функции лесов Европейской России.- М.: КМК, 2009.- С. 369-389.

Courbet F., Houllier F. Modelling the profile and internal structure of tree stem. Application to Cedrus atlantica (Manetti) // Ann. For. Sci.- 2002.- № 59(1).- P. 63–80.

ЕСТЕСТВЕННЫЙ ОТБОР СТРАТЕГИЙ СОЗДАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НИШ В НЕОДНОРОДНЫХ МОДЕЛЯХ «РЕСУРС-ПОТРЕБИТЕЛЬ»

Карев Г.П. [1], Березовская Ф.С. [2], Карева И.Г. [3]

[1] *National Center of Biothechnological Information, Bethesda, USA*
karev@ncbi.nlm.nih.gov
[2] *Howard University,Washington DC, USA*
fsberezo@hotmail.com
[3] *Arizona State University, Tempe, USA*
ikareva@asu.edu

Аннотация: построена и изучена модель создания экологических ниш, в которой организмы могут не только потреблять ресурс, но и участвовать в его возобновлении. Исследуется эволюция распределения параметра α, задающего смешанную стратегию взаимодействия организмов с ресурсом. Изучено асимтотическое поведение и переходные режимы системы.

«Конструирование экологических ниш» как процесс, в котором организмы не только адаптируются к давлению окружающей среды, но и модифицируют ее (Laland et al. 2001), изучается на основе модели взаимодействия параметрически неоднородной популяции с возобновляемым ресурсом. Предполагается, что организмы могут использовать две стратегии потребления ресурса (Krakauer et al. 2009), из которых первая, используемая с вероятностью α, направлена на максимальное выживание и увеличение ресурса, а вторая, используемая с вероятностью 1- α, на максимизацию размножения. Модель представляет собой бесконечномерную систему дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dx_\alpha}{dt} &= x_\alpha(t)(\alpha(c_1 - \frac{x_\alpha(t)}{kz(t)}) + (1-\alpha)(\frac{c_2 z(t)}{N(t)+z(t)} - \varphi)), \\ \frac{dz}{dt} &= \gamma - \delta z(t) + e(\alpha(1-c_1) + (1-\alpha)(1-c_2))\frac{N(t)}{N(t)+z(t)} \end{aligned} \qquad (1)$$

где $x_\alpha(t)$ - клон организмов с параметром α , $N(t)$- полная численность популяции, $z(t)$- количество ресурса; положительные параметры c_1, c_2, φ, k характеризуют потребителей, $\gamma, \delta, 0 \le e \le 1$ - ресурс; величины $C_1 = 1 - c_1, C_2 = 1 - c_2$, которые могут быть как положительными, так и отрицательными, отражают взаимодействия между потребителем и ресурсом при каждой из двух стратегий - вклад или “суперпотребление”. На первом этапе изучается параметрически однородная система при фиксированном значении α; проводится бифуркационный анализ модели при вариации параметра α и одного из параметров c_1, c_2, определяющих скорость роста или уровень потребления в каждой из «чистых» стратегий.

На следующем этапе мы предполагаем, что популяция неоднородна и каждый индивидуум характеризуется его собственным значением параметра α. Эта модель предназначена для исследования следующей основной проблемы: какая из “чистых”($\alpha = 0,1$) или смешанных ($0 < \alpha < 1$) стратегий будет отобрана в результате конкуренции организмов (клонов) и естественной эволюции системы в зависимости от значений параметров модели и *начального распределения параметра α*. Можно показать, что динамика неоднородной модели описывается формально той же системой уравнений, что и однородная модель, с заменой фиксированного значения параметра α на его среднее значение $E^*[\alpha]$ в каждый момент времени. Методом, развитым в (Karev, 2010), модель сводится к системе 3 неавтономных ОДЕ. Уравнение, определяющее $E^*[\alpha]$, включено в модель, что позволяет наблюдать «путешествие» $E^*[\alpha]$ по параметрическому портрету в процессе эволюции популяции и соответствующую смену динамических режимов на различных участках

траектории системы. В частности, система эволюционирует к одной из двух «чистых» стратегий, если $E^t[\alpha]$ стремится к 0 или 1. Существенно, что такой подход к параметрически неоднородным моделям позволяет исследовать нетрадиционные задачи динамики основных статистических характеристик системы, включая эволюцию распределения в целом. Исследование неоднородной модели (1) выявило несколько интересных эффектов, часть из которых показана на рисунке 1.

А) Финальная стратегия не обязательно является чистой и может существенно зависеть от начальной точки фазового пространства. Более того, возможен колебательный режим $E^t[\alpha]$, а также размера популяции и количества ресурса.

Б) Колебательный режим часто наблюдается в качестве переходного по мере приближения $E^t[\alpha]$ к стабильному значению. В большинстве случаев колебательный режим является сигналом приближения гибели всей системы, которая может осуществляться по различным сценариям.

С) Существенно новым является следующее наблюдение: направление, в котором эволюционирует система, принципиально зависит от начального распределение параметра, даже если все остальные характеристики системы одни и те же. Эффект наблюдается, например, при сравнении динамики системы с равномерным и усеченным экспоненциальным начальных распределениях. Следовательно, результат «естественного отбора» стратегий зависит не только от «правил» динамики, но и от начальной композиции популяции организмов, «играющих» по этим правилам.

Рисунок 1. Слева: динамика численности популяции, количества ресурса и среднего значения параметра α (сверху вниз). Справа: динамика начального равномерного распределения параметра α ; после колебательного периода отбирается чистая стратегия α=0.

Литература

Karev, G.P. On mathematical theory of selection: continuous time population dynamics // J. of Math. Biology.-2010.-V. 60.-C. 107-129.

Krakauer, D.C., Page, K.M. & Erwin, D.H. Diversity, dilemmas, and monopolies of niche construction // The American naturalist.- 2009.-v. 173.- C. 26-40.

Laland K.N., Boogert N.J. Niche construction, co-evolution and biodiversity // Ecological Economics.- 2010.- V. 69.- C.731-736.

ПЕРЕНОРМИРОВКА КОНСТАНТ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ТЕПЛОВОЙ ИНЕРЦИИ ПРИ УЧЕТЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЯХ

Карнаухов А.В.[1], Карнаухова Е.В.[1]

[1]*Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Россия*
AlexeyKarnaukhov@yandex.ru

Аннотация: в работе рассмотрены соотношения между ключевыми параметрами глобальных экологических моделей разной степени детальности. Показано, что учет положительной обратной связи «среднепланетарная температура» – «повышение концентрации паров воды в атмосфере» приводит не только к росту климатической чувствительности, но и к увеличению константы тепловой инерции. При этом константа эффективной климатической чувствительности меняется в меньшей степени, что затрудняет идентификацию параметров модели на основе данных инструментальных наблюдений.

Одним из наиболее актуальных направлений глобального моделирования является определение зависимости между наблюдаемым изменением концентрации углекислого газа в атмосфере $\rho_{CO_2}(t)$ и среднепланетарной температурой Земли $T(t)$. Задача выходит за рамки традиционных задач физики атмосферы, поскольку изменение среднепланетарной температуры влияет на весь геобиосферный комплекс явлений, определяющих химический состав атмосферы и, в частности, концентрацию парниковых газов, среди которых особую роль играют пары воды, дающие наибольший вклад (85-95%) в абсолютный парниковый эффект, наблюдаемый в настоящее время (около $35^{\circ}K$).

Зависимость изменения температуры поверхности Земли $\Delta T(t)$ от изменения концентрации углекислого газа $\Delta\rho_{CO_2}(t)$ в стационарном случае имеет вид:

$$\Delta T(t) = \sigma_{CO_2} \cdot \ln\left(\frac{\rho_{CO_2} + \Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}}\right), \tag{1}$$

где σ_{CO_2} - климатическая чувствительность (CO_2). Или для малых изменений $\Delta T(t)$:

$$\Delta T(t) = \sigma_{CO_2} \cdot \frac{\Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}}. \tag{2}$$

В уравнении (1) и, соответственно, (2) в явном виде не учитываются эффекты, связанные с наличием тепловой инерции, которая определяется, прежде всего, тепловой инерцией океанов, а также с наличием обратных связей, среди которых можно особо выделить положительную обратную связь: «среднепланетарная температура» – «повышение концентрации паров воды в атмосфере». С учетом этих факторов $T(t)$ будет определяться системой уравнений, первое из которых описывает тепловую инерцию в рамках стандартной релаксационной модели, а второе – изменение концентрации водяных паров в атмосфере Земли как функцию изменения среднепланетарной температуры:

$$\frac{dT(t)}{dT} = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\sigma_{CO_2} \cdot \frac{\Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} + \sigma_{H_2O} \cdot \frac{\Delta\rho_{H_2O}(t)}{\rho_{H_2O}} - \Delta T(t)\right); \tag{3а}$$

$$\Delta\rho_{H_2O}(t) = \varepsilon\rho_{H_2O}\Delta T(t), \tag{3б}$$

где τ – время релаксации, определяемое тепловой инерцией.

Нетрудно показать, что систему уравнений (3) можно упростить, подставив значение концентраци паров воды из второго уравнения системы (3б) в первое (3а):

$$\frac{dT(t)}{dT} = \frac{1}{\tau'} \cdot \left(\sigma'_{CO_2} \cdot \frac{\Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}} - \Delta T(t) \right). \qquad (4)$$

При этом перенормированные величины климатической чувствительности σ'_{CO_2} и времени релаксации τ' будут зависеть от коэффициента положительной обратной связи k:

$$\tau' = k\tau; \quad \sigma'_{CO_2} = k\sigma_{CO_2}, \text{ где } k = \frac{1}{\left(1 - \varepsilon\sigma_{H_2O}\right)}. \qquad (5)$$

Уравнение (4) допускает квазистационарное приближение в том случае, когда временной параметр τ_{CO_2}, описывающий скорость изменения концентрации углекислого газа, много больше перенормированного времени релаксации системы $\tau_{CO_2} >> \tau'$:

$$\Delta T(t) = \sigma'_{CO_2} \cdot \frac{\Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}}. \qquad (6)$$

Уравнение (6) по форме совпадает с уравнением (2), отличаясь только перенормированным значением константы климатической чувствительности σ'_{CO_2}, однако принципиальное различие состоит в том, что уравнение (6) описывает уже 2-х компонентный парниковый эффект (CO_2 + H_2O). Еще одним частным случаем релаксационной модели (4) будет случай, когда изменение концентрации CO_2 будет происходить по экспоненциальному закону:

$$\Delta\rho_{CO_2}(t) = \Delta\rho_{CO_2}(t_0) \cdot \exp\left(\frac{t - t_0}{\tau_{CO_2}}\right) \quad \Rightarrow \quad \Delta T(t) = \tilde{\sigma}_{CO_2} \cdot \frac{\Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}}. \qquad (7)$$

Этот частный случай весьма важен, поскольку изменение концентрации CO_2 за последние 200 лет, вызванное антропогенной деятельностью, хорошо описывается экспоненциальным законом. В этом случае уравнение (7) также принимает форму, аналогичную уравнению (2), но константа эффективной климатической чувствительности $\tilde{\sigma}_{CO_2}$ будет зависеть уже не только от коэффициента k, но и от параметров τ' и τ_{CO_2}:

$$\tilde{\sigma}_{CO_2} = \frac{\tau_{CO_2}}{\tau_{CO_2} + \tau'} \sigma'_{CO_2} = \frac{\tau_{CO_2}}{\tau_{CO_2} + k\tau} k\sigma_{CO_2}. \qquad (8)$$

Как мы видим, более детальное рассмотрение модели и учёт дополнительных параметров приводит к появлению трех различных величин климатической чувствительности: первичной σ_{CO_2}, перенормированной σ'_{CO_2} и эффективной $\tilde{\sigma}_{CO_2}$. Представляется важным привести приближенные оценки обсуждаемых параметров и кратко указать источники получения этих оценок:

1. $\sigma_{CO_2} \approx 3.7^\circ$ K (2.5° K – для 2xCO_2) – модельные численные расчеты;
2. $\tau \approx 20$ лет – аналитические оценки для конвективного слоя мирового океана;
3. $\sigma'_{CO_2} \approx 37^\circ$ K – радиационно-адиабатическая модель (Карнаухов, 2001,2008);
4. $\tau_{CO_2} \approx 45$ лет – инструментальные наблюдения;
5. $\tilde{\sigma}_{CO_2} \approx 6.7^\circ$ K (4.5° K – для 2xCO_2) – инструментальные наблюдения.

Отметим самосогласованность полученных оценок. Так, из соотношения (5) с учетом $\sigma_{CO_2} \approx 3.7^\circ$ K и $\sigma'_{CO_2} \approx 37^\circ$ K можно оценить коэффициент положительной обратной связи $k \approx 10$ и перенормированную величину тепловой инерции $\tau' \approx 200$ лет. В свою очередь, на основе этих параметров и параметра $\tau_{CO_2} \approx 45$ лет можно оценить величину эффективной

климатической чувствительности $\tilde{\sigma}_{CO_2}$ из уравнения (8), которая будет соответствовать инструментально наблюдаемым величинам $\tilde{\sigma}_{CO_2} \approx 6.7^{\circ}$ K (4.5° K – для 2xCO_2).

Литература

Карнаухов А.В. Роль биосферы в формировании климата Земли. Парниковая катастрофа. Биофизика.- 2001.- Т. 46.- №6.- С. 1138–1149.
Карнаухов А.В., Карнаухова Е.В. Биофизика.- 2008.- Т. 53.- №5.- С. 849–855.

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ АНТАРКТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ «ВОСТОК» И «КУПОЛ С»

Карнаухов А.В.[1], Карнаухова Е.В.[1]

[1]*Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Россия*
AlexeyKarnaukhov@yandex.ru

Аннотация: в работе приводится оценка параметра стационарной климатической чувствительности Земли на основе палеоклиматических данных, полученных с использованием химического и изотопного анализа ледяных кернов двух антарктических станций – «Восток» и «Купол С». Результат хорошо согласуется с радиационно-адиабатической теорией 2-х компонентного (CO_2+H_2O) парникового эффекта (Карнаухов А.В., 2001).

Одним из базовых параметров климатической системы Земли является параметр стационарной климатической чувствительности σ_{Σ}, который входит в качестве коэффициента пропорциональности в уравнение, определяющее зависимость изменения среднепланетарной температуры $\Delta T(t)$ от $\Delta\rho_{CO_2}(t)$ в случае медленных изменений концентрации CO_2 в атмосфере и с учетом всех имеющихся в системе обратных связей:

$$\Delta T(t) = \sigma_{\Sigma} \cdot \ln\left(\frac{\rho_{CO_2} + \Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}}\right). \quad (1)$$

Чем выше коэффициент климатической чувствительности σ_{Σ}, тем реальнее опасность развития парниковой катастрофы.

Рисунок 1. Палеоклиматические данные: **а** – концентрация CO_2, полученная путем комбинации данных со станции «Восток» (0–420 тыс. лет) и «Купола С» (390–650 тыс. лет); **б** –содержание дейтерия в керне льда, полученном на станции «Купол С» (верхний график) и на станции «Восток» (нижний график).

В различных моделях теоретические значения величины климатической чувствительности Земли сильно отличаются. Например, в рамках радиационно-адиабатической модели при учете парниковых свойств паров воды и при условии сохранения средней величины относительной влажности получены оценки $\sigma_{\Sigma} \approx \sigma'_{CO_2} \approx 37^{\circ}\,\mathrm{K}$. (Карнаухов, 2001). Эта величина значительно превышает оценки для эффективной климатической чувствительности, а также теоретические оценки, выполняемые без учета парниковых свойств паров воды $2.3 \div 6.7^{\circ}\,\mathrm{K}$ (IPCC, 2001). Подробнее о связи различных констант см. статью в настоящем сборнике (Карнаухов, Карнаухова, 2011).

В настоящей работе представлены результаты обработки палеоклиматических данных за последние 650 тысяч лет на основе независимо полученной на антарктических станциях «Восток» и «Купол С» информации о вариациях во льду концентраций дейтерия, зависящего от температуры, и диоксида углерода (рисунок 1). Нами получены формулы для линейной, квадратичной и кубической аппроксимации экспериментальной зависимости изменения концентрации дейтерия $\Delta D(‰)$ от величины $l = \ln\left(\dfrac{\rho_{CO_2} + \Delta\rho_{CO_2}(t)}{\rho_{CO_2}}\right)$ за период 0–650 тыс. лет (рисунок 2). Уравнение (2) описывает квадратичную аппроксимацию:

$$\Delta D(l) = (181.5 \pm 56.8)\cdot l^2 + (182.1 \pm 24.3)\cdot l - (391.3 \pm 2.3) \quad . \qquad (2)$$

Рисунок 2. Зависимость концентрации дейтерия от величины ***l***. Точки – экспериментальные данные, линии (1–линейная регрессия, 2 – квадратичная). Темные точки – «Купол С», светлые – «Восток».

Стационарная климатическая чувствительность определяется исходя из соотношения: $\sigma_{\Sigma}(l) = \Delta D(l)/\Delta l$. С учетом того, что эта величина обычно представляется в градусах, а изменение концентрации дейтерия на $6‰$ соответствует понижению температуры на $1^{\circ}\,\mathrm{K}$ (Jouzel J, 1987), для квадратичной аппроксимации имеем:

$$\sigma_{\Sigma}(l) = \left((60.5 \pm 18.8)\cdot l + (30.4 \pm 4.1)\right)^{\circ}\,\mathrm{K} \quad . \qquad (3)$$

Нами также была рассмотрена 4-х параметрическая аппроксимация вида:

$$\Delta D(l) = c + d\,(l + \sqrt{(l-a)^2 + b^2}\,) \,. \qquad (4)$$

Преимуществом данной модели по сравнению с (2) является физически обоснованное асимптотическое поведение аппроксимируемой функции $\Delta D(l)$ как при $l \to -\infty$ так и при $l \to \infty$.

Рисунок 3. Зависимость σ_Σ от концентрации ρ_{CO_2} в атмосфере: А – квадратичная модель (А1, А2 – доверительные интервалы); В – 4-х параметрическая модель; С, С1 и С2 –значение и доверительный интервал стационарной климатической чувствительности σ'_{CO_2}

На рисунке 3 приведены зависимости стационарной климатической чувствительности от концентрации диоксида углерода, полученные на основе регрессионных моделей (2) и (4). Видно, что для высоких значений концентраций диоксида углерода $\rho_{CO_2} \geq 300\,ppm$ регрессионные модели находятся в хорошем соответствии с теоретической значением климатической чувствительности для 2-х компонентного парникового эффекта (CO_2+H_2O), вычисленной с учетом сильной положительной обратной связи «среднепланетарная температура» – «концентрация паров воды в атмосфере». $\sigma'_{CO_2} = 59^0C \pm 22^0C$ (Карнаухов, 2001), которое отображено на рисунке (3) пунктирными линиями С, С1 и С2.

Уменьшение $\sigma_\Sigma(\rho_{CO_2})$ при снижении ρ_{CO_2} обусловлено повышением вклада поверхности Земли в суммарное тепловое излучение при снижении глобальной температуры, что, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента положительной обратной связи.

Литература

Карнаухов А.В. Роль биосферы в формировании климата Земли. Парниковая катастрофа. Биофизика.- 2001.- Т. 46.- №6.- С. 1138–1149.

IPCC. IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge. Cambridge University Press, 2001.- P. 994.

Jouzel J., Lorius C., Petit J.R. et al. Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years). Nature.- 1987.- V. 329.- P. 403–409.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ ГЛОБАЛЬНЫХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Картушинский А.В.[1,2]

[1]*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*
kartalvas@rambler.ru
[2]*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*
kartalvas@rambler.ru

Аннотация: представлены результаты численного моделирования переноса тепла и формирования горизонтальных температурных фронтальных зон в океане с использованием спутниковых данных. Показаны пространственно-временные масштабы структурной организации неоднородных зон хлорофилла и температуры в поверхностном слое океана с использованием долговременных рядов спутниковых наблюдений и статистической обработки данных. На основе одномерной численной модели вертикальной структуры водной экосистемы, включающей концентрацию лимитирующего биогенного элемента, биомассу фитопланктона с соответствующими биотическими показателями, показаны определенные закономерности структурной организации озерных экосистем под действием гидрофизических процессов для стратификационных условий с различным уровнем солености.

Введение

Принципиальную важность при математическом моделировании водных экосистем приобретает необходимость оценки действия факторов окружающей среды на живые организмы. Основным продукционным звеном, в данном случае, является фитопланктон, который при соответствующем распределении биомассы, формирует кормовую базу для других звеньев пищевой цепи. Неоднородность пространственного распределения фитопланктона обусловлена его биологической активностью функционирования и физическими механизмами воздействия внешней среды. В глобальном и региональном масштабе структурная организация водных экосистем связана с обменными процессами, протекающими с различной интенсивностью в горизонтальном и вертикальном направлении, что приводит к соответствующей стратификации фитопланктона. Период времени, в течение которого осуществляется внешнее воздействие, устойчивое состояние водной среды определяет возможности адаптации организмов к изменяющимся условиям существования и воспроизводства. Таким образом, наиболее важными показателями структурной организации распределения фитопланктона можно считать пространственные и временные масштабы изменчивости градиентных зон. Такие факторы, как адвективный и конвективный перенос тепла и массы, интенсивность турбулентной диффузии в водных системах приводят к неоднородному распределению живых организмов, изменяя условия структурной организации системы в целом. В механизме эволюции водных систем специфика внешнего воздействия отражена в цикличности динамических процессов и факторов, которые часто выступают в качестве генератора, обеспечивающего оптимальную настройку трофических связей внутри экосистемы.

Объекты и методы

В работе показаны результаты математического моделирования динамических процессов ответственных за формирование устойчивых фронтальных зон как биологического, так и физического уровня. Для исследования структурной организации полей температуры и хлорофилла в океане используется программное обеспечение, способного обрабатывать большие объемы спутниковых данных и проводить оценку изменчивости поверхностного слоя Мирового океана. Исходными данными для программного продукта являются долговременные ряды средненедельных (а так же композиты для других пространственно-временных интервалов) спутниковых данных по

температуре поверхностного слоя Мирового океана (SST) и концентрации хлорофилла «а». Для проведения соответствующих расчетов применяется универсальный формат данных, позволяющий привести данные полученные из различных источников к единой форме. В работе используются данные полученные из следующих источников: PODAAC (http: - podaac.jpl.nasa.gov) и OceanColor (http: - oceancolor.gsfc.nasa.gov).

В работе используется одномерная математическая модель, позволяющая оценивать роль отдельных факторов влияющих на вертикальную структуру пространственного распределения фитопланктона. Модель позволяет оценивать действие следующих факторов: - метеорологических (интенсивности солнечной радиации, ветрового воздействия, дождевых осадков, испарения); - гидрофизических факторов (скорости вертикального переноса воды, плотностной стратификации, турбулентной диффузии); - гидробиологических факторов (вертикальное распределение света в воде, концентрация лимитирующего биогенного элемента, скорость роста и отмирания фитопланктона). Для моделирования различных стратификационных условий в водных экосистемах с различным режимом солености, применяется модель, основанная на детерминированном подходе с численной аппроксимацией решения дифференциальных уравнений переноса тепла и соли под действием турбулентной диффузии, скорости вертикального переноса воды, осадков и испарения. Калибровка модели и оценка точности результатов численного моделирования проводится по натурным данным для пресного озера Байкал и солоноватого озера Шира (Хакасия), основанным на измерениях метеорологических, гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров. Главным отличием от полученных ранее результатов является применение в модели данных измерений компонент скорости течений, полученных приборами основанных на доплеровском эффекте.

Результаты и выводы

В данной работе, на примере численных экспериментов, посредством 1-D и 2-D моделей тепло- и массопереноса в отдельных районах океана и озерах, откалиброванных с учетом результатов натурных измерений, в том числе и спутниковых данных, рассматривается возможность применения параметрических соотношений для анализа и прогноза пространственно-временных интервалов устойчивого распределения фитопланктона. В работе обоснована методологическая концепция объединения кинетических показателей функционирования фитопланктона и динамических характеристик гидрологических образований при оценке пространственно-временных интервалов функционирования неоднородностей фитопланктона. Показана согласованность биологических и физических процессов в водных системах в пределах пространственно-временных границ влияния отдельных гидрофизических явлений и процессов. В работе используются данные численных экспериментов на математической модели для описания связи: структурные изменения параметров среды обитания - пространственно-временные изменения биотических компонент водной экосистемы. Моделируется воздействие на фитопланктон факторов, связанных с турбулентным перемешиванием, вертикальными движениями вод, распределением пищи и света. Анализируется влияние отдельных факторов на формирование неоднородностей по вертикали и горизонтали (плоская задача). Для оценки механизмов формирования горизонтальных неоднородностей фитопланктона проводится анализ пространственно-временной изменчивости фронтов в океане и анализируется соответствие высокоградиентных температурных зон зонам с различной концентрацией хлорофилла океане. Представлены параметрические зависимости для оценки пространственной локализации неоднородностей фитопланктона на основе данных численного моделирования и обработки спутниковой информации.

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ

Ковалев А.В.

Международный научный центр исследования экстремальных состояний организма КНЦ СО РАН
sunhi@nm.ru

Аннотация: в рамках созданной автором компьютерной программы моделирования динамики численности лесных хвоегрызущих насекомых разработан оптимизационный метод подбора параметров модели.

Для изучения популяционной динамики лесных насекомых-филлофагов и их взаимодействия с окружающей средой и кормовыми растениями была создана компьютерная среда конструирования и анализа моделей динамики численности насекомых. В рамках данного подхода созданы модели таких опасных вредителей лесов Сибири как сибирский шелкопряд *Dendrolimus superans sibiricus* Tschetv. и сосновая пяденица *Bupalus piniarius* L. Разрабатываемые модели собираются из набора переходов по стадиям жизненного цикла данного вида, характерных внешних воздействий, хранилищ текущих свойств популяции. При этом на каждой итерации разработки сохраняется работоспособность модели, возможность изучения полученных результатов и внесения модификаций.

Каждая разрабатываемая модель представляет собой многолетние изменения плотности популяции в точечном местообитании с учетом как собственных характеристик популяции (масса, физиологические особенности, стратегии поведения), так и воздействия внешних факторов. В модели предусмотрены механизмы обратных связей для факторов, которые регулируют плотность популяции, но при этом изменяются сами (кормовой ресурс, паразиты, вирусы). Результатом расчета модели является многолетняя динамика численности популяции при заданных условиях или их изменении. Говоря о динамике численности, мы подразумеваем наличие характерных для хвоегрызущих насекомых Сибири вспышек массового размножения, их частоту и амплитуду.

При построении таких моделей существует две группы параметров, значения которых довольно сложно получить в ходе полевых наблюдений. Это точные значения факторов внешней среды в локальном местообитании (температура, влажность, осадки, паразиты и хищники, наличие и качество корма) и вид/коэффициенты функций воздействия этих факторов на изучаемую популяцию. Для факторов внешней среды предложено генерация их значений в каждый конкретный момент времени как случайной величины с определенной функцией распределения. Функция распределения, среднее значение, дисперсия определяются на основе многолетних полевых наблюдений для каждого фактора. Вид функции воздействия может быть получен исходя из знаний о биологии вида или на основе лабораторных экспериментов изучения отдельных воздействий.

Однако коэффициенты функции воздействия специфичные для локального местообитания не могут быть получены экспериментально и могут быть указаны лишь приблизительно. Для их уточнения был разработан метод оптимизации параметров имитационных моделей динамики численности лесных насекомых. В основу метода была положена гипотеза об эволюционном отборе встречаемых в природе видов. Для эруптивных (вспышечных) видов насекомых это означает, что в ходе эволюции сформировались те виды, чьи значения коэффициентов функций воздействия обеспечивают максимальный коэффициент размножения и реализацию вспышечных режимов динамики численности.

Для оценки изменения типа популяционной динамики при количественных изменениях значений отдельного коэффициента вводится интегральный показатель типа популяционной динамики q спектра временного ряда:

$$q = \frac{\int_{0.1}^{0.2} I(\omega)d\omega}{\int_{0.4}^{0.5} I(\omega)d\omega} \qquad (1)$$

где в числителе – мощность низкочастотной составляющей спектра модельной популяционной динамики, а в знаменателе - мощность высокочастотной составляющей спектра модельной популяционной динамики.

Если в ряде модельной динамики регулярно возникают мощные вспышки массового размножения, то значение числителя в (1) становится существенно больше значения знаменателя и тогда q>>1. Если в модельном ряде динамики не наблюдаются вспышки массового размножения, то либо q<<1, либо q≈1 (в этом случае спектр популяционной динамики близок к спектру белого шума).

Расчет интегрального показателя q позволяет использовать его как критерий многомерной оптимизации по пространства коэффициентов функций воздействия модели. Нахождение глобального максимума этого пространства будет тем эволюционно обусловленным набором параметров модели, которое соответствует данному виду в локальном местообитании. Дальнейший анализ модели позволяет сделать выводы о уходе популяции из оптимальных условий обитания при реализации различных сценариев изменения окружающей среды.

Работа поддержана РФФИ (грант 10-04-00256).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОСТА ДЕРЕВА К ОПИСАНИЮ И АНАЛИЗУ МЕЖВИДОВОЙ КОНКУРЕНЦИИ В ДРЕВОСТОЕ

Колобов А.Н., Фрисман Е.Я.

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия
alex_0201@mail.ru

Аннотация: рассмотрены результаты построения и исследования математической модели описывающей рост и взаимодействие деревьев в процессе конкуренции за свет. Проведен качественный анализ поведения модели при различных значениях параметров, определяющих скорость роста деревьев. В рамках этой модели было показано различие между темнохвойными и светолюбивыми видами в их реакции на условия освещенности.

Описание модели

Для исследования динамики древесных сообществ и решения задач оптимизации лесопользования широко применяются средства математического и компьютерного моделирования. Одним из ведущих процессов формирующих видовой состав фитоценозов, а также пространственную структуру растительных сообществ, является конкуренция. Моделирование процессов конкуренции сводится к двум основным подходам. В первом случае мера недостатка ресурса выражается через соотношение между доступной и требуемой площадью питания. Второй подход основан на вычислении меры влияния соседних деревьев, используется при описании ослабления роста в результате затенения со стороны окружающего древостоя (Daniels, 1986, Pukkala, 1987). Предлагаемая в настоящей работе модель относится ко второму типу. При описании роста дерева в сообществе учитываются условия произрастания, которые формируются в результате влияния рядом стоящих деревьев через изменение доли солнечной радиации, приходящейся на данное растение.

Рост дерева, учитывая влияния конкуренции со стороны окружающего древостоя, описывается следующими уравнениями

$$\begin{cases} \dfrac{dV}{dt} = \dfrac{a \cdot (1 - \exp(-k \cdot V)) \cdot P_m \cdot Q}{a \cdot (1 - \exp(-k \cdot V)) \cdot Q + P_m \cdot (k \cdot V)} \cdot bV - cVH \\ \dfrac{dH}{dt} = \alpha H \cdot (H_{\max} - H) \\ D = \sqrt{\dfrac{4V}{\pi \cdot H \cdot f}} \end{cases}$$

где V – объем дерева (м3), H – высота (м), D – диаметр (см), *a* - начальная крутизна световой кривой, показывает зависимость фотосинтеза от интенсивности освещения, k – параметр, характеризующий самозатенение, Pm – интенсивность фотосинтеза единицы листовой поверхности, Q — доля солнечной радиации при затенении окружающим древостоем, f — видовое число, показывающее отклонение от идеального цилиндра.

Доля солнечной радиации, приходящейся на *i*-ое дерево при затенении окружающим древостоем, определяется выражением

$$Q_i = \sum_{s=1}^{n-1} \left[\sum_{\substack{j_1=1 \\ j_1 \neq i}}^{n} \sum_{\substack{j_2=2 \\ j_2 \neq i}}^{n} \ldots \sum_{\substack{j_s=j_{s-1}+1 \\ j_s \neq i}}^{n} \exp(-\sum_{r=1}^{s} k_{j_r i} x_{j_r i}) q_{j_1 \ldots j_s i} \right] + q_{0i} \ .$$

где q_{0i} - доля открытой части кроны *i* – го дерева, $q_{j_1 \ldots j_s i}$ - доля кроны *i* – го дерева перекрываемая s раз другими деревьями, k_j - коэффициент затенения соответствующим видом дерева.

Результаты исследования модели

Для изучения межвидовых взаимодействий в древесных сообществах, а также апробации модели на ряде таблиц хода роста, проведены вычислительные эксперименты по данным таксационных характеристик основных лесообразующих пород Дальнего Востока. В качестве базовых видов, рассматривались: ель сибирская (picea obovata), пихта белокорая (nephrolepis), кедр корейский (pinus koraiensis) и береза желтая (betula costata).

Результаты моделирования двувидовых сообществ различных комбинаций рассматриваемых видов показали, что светолюбивая береза находится в угнетенном состоянии при взаимодействии с елью и кедром, несмотря на ее преимущественные размеры. При этом темнохвойные виды оказывают слабое угнетение друг на друга. Причина такого явления находится в различной реакции видов на изменения освещенности.

Рисунок 1. Графики изменения относительного объема светолюбивого и темнохвойных видов в зависимости от изменения светового режима

Численное исследование модели роста дерева позволило обнаружить некоторые принципиальные различия эколого-физиологических параметров темнохвойных и светолюбивых видов в их реакции на изменение светового режима. Кривая зависимости относительного объема ствола от степени освещенности для светолюбивой породы резко отличается своим быстрым падением, в то время как для темнохвойных видов эти кривые более плавные и до некоторого момента имеют одинаковые значения (рисунок 1). Такие различия позволяют сделать вывод, что световой режим, формируемый темнохвойными видами, который является благоприятным для их роста, не подходит для светолюбивых видов (в частности березы), что объясняет смену пород в елово-березовом древостое.

Результаты аналитического исследования модели показали, что реакция вида на изменение светового режима зависит от величины параметров p - самозатенение и a – интенсивность фотосинтеза при низкой степени освещения. При одновременном увеличении этих параметров график изменения относительного объема от доли солнечной радиации смещается влево по оси x, то есть уменьшается световой порог выживаемости дерева. Таким образом, данная модель позволяет количественно охарактеризовать минимальный порог выживаемости видов в условиях лимитирования световых ресурсов.

Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-04-00146-а) и ДВО РАН (проект № 09-I-П23-12, 11-III-В-06-130).

Литература

Daniels R., Burkhart H., Clason T. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees // Canad. J. Forest Res.- 1986.- V. 16.- P. 1230-1237.

Pukkala T., Kolström T. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine // Silva Fennica.- 1987.- V. 21.- P. 55-76.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА БИОСФЕРЫ

Корж В.Д.
Учреждение Российской Академии Наук Институт Океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Россия
okean41@mail.ru

Ключом к определению специфики формирования элементного состава биосферы является исследование закономерностей перераспределения средних концентраций элементов между различными фазами: твердой – жидкой – газообразной (литосфера – гидросфера – атмосфера), происходящего в результате глобального непрерывного процесса переработки косной материи «живым веществом». Элементные составы мы рассматриваем как целостные системы, обладающие собственным уровнем организации и эмерджентностью, т.е. несводимостью свойств системы к сумме свойств элементов ее составляющих (Корж В.Д. 1999, 2003, Korzh V. 2008).

График зависимости средних элементных составов океанской и речной воды представлен на рисунке 1. При количестве изученных элементов, равном 64, коэффициент корреляции равен 0,94. Практическое равенство тангенса угла наклона линии, полученной методом линейной регрессии, и линии, отражающей закономерность трансформации и миграции вещества на барьере океан-атмосфера, свидетельствует о равенстве констант нелинейности процессов перераспределения средних элементных составов между растворенной и твердой фазами на абсолютно разных геохимических барьерах океан-атмосфера и река-море. Принципиальная общность этих геохимических барьеров состоит в том, что они являются местами «сгущения жизни». Регрессионный анализ позволил выявить общую тенденцию относительного увеличения концентраций микроэлементов в твердой фазе (и соответствующего уменьшения в растворе) в результате переработки косной материи «живым веществом» на геохимических барьерах океан-атмосфера и река-море.

Рисунок 1. Соотношение между средними концентрациями растворенных форм элементов (моль/л) в океанской и речной воде

Рисунок 2. Соотношение средних концентраций химических элементов (моль/кг) в литосфере и каменных метеоритах (хондритах)

Графический способ сопоставления средних элементных составов каменных метеоритов (протопланетного вещества) и литосферы, представлен на рисунке 2. Коэффициент корреляции между представленными в логарифмической форме концентрациями элементов в протопланетном веществе и в литосфере для 71 изученного химического элемента равен 0,87. Тангенс угла наклона регрессионной прямой равен 0,75. Это численное значение тангенса является количественной оценкой фактора нелинейности общего процесса эволюции элементного состава в системе протолитосфера – «живое вещество» – биосфера.

Впервые найдена общая закономерность процесса перераспределения элементных составов в биосфере между твердой и жидкой фазами (литосфера – гидросфера). Этот процесс наиболее активен на биогеохимических барьерах, т.е. в местах «сгущения жизни», и проходит по ранее неизвестному нелинейному закону. Установлено, что результатом этого процесса является общее относительное увеличение в твердой фазе концентраций химических элементов по мере уменьшения их распространенности в окружающей среде. Следовательно, перевод химических элементов в менее растворимые соединения – это общая специфическая реакция «живого вещества» на дефицит их концентраций в среде обитания.

Литература

Корж В. Д. Биогеохимические аспекты формирования элементного состава вод Мирового океана // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. Труды Биогеохимической Лаборатории т. 23.- М.: Наука. 1999.- С. 6-37.

Корж В.Д. Специфика формирования элементного состава биосферы // Докл. РАН.- 2003.- Т. 392, № 4.- С. 517-520.

Korzh V. The general laws in the formation of the elemental composition of the Hydrosphere and Biosphere // J. Ecologica, Vol. XV, 2008.- P. 13-21.

СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГИДРОСФЕРЕ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТАНДАРТ

Корж В.Д.

Учреждение Российской Академии Наук Институт Океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Россия
okean41@mail.ru

Аннотация: элементный состав морей и океанов является результатом процессов миграции и трансформации вещества на биогеохимических барьерах река-море и океан-атмосфера, т.е. в местах "сгущения жизни". Стабильность этих процессов – главное условие стабильности экосистемы гидросферы. Построена Система химических элементов в гидросфере, которая выявила зависимость между тремя основными геохимическими характеристиками растворенных форм элементов. Она может быть использована в качестве экологического эталона естественного, **нормального** состояния гидросферы.

Современные проблемы нахождения допустимых пределов воздействия техносферы на биосферу, оптимизации взаимодействия техносферы и биосферы, прогнозирования экологических последствий инцидентов и организации реабилитации в послеаварийный период предъявляют качественно новые требования к знаниям. Решение этих актуальных проблем требует разработки новых методологических основ изучения глобальных циклов химических элементов, построения геохимических систем элементов. Химический состав морей и океанов является результатом процессов миграции и трансформации вещества на биогеохимических барьерах река-море и океан-атмосфера, т.е. в местах "сгущения жизни".

Стабильность этих процессов – главное условие стабильности экосистемы гидросферы. Биогеохимическим критерием наиболее адекватно отражающим экологическое состояние гидросферы и ее отдельных частей может служить мера близости кинетических констант названных процессов, происходящих в реальных условиях, соответствующим константам определенным в "нормальных условиях" (Корж, 1994).

Нами разработана методология, использующая принципы синергетики, изучения закономерностей формирования элементного состава морской воды (Корж 1991, 1994, 1999). Моря и океаны мы рассматриваем как сложные саморазвивающиеся системы с бесчисленными процессами трансформации вещества, проходящего через геохимические барьеры. Результатами этих процессов являются: средний элементный состав океана, средний элементный состав донных осадков и т.п. При этом элементный состав необходимо рассматривать как целостную систему, а не сумму отдельных элементов.

Новая системная методология привела к постулату: **биогеохимическая особенность каждого элемента определяет своеобразие зависимости между его содержанием (средней концентрацией) в океане и интенсивностью процессов его миграции через барьерные зоны гидросферы** (Корж, 1991, 1999, 2001)**.** Графический способ представления постулата обладает наибольшей информативностью при сопоставлении интенсивности процессов переноса элементов в барьерных зонах гидросферы с их средними концентрациями в океане на плоскости **lg $C_{ок}$ - lg $\tau_{ок}$** (рисунок 1), где **$C_{ок}$** - концентрация элементов в океане (моль/л); **$\tau_{ок}$** – время пребывания элементов в океане, определяемое как частное от деления общего количества элемента растворенного в океане на его количество вносимого в океан с речным стоком (в растворенной форме) за год. На графике представлены основные геохимические сведения о растворенных формах элементов в гидросфере. Линии, параллельные оси ординат, позволяют определить концентрации в океане растворенных форм химических элементов. Линии, параллельные оси абсцисс, позволяют определить время пребывания растворенных форм элементов в океане. Линии, проходящие под углом 45° к осям абсцисс и ординат, выявляют средние концентрации элементов в речном стоке (моль/л) в растворенной форме.

Рисунок 1. Система химических элементов в гидросфере

Система позволила определить зависимость между тремя основными геохимическими характеристиками растворенных форм элементов в гидросфере: средние концентрации в океане, в речном стоке и тип распределения в океанской воде. Таким образом, мы получили возможность использовать две из трех указанных геохимических характеристик для теоретического определения (предсказания) третьей.

Система создана в рамках современных знаний о содержании элементов в океане и речном стоке. Уточнение этих знаний, а также знаний процессов обмена элементами на всех геохимических барьерах гидросферы, приведет к ее развитию и совершенствованию. Уже в настоящее время с ее помощью удалось с большой точностью предсказать **нормальную** величину ежегодной поставки в океан речным стоком в растворенной форме Be, C, N, Ge, Tl, Re, исправить и уточнить эту оценку для P, V, Zn, Br, I, определить характер распределения в океане W, Au и U. Последующие независимые исследования подтвердили наши предсказания. В дальнейшем будет возрастать ее роль как экологического эталона естественного, **нормального** состояния гидросферы.

Литература

Корж В.Д. Геохимия элементного состава гидросферы.- М.: Наука, 1991.- 243 с.

Корж В.Д. Макрокинетика формирования элементного состава океанской и морской воды. // Океанология.- 1994.- Т.34.- Вып.2.- С.224—227.

Корж В.Д. Биогеохимические аспекты формирования элементного состава вод Мирового океана// Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. Труды Биогеохимической лаборатории. Т. 23.- М.: Наука. 1999.- С. 6-37.

Корж В.Д. Геохимические критерии оценки экологического состояния гидросферы // Сибирский экологический журнал.- 2001.- Том 8.- №2.- С. 223-230.

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРЕАЛОВ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД РОССИИ

Корзухин М.Д.[1], Цельникер Ю.Л., Семенов С.М.,[1] Титкина С.Н.[1]
[1]Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, Москва, Россия
mdkorz@comtv.ru

Аннотация: цель работы состояла в количественном описании ареалов восьми видов деревьев на территории России в зависимости от основных климатических факторов. Для этого распространенная биохимическая модель фотосинтеза (Farquhar et al., 1980) была объединена с несложной авторской моделью баланса углерода дерева. <32> Расчётные и наблюдаемые ареалы совпали удовлетворительно, за исключением ели и лиственницы.

Объект

Объектами моделирования были три хвойных и пять лиственных лесных пород: виды лиственницы (*Larix ssp*), ель европейская, сибирская и аянская (*Picea abies*, *P. obo-vata* и *P. ajanensis*), сосна обыкновенная и кедровая (*Pinus sylvestris* и *P. pumila*), клён ост-ролистный (*Acer platanoides*), береза поникшая и пушистая (*Betula pendula* и *B. pubescens*), ясень европейский (*Fraxinus excelsior*), дуб черешчатый (*Quercus robur*), липа мелко-листная (*Tilia cordata*). Наблюдаемые ареалы распространения видов взяты по «Атлас…» (1988).

Метод

Эколого-физиологическая модель описана в (Корзухин и др., 2008; Корзухин и Цельникер, 2009, 2010). Удельная нетто–ассимиляция листа находится по биохимической модели Фаркуара (Farquhar et al., 1980), затем находится нетто-продуктивность среднего дерева A_{nettree}, и окончательно – насаждения $NPP = LAI \times A_{\mathrm{nettree}}$, где LAI – листовая поверхность полога. Вводится величина критического значения ассимиляции, A_{crit}, ниже которой вид (среднее

дерево) расти не может. Соответственно, можно найти $NPP_{crit} = LAI \times A_{crit}$. Размерности NPP, $A_{nettree}$ – гС м$^{-2}$ год$^{-1}$.

Центральная гипотеза подхода (принята в модельных работах) состоит в том, что вид считается обитающим в данной точке, если его первичная продукция $NPP > NPP_{crit}$.

Климатические данные. Модель оперирует шестью метеорологическими (экологическими) факторами: Q – интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР), мкмоль м$^{-2}$ с$^{-1}$; T_a – температура воздуха, ^oC; D – дефицит влажности воздуха, гПа; T_s – температура почвы (бралась равной T), ^oC; W – абсолютный запас доступной влаги в почве, мм; C_a – концентрация CO_2 в воздухе, ppm.

Q находилось по эмпирическим формулам, учитывающим балл облачности n, W – по подмодели испарения и влажности почвы, использующей осадки P, D и T_a. Величины D, T_a, n брались по данным измерений в 2460 пунктах (местах расположения метеостанций) на территории бывшего СССР. Все величины для каждой станции были усреднены по всему сроку наблюдения, с получением траекторий для одного года. C_a задавалась сценарно.

Нахождение параметров. Каждый вид в модели требует задания около сорока параметров, большая часть которых слабо влияет на результат (величину NPP); они были взяты из литературы. Сильно влияющие параметры были найдены из условия наилучшего описа-ния наблюдаемого ареала, среди них: V_{cmax25}, φ , g_{sw}^{max}, W_{wilt} – соответственно, макси-мальная скорость карбоксилирования, квантовая эффективность фотосинтеза, максимальная устьичная проводимость для H_2O, влажность завядания, а также A_{crit}, LAI.

Результаты

Пример описания ареала дуба дан на рисунке 1, а найденные параметры – в таблице 1 (NPP_{aver} – среднее значение по ареалу). «Обитаемые» точки севернее 60°N в рамках модели – неустранимы, что взывает к модификации подхода. Было расчитан прогноз изменения ареала для сценария потепления ($T_a \rightarrow T_a$ +2°C, C_a = 420 ppm).

Таблица 1. Значения существенных параметров, найденных оптимизацией модели

Порода	V_{cmax25}, мкмоль м$^{-2}$ с$^{-1}$	φ, моль e$^-$ (моль ФАР)$^{-1}$	g_{sw}^{max}, млмоль м$^{-2}$ с$^{-1}$	W_{wilt}, мм	LAI, м^2 м$^{-2}$	NPP_{crit}, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$	NPP_{aver}, гС м$^{-2}$ год$^{-1}$
Лиственница	28	0.080	50	44	4.52	136	211
Ель	36	0.925	50	44	7.69	132	271
Сосна	32	0.130	105	52	3.57	107	239
Клен	42	0.185	90	37	2.09	155	315
Береза	44	0.244	72	30	2.95	177	346
Ясень	36	0.195	94	49	2.43	139	315
Дуб	42	0.155	108	40	2.24	166	312
Липа	44	0.155	122	37	2.14	154	313

Рисунок 1. Наблюдаемый (штриховка) и расчетный (точки) ареал дуба для ЕТР

Литература

Атлас лесообразующих пород СССР.– М.: Лесная промышленность, 1988.- 152 с.
Корзухин М.Д., Цельникер Ю.Л., Семёнов С.М. Экофизиологическая модель первичной продуктивности древесных растений и оценки климатических пределов их произрастания // Метеорология и гидрология, № 12.- 2008.- С. 56-69.
Корзухин М.Д., Цельникер Ю.Л. Анализ распространения и продуктивности четырёх лесных пород России с помощью экофизиологической модели // В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. XXII. СПб.: Гидрометеоиздат, 2009.- С. 92-123.
Корзухин М.Д., Цельникер Ю.Л. Модельный анализ современных ареалов лесных древесных пород на территории России и их вариаций при возможных изменениях климата. – В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, т. XXIII. СПб.: Гидрометеоиздат, 2010. С. 249-268.
Farquhar, G.D., von Caemmerer S., Berry J.A. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C_3 species. Planta. V. 149.- P. 78–90.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА В РЕЧНОЙ ВОДЕ

Корчагин К.А., Мессинева Е.М., Долгоносов Б.М.

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

Аннотация: исследована вариабельность численности фитопланктона в речной воде с учетом изменчивости среды вследствие сезонного хода и погодных флуктуаций. Построена функция распределения численности на основе уравнения популяционной динамики с учетом случайных факторов. Показано, что распределение численности в разные периоды года описывается

нормальным, логнормальным или логарифмическим законом в согласии с эмпирическими данными.

Современные технологии подготовки питьевой воды требуют учета численности фитопланктона в источнике водоснабжения. Особенно опасны аномально высокие значения численности, ухудшающие качество воды и осложняющие работу сооружений водоподготовки. Численность фитопланктона значительно изменяется как в зависимости сезона, так и вследствие нерегулярных флуктуаций. Задача состоит в том, чтобы оценить вероятности различных значений численности. Методология такого подхода изложена в (Долгоносов, 2009). Для решения этой задачи рассматриваются основные процессы, определяющие динамику изменения численности фитопланктона. Численность фитопланктона описывается известным в популяционной динамике уравнением Ферхюльста $dN/dt = AN(1-N/K) \equiv AN - BN^2$, где N — численность клеток фитопланктона в единице объема среды, A — коэффициент роста, $B = A/K$ — коэффициент конкуренции, K — несущая емкость среды, t — время. Вследствие флуктуаций среды A и B можно представить в виде $A = a[1+\sigma_1\xi_1(t)]$, $B = b[1+\sigma_2\xi_2(t)]$, где a и b — средние значения, $\xi_i(t)$ — стандартный белый шум, σ_i — интенсивность шума (i = 1, 2).

В зимний период, когда численность популяции мала $N << K = a/b$, уравнение приводится к виду $dN/dt = aN + a\sigma_1 N\xi_1(t)$. В период же активной вегетации численность фитопланктона колеблется в окрестности равновесных значений, поэтому $N \approx K$ и $aN - bN^2 \approx 0$, и уравнение может быть представлено как $dN/dt = c + aK[\sigma_1\xi_1(t) + \sigma_2\xi_2(t)] + c\sigma_3\xi_3(t)$, где последний член описывает аддитивный внешний шум небиологической природы, а c – регулярная часть внешнего воздействия.

Стохастичность динамики вынуждает обратиться к описанию на основе статистического ансамбля. В результате указанные стохастические уравнения преобразуются к уравнению Фоккера-Планка относительно плотности распределения $p(N,t)$. Его решение при наличии сосредоточенного источника поступления фитопланктона в реку приводит:

для зимнего периода – к логнормальному закону распределения

$$p(N,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2|a|t}\,N}\exp\left\{-\frac{[\ln(N/N_0) - at]^2}{2\sigma_1^2|a|t}\right\},$$

для летнего периода – к нормальному закону

$$p(N,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2 K|c|t}}\exp\left[-\frac{(N - N_0 - ct)^2}{2\sigma^2 K|c|t}\right],$$

для периода межсезонья – к логарифмическому закону

$$F(N) = \frac{\nu}{|a|\Delta T}\ln\frac{N}{N_0},$$

который получается интегрированием по участкам экспоненциального роста и отмирания клеток фитопланктона (Долгоносов и др., 2010).

Полученный теоретический результат был приложен к интерпретации многолетних эмпирических данных относящихся к Москворецкому источнику водоснабжения.

Рисунок 1. Функция распределения численности в зимний период.

Рисунок 2. Функция распределения численности в летний период.

Рисунок 3. Функция распределения численности в переходный период.

Результаты аппроксимации зимнего участка логнормальным распределением, а летнего, соответственно, нормальным представлены на рисунках 1 и 2. Графики представлены в логарифмически-вероятностных (логнормаль — прямая линия) и вероятностных координатах (прямая — нормальное распределение) соответственно. По вертикали отложены квантили стандартного нормального распределения.

Для периода активного роста или отмирания функция распределения и ее аппроксимация логарифмическим законом представлены на рисунке 3. График дан в полулогарифмических координатах

Отметим общее удовлетворительное согласие теоретического распределения с эмпирическими данными, что открывает возможность для использования полученных результатов с целью вероятностного прогнозирования численности фитопланктона, в том числе пиковых значений численности.

Литература

Долгоносов Б.М., Корчагин К.А., Мессинева Е.М. Статистические распределения численности фитопланктона в речной воде // Водные ресурсы.- 2010.- Т. 37.- № 2.- С. 218-224.

Долгоносов Б.М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов.- М.: Либроком/URSS, 2009.- 440 с.

БЮДЖЕТ ПИТАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П., Паршина Е.К. [1]

[1]*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия*
npkosykh@mail.ru

Аннотация: на основе экспериментальных данных сделан расчет бюджета питательных элементов в болотных экосистемах средней тайги Западной Сибири. Запасы элементов определяются величиной фитомассы. Запасы элементов в болотных экосистемах увеличиваются в 4 раза при переходе из фитомассы в мортмассу. Потребление химических элементов увеличивается с увеличением чистой первичной продукции. В процессе ретранслокации 5 - 22% N, 6 - 15% P и 25 - 36% K от потребления возвращается в экосистему.

Особенностью биологического круговорота химических элементов в болотных экосистемах является продолжительное задерживание поглощенных химических элементов в растительном веществе. Оценка химических элементов в продукционных, деструкционных процессах, в процессе депонирования и ретранслокации органических соединений, которые составляют основу биотического круговорота, позволяет прогнозировать устойчивость болотных экосистем к климатическим изменениям в современных условиях. Целью данной работы является определение химических элементов в продукционно-деструкционных процессах, с учетом процесса ретранслокации в болотах средней тайги Западной Сибири.

Исследования проводились на ключевом участке, расположенном в подзоне средней тайги в междуречье Оби и Иртыша в окрестности г. Ханты-Мансийска (60º59' с.ш.; 70º10' в.д.). На ключевом участке было выбрано олиготрофное грядово-мочажинное выпуклое болото и обследованы следующие пробные площади: рям, гряда и олиготрофная мочажина в ГМК, мезотрофная мочажина.

На выделенных площадях послойно отбирались пробы растительного вещества до глубины 30 см. Для определения биологической продуктивности в болотных экосистемах применялись методы выделения разных фракций растительного вещества (Kosykh et all, 2008). Для определения скорости разложения применялся метод закладки растительности в мешочках в торф. Эксперименты в олиготрофных болотных комплексах в средней тайге велись в течение 3 лет.

Запасы растительного вещества в слое 30 см в экосистемах болот средней тайги в годы наблюдения варьируют от 4250 до 5500 гС/м^2. Доля фитомассы составляет 16-18%. Запасы элементов в большей степени определяются величиной массы, зависят от типа экосистемы и увеличиваются в ряду: олиготрофные мочажины→ гряды → мезотрофные топи → рямы. Количество химических элементов в мертвом органическом веществе больше, чем в живой биомассе, при этом концентрация элементов уменьшается. Запасы фитомассы в болотных экосистемах средней тайги изменяются от 600 до 1300 гС/м^2 и определяются типом болота, растительным сообществом. В период функционирования экосистем в *сосново-кустарничково-сфагновых сообществах* рямов и гряд накопление в живой фитомассе достигает около 32.7-34.0 г/м^2 элементов питания, в том числе азота 14-15г/м^2, кальция 6.1-7.1 г/м^2, калия 8.1-8.5 г/м^2, магния 2.6-2.9 и фосфора 1.05 г/м^2. В *осоково-сфагновых сообществах* мезотрофной топи эти показатели составляют соответственно 12.8, 11.03, 5.58, 1.71 и 1.0 г/м^2. В *пушицево-осоково-сфагновых сообществах* олиготрофных мочажин емкость круговорота элементов питания вдвое меньше.

Чистая первичная продукция болотных экосистем средней тайги изменяется от 330 до 560 гС/м^2 в год и уменьшается в ряду экосистем: мезотрофная мочажина, рям, гряда, олиготрофная мочажина. Максимальная продукция создается в мезотрофной мочажине. На грядах NPP снижается до 280 - 400 гС/м^2 в год. Минимальное значение продукции дают растительные сообщества олиготрофных мочажин (290 – 340 гС/м^2 в год), где большая часть продукции создается мхами. В сообществах олиготрофных мочажинах с приростом

вовлекается в биологический круговорот 3.96 запасов элементов питания, в сообществах рямов и гряд 12.6-13.2, и максимума достигает в мезотрофных топях – 21.6 г/м^2 в год (табл.).

Разложение растительного вещества в болотных экосистемах определяется видом растение, фракцией и химическим составом самого растения. Скорость разложения в болотных экосистемах составляет от 50 до 150 гС/м^2 в год. При разложение потери элементов составляют от 2.1-2.4 азота, 1.19 – 1.38 Ca, 1.99-1.62 K, 0.53-0.71 Mg, 0.18 - 0.27 P г/м^2 в год в экосистемах повышенных элементов рельефа (гряды и рямы), 4.1 азота, 6.9 Ca, 2.13 K, 0.79 Mg, 0.38 P г/м^2 в год в экосистемах мезотрофных топей. Минимальные потери наблюдаются в олиготрофных мочажинах 0.7 азота, 0.6 кальция, 1.0 калия, 0.4 магния, 0.06 г/м^2 в год фосфора.

Часть необходимых для построения новых тканей элементов питания поступает из отмирающих тканей растения. Данный процесс ретранслокации относится к внутреннему круговороту и может составлять значительную часть потребления элемента на построение продукции.

Таблица 1. Бюджет химических элементов N, P, K в болотных экосистемах

Процесс	Интенсивность процессов, г/м^2 в год		
	N	P	K
Гряда			
Потребление растениями с продукцией	5.91	0.49	3.56
Потери при разложении	2.14	0.17	2.00
Ретранслоцировано в надземные органы	1.31	0.04	1.23
Закрепление в торфе	2.46	0.28	0.33
Олиготрофная мочажина			
Потребление растениями с продукцией	2.86	0.31	2.28
Потери при разложении	0.74	0.07	1.01
Ретранслоцировано в надземные органы	0.37	0.05	0.74
Закрепление в торфе	1.75	0.20	0.53
Мезотрофная мочажина			
Потребление растениями с продукцией	8.71	0.74	3.70
Потери при разложении	4.01	0.38	2.12
Ретранслоцировано в надземные органы	0.48	0.06	0.93
Закрепление в торфе	4.22	0.30	0.65

На основе экспериментальных данные о запасах углерода и питательных элементов в живой и мертвой биомассе, продукции и изменение запасов элементов при разложении и в процессе ретранслокации сделан расчет бюджета питательных элементов в болотных экосистемах средней тайги Западной Сибири. Потребление химических элементов увеличивается с увеличением чистой первичной продукции. Отмечена зависимость потери элементов при разложении от величины продукции, с увеличением продукции потери увеличиваются, при этом концентрации элементов уменьшаются. В процессе ретранслокации 5 - 22% N, 6 - 15% P и 25 - 36% K от потребления возвращается в экосистему. Все отмеченные особенности зависят от типа экосистемы, видового состава сообщества и химического состава растений.

Литература

1. Базилевич Н.И., Титлянова А.А. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
2. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Peregon A.M., and Parshina E.K. Net primary production in peatlands of middle taiga region in western Siberia//Russian Journal of Ecology. 2008. V.39. № 7. P.466-474.

PROJECTIONS OF CHANGES IN RIVER RUNOFF AND FLOOD CONDITIONS IN GERMANY UNDER CLIMATE CHANGE

Krysanova Valentina, Shaochun Huang and Fred Hattermann

Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany
Krysanova@pik-potsdam.de

Introduction

Data of observations over the past 100 years show clear evidence of global warming. In most of Europe, an increase in average annual surface temperature of 0.8°C is observed, and a further increase is projected. Precipitation tends to increase in northern Europe and decrease in southern Europe, with variable trends and shift of seasonality in Central Europe.

Between 1901 and 2006 the mean air temperature in Germany rose by nearly 0.9°C, and 1990-1999 was the warmest decade of the entire 20th century. A general increase in precipitation has been observed in Germany in the last century, about 9% on average. The climate scenarios for Germany suggest an increase in temperature up to 3.5°C by 2071-2100, and an increase in precipitation in Western Germany and a decrease in Eastern Germany, and a shift of seasonality: more precipitation in winter and less in summer. Regarding the effects of climate change, impacts on water resources are among the main concerns.

It has been already reported in scientific literature that there have been more frequent floods in Germany during the last two decades, some of which have been among the most destructive ones ever recorded, such as the floods in 1993 and 1995 in the Rhine, in 2006 and 2009-2010 in the Danube, and in 2002 and 2006 in the Elbe. The observed changes in flood behaviour were analysed, and statistically significant trends were found in western, southern and central Germany. These trends are assumed to be climate driven. In the future, the impact of climate change on flood conditions is likely to be more prominent due to the continuing rise in atmospheric temperature and changing precipitation conditions, which may result in altered hydrological regimes. Therefore, there is an increasing interest in projecting future flood conditions in Germany, which could provide important information for decision makers dealing with flood risk management strategies.

Modelling tools and study area

The process-based ecohydrological model SWIM (Soil and Water Integrated Model Krysanova et al., 1998) was developed for climate and land use change impact assessment on the basis of the models SWAT (Arnold et al., 1993) and MATSALU (Krysanova et al., 1989). SWIM simulates hydrological cycle, vegetation growth and nutrient cycling with the daily time step by disaggregating a river basin to subbasins and hydrotopes. Water flows, nutrient cycling and plant growth are calculated for every hydrotope. Then lateral fluxes of water and nutrients to the river network are simulated taking retention into account. After reaching the river system, water and nutrients are routed along the river network to the outlet of the simulated basin. SWIM requires regionally available data (GIS maps, soil parameters, climate, etc.) as the input, and is easily transferable to other regions.

All large river basins in Germany: lower Rhine, upper Danube, Elbe, Weser and Ems were included in the study. A special focus was on uncertainty propagation in the model results, and scenario-related uncertainty.

Climate impact on water flow components

The first German-wide impact assessment of water fluxes dynamics under climate change was performed in a spatially and temporally distributed manner using the regional climate model STAR and ecohydrological model SWIM.

After the SWIM calibration and validation the water flow components were simulated at the hydrotope level, and the spatial distributions compared with those in the Hydrological Atlas of Germany. The successful model validation provided a sound basis for further impact assessment. Actual evapotransipration is likely to increase in the whole region, while runoff generation is expected to decrease in southern and eastern parts of Germany. Higher winter flow is expected in all German rivers due to increased precipitation, which is most significant for the Ems (about 18%). As the projections show, by the middle of the century water discharge in all six large rivers will be 8% - 30% lower in late summer and autumn compared to the reference period, and the strongest decline is expected for the Saale, Danube and Neckar rivers. However, the uncertainty of impacts, especially in winter, remains high. The study is described in detail in Huang et al., 2010.

Current trends and climate impact on floods in Germany

The aim of the study was to project the future flood conditions accounting for various river regimes and under different climate scenarios (the high, A2, low, B1, and medium, A1B, emission scenarios) (see Huang et al., submitted). Three available Regional Climate Models (RCMs): two dynamical (REMO and CCLM) and one statistical-empirical (Wettreg) were used to drive the ecohydrological model SWIM, which was previously validated for 15 gauges in Germany. At most of the gauges, the 95 and 99 percentiles of the simulated discharge using SWIM with observed climate data had a good agreement with the observed discharge for the control period (deviation within ±10%). However, the simulated discharge had a bias when using RCM climate as input for SWIM for the same period.

The Generalized Extreme Value distributions were fitted to the annual maximum series of river runoff for the control and scenario periods, and the changes in flood generation over the whole simulation time were analyzed. The 50-year flood values estimated for two scenario periods (2021-2060, 2061-2100) were compared to the ones derived from the control period using the same climate models (no bias correction!). The results driven by two dynamic RCMs give various change directions depending on river basin, emission scenario and time period, whereas the results driven by the statistical-empirical RCM mostly show a declining trend in the flood level for most rivers, and under all climate scenarios. Namely, the results driven by two dynamic RCMs suggest an increase of about 10 – 20% in the 50-year flood level in the rivers Weser, Rhine, Main, Saale and Elbe; whereas there is a likelihood of 20% decrease in the flood level for the Neckar. In contrast, the simulations driven by Wettreg project a downward trend for the northern basins Ems and Weser (10%), and Saale (20%), and no distinct trend for the Main, Danube, and Neckar.

The uncertainty in estimating high flows and, in particular, extreme floods remains high. This is due to differences in regional climate models, emission scenarios and multi-realizations generated by RCMs. Nevertheless, adaptation strategy should account for a high probability of increase in flood frequency and intensity in many rivers in Germany.

Литература

Arnold J.G., Allen P.M., Bernhardt G.,. A comprehensive surface-groundwater flow model. J. Hydrol. 142, 1993.- P. 47-69.

Huang, S., Krysanova, V., Österle, H., Hattermann, F.F. (2010): Simulation of spatiotemporal dynamics of water fluxes in Germany under climate change. Hydrological Processes, 24(23): 3289-3306. DOI: 10.1002/hyp.7753.

Huang, S., Hattermann, F.F., Krysanova, V., Bronstert, A. (2010): Projections of climate change affected river flood conditions in Germany by combining three different RCMs with a regional hydrological model, Climatic Change (submitted).

Krysanova, V., Meiner, A., Roosaare, J., Vasilyev, A., 1989. Simulation modelling of the coastal waters pollution from agricultural watersheds. Ecological Modelling, 49.- P. 7-29.

Krysanova V., Müller-Wohlfeil D.I., Becker, A.,1998. Development and test of a spatially distributed hydrological / water quality model for mesoscale watersheds. Ecological Modelling, 106.- P. 261-289.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ В МОДЕЛЯХ МЕТАПОПУЛЯЦИЙ

Кулаков М.П.

ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан, Россия
k_matvey@mail.ru

Аннотация: в работе предлагается модель решетчатого типа, предназначенная для описания пространственной динамики миграционно связанных биологических сообществ. Изучаются влияние миграционного взаимодействия между локальными сообществами на формирование пространственной синхронизации.

Построение модели

В математической популяционной биологии хорошо изучена динамика локальных сообществ взаимодействующих популяций, описываемых моделями, как с непрерывным (Базыкин, 1985), так и дискретным временим (Скалецкая и др., 1979). Существование колебаний в таких сообществах определяется внутрипопуляционными процессами, связанными с плотностно-зависимым лимитированием роста численности, периодическим характером действия внешних факторов, а так же межвидовыми взаимодействиями. Реальные биологические сообщества, обычно, пространственно распределены по своему ареалу и представлены взаимодействующими локальными популяциями, обменивающиеся мигрантами. Каждую такую пространственно распределенную популяцию принято назвать «метапопуляция» (Ilkka, 2004). Механизмы формирования нерегулярного и периодического поведения, как метапопуляции, так и их сообществ оказываются существенно сложнее, чем отдельной изолированной популяции или сообщества. В этом случае наблюдаются эффекты мультистабильности, синхронизации, перемежаемости и др., а так же явление кластеризации – образование в процессе развития групп элементов, состояния которых полностью совпадают (Kaneko, 1990).

В данном сообщении предлагается и исследуется математическая модель пространственной динамики локальных сообществ, между которыми возможно небольшое миграционное взаимодействие. Ареал моделируемого сообщества представляется в виде территории прямоугольной формы, которая поделена на равные квадраты равномерной решеткой из $k+1$ узлов в строке и $n+1$ узлов в столбце; тогда каждый квадрат нумеруется от 1 до $N = kn$ слева направо. Если при этом на всей территории возможно проживание s видов животных, тогда через $x_i^{(r)}$ можно обозначить плотность вида r ($r = 1,2,\ldots s$) в i-м квадрате ($i = 1,2,\ldots,N$) в том порядке, как была произведена нумерация. При стадийном характере развития особей популяции уравнения пространственной динамик в дискретный момент времени t можно записать виде:

$$x_i^{(r)}(t+1) = \sum_{j=1}^{N} M_{i,j}^{(r)} f\left(x_i^{(1)}(t), x_i^{(2)}(t), \ldots, x_i^{(s)}(t)\right), \ (t = 0,1,2,\ldots), \qquad (1)$$

где $M_{i,j}$ ($i \neq j$) – доля мигрантов из j-й популяции в i-ю, $f(x)$ – некоторая функция локального воспроизводства с учетом взаимодействия особей в данном квадрате с представителями других видов. Диагональный элемент $M_{i,i}$ при этом равен

$$M_{i,i} = 1 - \sum_{j=1}^{N} M_{j,i}, \ (j \neq i, \ i = 1, 2, \ldots, N).$$

В качестве функции воспроизводства рассматривалась обобщенная зависимость запас-пополнение Рикера, с учетом межвидового взаимодействия (Скалецкая и др., 1979):

$$f^{(r)}\left(x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \ldots, x_i^{(s)}\right) = a_i^{(r)} x_i^{(r)} \exp\left(-\sum_{j=1}^{S} C_{r,j} x_i^{(r)}\right), \qquad (2)$$

где $a_i^{(r)}$ – максимальная скорость локального роста популяции вида *r* в *i*-й ячейки, $C_{r,j}$ – коэффициент взаимодействия *r*-го вида ($r = 1,2,\ldots s$) с *j*-м ($j = 1,2,\ldots s$), $C_{j,j}$ – коэффициент самолимитирование. Рассматривается симметричный случай, когда все коэффициенты миграции равны *m*, а скорости роста каждого вида равны $a^{(r)}$ во всех ячейках. Нетривиальная стационарная точка системы (1) с функцией воспроизводства (2) есть решение системы линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{j=1}^{s} C_{r,j} \bar{x}^{(j)} = \ln a^{(r)} \text{ при } |C| \neq 0.$$

Якобиан системы (1) в нетривиальном состоянии равновесия при этом будет иметь вид:

$$\mathbf{J} = \mathbf{M}\left(\mathbf{E} - \operatorname{diag} \bar{h} \cdot \mathbf{C}\right),$$

где $\bar{h} = \left(\bar{x}^{(1)}, \ldots, \bar{x}^{(1)}, \bar{x}^{(2)}, \ldots, \bar{x}^{(N)}, \ldots, \bar{x}^{(N)}\right)^T$ – вектор из Ns элементов, **E** – единичная $Ns \times Ns$ матрица, **M** и **C** – блочные матрицы. **M** состоит из блоков – матриц *M* выстроенных вдоль главной диагонали, **C** составлена из $s \times s$ блоков размера $N \times N$ вида: $\operatorname{diag} C_{i,j}$, где $i = 1,2,\ldots s$ – номер блока вдоль строк, $j = 1,2,\ldots s$ – номер блока вдоль столбцов.

Результаты

Аналитическое и численное исследование системы (1) показало, что первой бифуркации соответствует потеря устойчивости ненулевой неподвижной точки, соответствующая потери устойчивости одиночного уравнения:

$$x_i^{(r)}(t+1) = f^{(r)}\left(x_i^{(1)}(t), x_i^{(2)}(t), \ldots, x_i^{(s)}(t)\right), \qquad (3)$$

т.е. такой, какой она была бы в случае отсутствия миграционной экспансии (каскад удвоения периода либо образование предельной инвариантной кривой). Динамика всех *s* видов по отношению друг к другу в каждом очаге может быть как синфазным, так и противофазным, что определяется соотношением коэффициентов взаимодействия $C_{r,j}$, т.е. зависит от типа взаимодействия. Дальнейшие бифуркации системы (1) связаны, как с последующим усложнением динамики (3), так и с формированием устойчивых инвариантных подпространств фазового пространства поперечных диагональному подпространству. В последних реализуются несинфазное или противофазное поведение численности особей, как одного, так и разных видов между собой в разных локальных сообществах. В зависимости от соотношения спектров оператора **M** и **C** эти подпространства становятся устойчивыми притягивающими множествами. Каждому из них соответствует свой бассейн притяжения и в зависимости от начального распределения особей по ареалу пространственная динамика способна достигнуть одного из возможных режимов синхронизации.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проекты №09-04-00146-а, №11-01-98512-р_восток_а) и ДВО РАН (конкурсные проекты №09-I-П15-01, №09-III-А-09-498).

Литература

Ilkka A., Hanski I., Oscar E. Gaggiotti Ecology, Genetics and Evolution of Metapopulations.– Academic Press, 2004.– 696p.

Kaneko K. Clustering, coding, switching, hierarchical, ordering, and control in network of chaotic elements // Physica D.– 1990.- Vol. 41, No. 2.– P. 137-172.

Базыкин А.Д. Математическая биофизика взаимодействующих популяций.– М.: Наука.– 1985.– 181 С.

Скалецкая Е.И., Фрисман Е.Я., Шапиро А.П. Дискретные модели динамики численности популяций и оптимизация промысла. – М.:Наука.– 1979.– 168с.

ЭМПИРИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЮЖНОГО ПОДМОСКОВЬЯ

Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О.

Учреждение Российской Академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино Московская обл., Россия
ikurg@mail.ru

Аннотация: выявлены отчетливые тренды увеличения среднегодовой температуры воздуха и уменьшения годового количества осадков в течение 1998-2010 гг., что выразилось в наблюдаемом усилении засушливости климата в Южном Подмосковье. Обнаруженные тенденции в изменении климата вызвали сопряженный тренд уменьшения дыхания почв в лесных экосистемах, вероятность которого была наиболее высокая в супесчаной дерново-слабоподзолистой почве.

Введение

Основными абиотическими параметрами, которые контролируют величину эмиссионной составляющей углеродного цикла, являются температура воздуха и почвы, а также уровень увлажнения почв, который в вегетационный период определяется, главным образом, количеством выпадающих осадков (*Rustad et al., 2000*). На основе анализа данных многолетнего мониторинга эмиссии CO_2 из почв различных экосистем южно-таежной зоны было показано, что главным предиктором месячных почвенных потоков CO_2 выступала температура почвы, а основным фактором, определяющим и контролирующим величину суммарной годовой эмиссии CO_2 из почв, являлась сумма осадков за период весна-лето (*Курганова, 2010*). В рамках настоящего исследования мы провели сопряженный анализ трендов (1997-2010 гг.) основных климатических параметров (температура воздуха и количество осадков) и эмиссионной составляющей углеродного цикла в лесных экосистемах Южного Подмосковья на месячном, сезонном и годовом уровнях осреднения.

Объекты и методы исследования

Климатические данные за 1997-2010 гг. (среднесуточные и среднемесячные температуры воздуха; суточные и месячные суммы осадков) были любезно предоставлены нам на Станции фонового мониторинга (п. Данки, Серпуховский район, Московская обл.). Наблюдения за эмиссией CO_2 из почв проводили в двух лесных экосистемах, одна из которых расположена на территории Приокско-террасного государственного биосферного заповедника (дерново-подзолистая песчаная почва), а вторая - на территории бывшей опытно-полевой станции ИФХиБПП РАН (серая лесная суглинистая почва). Эмиссионную составляющую углеродного цикла (или общее дыхание почвы, SR) определяли круглогодично с ноября 1997 г. по октябрь 2010 г. с интервалом 7-10 дней, используя камерный статический метод. Величину среднемесячной интенсивности почвенного дыхания рассчитывали как арифметическое среднее из 3-5 измерений, проведенных в течение этого месяца. Эмиссию CO_2 из почв за год, отдельные его периоды (теплый: май-октябрь; холодный: ноябрь-апрель) и календарные сезоны года (зима, весна, лето, осень) находили простым суммированием потоков CO_2 за соответствующие месяцы.

Линейные тренды строились для 13-летних рядов климатических данных и экспериментально определенной величины эмиссионной составляющей углеродного цикла в двух лесных экосистемах на месячном, сезонном и годовом уровнях осреднения. Для полученных временных трендов методом наименьших квадратов была оценена их достоверность (R^2) и вероятность (P, %). Интенсивность и знак наблюдаемых трендов

характеризовали с помощью коэффициентов линейной регрессии в полученных статистических моделях.

Результаты и обсуждение

Применение методов эмпирико-статистического моделирования выявило отчетливый тренд увеличения среднегодовой температуры воздуха, ***СТВ*** на 0,08°С·год$^{-1}$ (Р>90%) при уменьшении годового количества осадков, ***ГКО*** (~ на 9,7 мм·год$^{-1}$, Р>85%; рисунок 1А) в 1998-2010 гг., что выразилось в усилении засушливости климата в Южном Подмосковье. Так, за анализируемый 13-летний период наблюдалось 4 года, в течение которых гидротермический коэффициент Селянинова был в 1,3-1,9 раза ниже среднемноголетнего значения, равного 1,4. Увеличение среднегодовой температуры воздуха было обусловлено, главным образом, повышением температуры в ноябре (0,51°С·год$^{-1}$; Р>93%), августе (0,34°С·год$^{-1}$; Р>99%) и мае (0,25°С·год$^{-1}$; Р>87%), а тренд уменьшения количества осадков был наиболее выражен в апреле, июле и сентябре (рисунок 1Б).

Наблюдаемые тренды в изменении дыхания почв за 1998-2010 гг. проявлялись неодинаково в двух изученных лесных экосистемах (таблица 1). На годовом уровне осреднения были выявлены тренды уменьшения дыхания почв, но их интенсивность и вероятность на дерново-слабоподзолистой почве была значительно выше, чем на серой лесной. Годовые тренды уменьшения SR были обусловлены, главным образом, сезонными трендами снижения дыхания почв в течение лета и осени. Бо́льшая интенсивность и вероятность сезонных трендов также была характерна для дерново-подзолистой супесчаной почвы. Связывая наблюдаемые в 1998-2010 гг. тенденции уменьшения величины SR в лесных экосистемах с усилением засушливости климата, их более высокая вероятность проявления в дерново-подзолистой почве объясняется, по-видимому, наиболее выраженным дефицитом влаги в теплый период года в супесчаных почвах по сравнению с суглинистыми.

Рисунок 1. Наблюдаемые тренды в изменении СТВ и ГКО (А) и среднемесячных температур воздуха в мае, августе и ноябре (Б) в течение 1998-2010 гг.

Таблица 1. Интенсивность (г С·период$^{-1}$) и вероятность наблюдаемых трендов в изменении величины дыхания почв в лесных экосистемах южно-таежной зоны в различные временные периоды в 1998-2010 гг.

Почва	Дерново-слабоподзолистая				Серая лесная			
Период	год	теплый	лето	осень	год	теплый	лето	осень
Интенсивность	-16,7	-15,7	-9,8	-4,9	-3,6	-6,4	-3,88	-2,69
Вероятность, %	> 92	>95	>95	>92	>30	>58	>56	>59

Работа выполнялась при поддержке МНТЦ (проект 4028) и Программы Президиума РАН.

Литература

Курганова И.Н. Эмиссия и баланс диоксида углерода в наземных экосистемах России. Автор. дис. ... докт. биол. наук.- М., 2010.- 50 с.

Rustad L.E., Huntington T.G., Boone R.D. Controls on soil respiration: Implication for climate change // Biogeochemistry.- 2000.- Vol. 48.- P. 1-6.

ДИНАМИКА НАСЕЛЕНИЯ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В ЮЖНОЙ ТАЙГЕ: РЕКОНСТРУКЦИЯ АТТРАКТОРА

Кшнясев И.А., Давыдова Ю.А.

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия
kia@ipae.uran.ru

Аннотация: на основе данных многолетнего (1995-2010 гг.) мониторинга мелких млекопитающих (ММ) в темнохвойных южно-таежных лесах Среднего Урала выполнена реконструкция аттрактора системы «хищник–жертва» (мелкие куньи – ММ) по динамике одной из компонент – плотности ММ, измеряемой с большей точностью. Показано качественное согласие наблюдений и реконструкции, а также определено время изменения режима динамики системы.

Циклический характер динамики популяций многих видов мелких млекопитающих (ММ) интригует экологов на протяжении многих десятилетий, и идентификация механизмов многолетних циклов является одной из интереснейших проблем популяционной экологии, о чем свидетельствует неубывающее число пуликаций (Krebs, Myers, 1974; Lidicker, 1988; Norrdahl, 1995; Krebs, 1996; Norrdahl, Korpimaki, 2002; Turchin 2003; Lambin et al., 2002; 2006; Krebs et al., 2010; Brommer et al., 2010; и др.). Предложены десятки гипотез для ее объяснения (Batzli, 1992Stenseth, 1999; Hanski et al., 2001; Korpimaki et al., 2004; Smith et al., 2006; и др.). Для формального описания циклической динамики плотности популяций успешно применяются модели авторегрессии второго порядка (Bjornstad et al., 1995; Tkadlec, Stenseth, 2001; Кшнясев, 2004). Причем для запаздывающей зависимости от плотности предложены интерпретации: как эффектов трофических взаимодействий с кормовыми ресурсами (см. обзор в Klemola, et al., 2000) или с хищниками (Hanski et al., 1993; Hanski et al., 2001; Klemola et al., 2002; Gilg et al., 2006; Korpimaki et al., 2005; Sundell, Ylonen, 2008); материнским эффектом (Ginzburg, 1998) или плотностнозависимым изменением длины репродуктивного сезона (Batzli, 1999; Smith et al., 2006) и др. Для автоколебаний в системе «ресурс–потребитель» необходимо наличие «инерции» – запаздывания реакции (или последействия) одного компонента на изменения другого (см. напр. May, 1981).

Одной из популярных гипотез объяснения циклов ММ является модель трофических взаимодействий типа «хищник–жертва» (см. выше). Очевидно, что для успешной зимовки таких специализированных хищников как мелкие куньи (ласка, горностай), а так же для их успешной репродукции (численного отклика) необходима достаточная численность жертв. Ранее нами была оценена относительная важность различных запаздываний для численного отклика *Mustela nivalis* на плотность ММ (Kshnyasev, Davydova, 2010) и показано, что наилучшим (w=0.96) предиктором для поимок ласки является численность ММ на 9 мес. раньше. Задача исследования – реконструкция аттрактора системы «хищник–жертва» (мелкие куньи – ММ) как непосредственно по данным учетов ММ и поимок их специализированного хищника – *Mustela nivalis*, так и исключительно по динамике одной из компонент системы – плотности ММ (измеряемой с большей точностью). Описание района исследования, методов учета, основную библиографию (Кшнясев, Давыдова, 2005; 2007; 2008; Kshnyasev, Davydova, 2010) для экономии места мы здесь не приводим.

Рисунок 1. Многолетняя динамика ММ (точки и пунктирная линия), сглаживание *4253Н*-фильтром (жирная линия), аппроксимация гармоническим колебанием (штриховая линия), тренд (тонкая линия) – взвешенная НК регрессия. Годы поимок (1-5 особей) ласки подчеркнуты. Темнохвойная южная тайга, Средний Урал, весна 1995 – осень 2010 гг.

а) *б)*

Рисунок 2. а) динамика системы «хищник–жертва» в фазовой плоскости: Mustela nivalis (ордината) – ММ (абсцисса), использованы сглаженные 4253Н-фильтром значения;
б) реконструкция аттрактора системы «миофаги – мелкие млекопитающие» по временному ряду (+1.6) сглаженных (для удаления сезонности) 4253Н-фильтром значений плотности ММ. Плотность ММ (t-9 мес.) использована как «суррогат» прямых оценок численности хищников. Темнохвойная южная тайга, Средний Урал, 1995–2010 гг.

Для динамики плотности ММ (грызуны + бурозубки) южно-таежных лесов Среднего Урала до 2007г. были характерны регулярные флуктуации, со стабильным периодом и менее стабильной амплитудой, сопоставляемые двухкомпонентным колебаниям, состоящим из небольшой амплитуды сезонного (цирканнуального) и мощного трехлетнего циклов, на фоне слабого восходящего тренда (рисунок 1). Поимки ласки наблюдались каждые три года (исключая 2007 и 2008 гг.) и были сопряжены с высокой плотностью ММ осенью предшествующего года и весной текущего (рисунки 1, 2). Реконструкция аттрактора (рисунок 2б) системы, выполненная по классической схеме Packard et al. (1980), показывает хорошее согласие с наблюдениями (рисунок 2а). Оба способа представления позволяют обнаруживать и датировать изменение режима динамики системы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ: 10-04-01657.

Литература

Kshnyasev I.A., Davydova Yu.A. Bewertung der Verzögerung der Anzahl von Mauswieseln *Mustela nivalis* (Linnaeus, 1766) nach der Zunahme der Dichte von Kleinsäugetieren // Beitrage zur Jagd- und Wildforschung, 2010. Bd. 35.- P. 231-235.

Packard N.H., Crutchfield J.P., Farmer J.D., Shaw R.S. Geometry from a time series // Physical Review Letters 1980. V. 45.- P. 712-715.

ПОПУЛЯЦИОННЫЕ ЦИКЛЫ ЛЕСНЫХ ПОЛЕВОК В ЮЖНОЙ ТАЙГЕ – СЦЕНАРИЙ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ «ХИЩНИК–ЖЕРТВА»?

[1]Кшнясев И.А., Давыдова Ю.А., Маклаков К.В.

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия
[1]kia@ipae.uran.ru

Аннотация: исследована динамика детерминированной системы «хищник–жертва», описываемой двумя сопряженными нелинейными дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом, в условиях сезонности и самолимитирования жертвы. Параметры откалиброваны по данным многолетних учетов (1995-2010 гг.) мелких млекопитающих в темнохвойных южно-таежных лесах Среднего Урала. Показано качественное сходство (r=0.68) динамики модели и наблюдений.

Для объяснения циклической динамики популяций многих видов животных наиболее правдоподобной на сегодняшний день является концепция ключевой роли трофических взаимодействий. Задача исследования – сопоставление траекторий детерминированной динамической системы «хищник–жертва» (ХЖ) и наблюдаемой динамики плотности рыжей полевки (*Clethrionomys glareolus*) и ласки (*Mustela nivalis*) в южно-таежных лесах Среднего Урала (Кшнясев, Давыдова, 2005). Системную динамику моделировали в среде AnyLogic University 6.5.0. (http://www.xjtek.ru/anylogic/). В качестве прототипа была использована модель, исследованная в работе (Wang et al., 2009): система двух дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом (1), причем в отличие от (*Op.cit.*), запаздывание нами было добавлено и в выражение, описывающее самолимитирование жертвы:

$$dx/dt = x\cdot b\cdot[1-(x_{t-\tau 1}/K)^{\theta}]/(1-K^{-\theta}) - y\cdot\eta\cdot x^2/(D^2+x^2)$$

и (1)

$$dy/dt = -d(x)\cdot y + \xi\cdot\eta\cdot\exp(-d_j\cdot\tau 2)\cdot\{y_{t-\tau 2}\cdot(x_{t-\tau 2})^2/[D^2+(x_{t-\tau 2})^2]\}$$

Смертность хищника аналогично (*Op.cit.*), описывали функцией:

$$d(x) = d_h-(d_h-d_l)\{0.5+\arctan[b_1\cdot(x-N_c)]/\pi\} \quad (2)$$

Более того, сезонность имитировали введением гармонического колебания емкости среды жертвы:

$$K=K_{av}[1-A_K\cdot\sin(2\pi t)] \quad (3)$$

Учет сезонности (3), в данном случае, был скорее «техническим» моментом, введенным для удобства синхронизации модельного времени и расписания реальных учетов и масштабирования решений системы к наблюдаемым значениям.

Для рыжей полевки в районе исследования (до 2007г.) характерны регулярные флуктуации плотности, со стабильным периодом и менее стабильной амплитудой, сопоставляемые двухкомпонентным колебаниям, состоящим из небольшой амплитуды сезонного и мощного трехлетнего циклов. Поимки ласки предшествовали падению плотности жертв и наблюдались каждые три года (но, подряд – в 2007-08 гг.) и были сопряжены с высокой плотностью жертв осенью предшествующего года и весной текущего (рисунок 1).

Похожими на реальность моментами в поведении модели (рисунок 2), кроме периода и амплитуды, также оказались: согласующееся с наблюдениями предсказание высокой

выживаемости жертвы за зиму при переходе из «роста» в фазу «пика»; получение нескольких вариантов внутригодовой динамики в названных фазах. При исключении из модели хищника ($\eta \equiv 0$), динамика жертвы демонстрировала лишь сезонные колебания, амплитуда которых определялась величиной параметра θ. Последнее, может служить весомым доводом, в пользу предположения ключевой роли специализированных хищников (как механизма запаздывающей зависимости от плотности) в генерации многолетних популяционных циклов полевок в бореальных лесах Евразии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ: 10-04-01657.

Рисунок 1. Многолетняя динамика *C. glareolus* (точки и линия, ось ординат слева, особей на 100 л.с., ≈0.5 га.) и поимки *M. nivalis* (зубцы). Темнохвойная южная тайга, Средний Урал, весна 1995 – осень 2010 гг., (16 лет)

Рисунок 2. 23-х летний фрагмент динамики (квазипериод 3 года) системы «хищник–жертва» (1): $b=9$; $K_{av}=40$; $A_K=0.7$; $\underline{\tau_1}=0.1$; $\theta=-0.2$; $\underline{\eta}=730$; $D=0.15$; $\underline{\xi}=0.006$; $\underline{d_h}=4$; $\underline{d_l}=0.1$; $\underline{N_c}=5$; $\underline{b_1}=25$; $\underline{\tau_2}=0.16$; $\underline{d_j}=4$. Хищник – штриховая линия, ось ординат справа; жертва – точки и линия, ось ординат слева. «Учеты» – 4 раза в год, плотность особей на 0.5 га

Литература

Кшнясев И.А., Давыдова Ю. А. Динамика плотности и структуры популяций лесных полевок в южной тайге // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Сер. Биология.- 2005.- Вып. 1 (9).- С. 113-123.

Wang H., Nagy J. D., Gilg O., Kuang Y. The roles of predator maturation delay and functional response in determining the periodicity of predator–prey cycles // Mathematical Biosciences.- 2009.- V. 221.- P. 1–10.

МЕТОДЫ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ АДАПТИВНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ ЭКОСИСТЕМ

Ланкин Ю.П.[1], Басканова Т.Ф.[2]

[1]*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*
lan7@mail.ru

[2]*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*
tfbask@mail.ru

Аннотация: создание моделей биосферы и ее экосистем затрудняется наличием проблем "проклятья размерности", потери устойчивости моделей с ростом сложности и др. Их преодолению посвящены методы, развиваемые **К**онцепцией Самоорганизующихся **А**даптивных **С**истем (КАС). Для моделирования процессов адаптивной самоорганизации, включая модели на основе систем дифференциальных уравнений, часто эффективно использование нейронных сетей, разрабатываемых в рамках концепции.

Методы настройки моделей экосистем

Первый метод поисковой адаптации для настройки моделей природных систем был разработан на основе ассоциации с идеей дарвиновской эволюции (Lankin, Baskanova, 2004).

В данной работе предложены три версии детерминистских методов, разработанных в КАС (Ланкин, 2009) для настройки сложных моделей биосферы и ее экосистем. Пример подобной модели экосистемы приведен в работе (Pechurkin, Lankin, 2010).

Версия (I) предназначена для настройки циклов, характерных для экосистем. Адаптация нейронной сети организована парами циклов функционирования c и c+1.

Первое (оценочное) функционирование

$$\alpha_i^{k+1,c} = \frac{\rho_i^{k,c}}{a + \left|\rho_i^{k,c}\right|}, \qquad \rho_i^{k,c} = \sum_j x_{ij}\alpha_j^{k,c} + A_i^k , \tag{1}$$

где α_i – состояние выходов нейронов (ответы), k – номер такта функционирования нейросети, i – номер нейрона, a – константа, α_j – состояния входов нейронов, x_{ij} – веса межнейронных связей, A_i – состояние входов нейросети (исходные данные), j – номер входа нейрона.

Оценка качества функционирования, определяющая необходимость дальнейшей адаптации, выполняется целевой функцией

$$H = \frac{1}{2}\sum_{i,k}\left(s_i^k - \alpha_i^{k,c}\right)^2 , \tag{2}$$

где s_i – требуемое состояние нейрона.

Второе (тестовое) функционирование

$$\alpha_i^{k+1,c+1} = \frac{\rho_i^{k,c+1}}{a + \left|\rho_i^{k,c+1}\right|}, \qquad \rho_i^{k,c+1} = \sum_l x_{il}s_l^k + \sum_j x_{ij}\alpha_j^{k,c+1} + A_i^k , \tag{3}$$

где l – номер входа нейрона ($j \neq l$). Фактически, первая сумма в формуле для ρ_i в (3) означает замену получаемых α_i на требуемые значения s_i.

Для каждого нейрона сети может быть вычислено выражение

$$\Delta\alpha_i^{k+1} = \alpha_i^{k+1,c+1} - \alpha_i^{k+1,c} , \tag{4}$$

представляющее собой величину и направление требуемого изменения α_i на текущем шаге адаптации.

Правило модификации весов связей при адаптации сети

$$x_{ij}^{m+1} = x_{ij}^{m} + \Delta x_{ij}^{m} \Delta t\,, \tag{5}$$

где m – номер цикла адаптации, Δt – шаг модификации, а

$$\Delta x_{ij}^{m} = \frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K} \alpha_j^k \, \Delta\alpha_i^{k+1}\,. \tag{6}$$

Учесть нелинейность нейрона можно используя формулы

$$\Delta x_{ij}^{m} = \frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K} \alpha_j^{k,c}\left(\frac{a s_i^{k+1}}{1-\left|s_i^{k+1}\right|} - \rho_i^{k,c}\right), \qquad \Delta x_{ij}^{m} = \frac{1}{K}\sum_{k=0}^{K} \alpha_j^{k,c}\left(\frac{a \alpha_i^{k+1,c+1}}{1-\left|\alpha_i^{k+1,c+1}\right|} - \rho_i^{k,c}\right), \tag{7}$$

где $-q < s_l < q$ и $-q < \alpha_j < q$. Это ограничение позволяет предохранить вычислительную процедуру от появления бесконечно больших величин ρ_i при s_i или α_i близких к единице.

Версия (II) также предназначена для настройки циклических процессов на неограниченных интервалах времени. Она может быть использована для стабилизации циклов или перевода системы из колебательного режима в стационарное состояние. Эта задача часто реализуется в экосистемах.

При этом второе (тестовое) функционирование нейросети (3) не требуется. Вместо него используются результаты предыдущего функционирования, а формулу (4) можно переписать в виде:

$$\Delta\alpha_i^{k+1} = \alpha_i^{k} - \alpha_i^{k+1}\,. \tag{8}$$

Целевая функция (2) принимает вид:

$$H = \frac{1}{2}\sum_{i,k}\left(\alpha_i^{k} - \alpha_i^{k+1}\right)^2, \tag{9}$$

что указывает на стремление нейросети к стационарному состоянию.

Остальные формулы сохраняются.

Версия (III) предназначена для настройки нейронных сетей, функционирующих на ограниченных интервалах времени либо для слоистых нейронных сетей. В этой версии алгоритма используется обратное распространение s_i, которое аналогично их прямому распространению в (3). Как и в двух предыдущих версиях, ошибки также вычисляются как разности между желаемыми значениями тестового функционирования и значениями обычного функционирования. Но тестовое функционирование теперь идет в обратном направлении.

В данной версии алгоритма прямое (тестовое) функционирование (3) заменяется на обратное:

$$\alpha_i^{k,c+1} = \sum_l x_{li}\left(\frac{a s_l^{k+1,c+1}}{1-\left|s_l^{k+1,c+1}\right|}\right) + \sum_j x_{ji}\left(\frac{a \alpha_j^{k+1,c+1}}{1-\left|\alpha_j^{k+1,c+1}\right|}\right), \tag{10}$$

где роль входов нейросети A_i играют требуемые значения s_i.

Остальные формулы сохраняются. Для (10) сохраняются также условия $-q< s_l <q$ и $-q< \alpha_j <q$, описанные для формулы (7).

Литература

Lankin J.P., Baskanova T.F. Algorithms of self-adaptation for atmospheric model designing // SPIE, 2004.- Vol. 5397.- P. 260-270.

Ланкин Ю.П. Моделирование экологической сложности на основе самоорганизующихся адаптивных сетей // Материалы Национальной конференции с международным участием "Математическое моделирование в экологии" ЭкоМатМод-2009.- Пущино: ИФХиБПП РАН, 2009.- С.153-154.

Pechurkin N.S., Lankin Yu.P. Information principles of self-organization of natural and artificial ecosystems // 38th COSPAR SCIENTIFIC ASSEMBLY.- COSPAR2010; Paper-Number: F41-0013-10.

АДАПТИВНАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Ланкин Ю.П., Печуркин Н.С.

Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
lan7@mail.ru

Аннотация: моделирование экологической сложности требуется для описания и понимания особенностей динамики экосистем и биосферы. На пути создания таких моделей встают проблемы "проклятья размерности", потери устойчивости моделей с ростом сложности и др. Их преодолению посвящены методы, развиваемые Концепцией самоорганизующихся адаптивных систем. В работе демонстрируется эффект адаптивной самоорганизации модели экосистемы к стационарному состоянию.

Проблемы методологии

Констатируя огромные достижения современной науки, нельзя не отметить и белые пятна в ее методологии, ограничивающие возможности описания и моделирования сложных природных систем, таких как биосфера и ее экосистемы.

Среди наиболее известных проблем классической методологии можно назвать: "проклятье сложности" или "проклятье размерности", ухудшение устойчивости моделей с ростом сложности (что противоречит свойствам реальных экосистем), проблему масштабирования теоретических и экспериментальных моделей (сохранение свойств от простого к сложному), проблему соответствия структуры и функции (множество структур могут соответствовать одной функции и наоборот), очень быстрое нарастание трудностей качественного анализа с ростом числа уравнений модели и др.

В качестве иллюстрации рассматриваемых проблем можно привести цитату из работы (Барцев, Барцева, 2007): "Однако на фоне определенных успехов в описании биологических подсистем и процессов (…) *успехи* биофизики *в познании общих свойств живого* (биологии, кстати, тоже), *более чем скромны*."

Методы Концепции самоорганизующихся адаптивных систем

В предыдущей работе (Ланкин, 2009) мы рассмотрели **К**онцепцию Самоорганизующихся **А**даптивных **С**истем (сокращенно **КАС**), развиваемую с целью преодоления существующих методологических ограничений.

В данной работе показано ее применение для моделирования известного эффекта стремления экосистем к стационарным состояниям. Выдвигается гипотеза, рассматривающая стремление к стационарности (которая не обязательно достигается), как одно из базовых свойств, объясняющих высокую устойчивости биосферы и ее экосистем к деструктивным (в частности антропогенным) воздействиям. КАС позволяет смоделировать действие принципа Ле Шателье (в кибернетике – принцип отрицательной обратной связи) для экологических

моделей любого разумного уровня сложности. Стационарное состояние в модели достигается динамически путем подстройки ее параметров прямо в процессе ее функционирования. Наличие множества стационарных состояний позволяет экосистеме сохранять устойчивость в ответ на широкий спектр разнообразных воздействий.

Модель экосистемы

Модель экосистемы представляющая собой систему дифференциальных уравнений первого порядка, предложена в книге (Гительзон, Печуркин, 2002). Система дифференциальных уравнений, соответствующая замкнутой экосистеме, содержит следующие обозначения: S, P, C, D - концентрации биогенных элементов, продуцентов, хищников и детрита, соответственно; μ_2, μ_3, μ_i - удельные скорости роста продуцентов и хищников 1-го и i-го родов (i=3...n); F - скорость поступления лимитирующего вещества; S_0 - начальная концентрация биогенных элементов; Y_2, Y_3, Y_i - экономический коэффициент роста продуцентов, хищников 1-го рода и хищников i-го рода; ε_2, ε_i -удельные скорости отмирания продуцентов и хищников; ε_d - скорость разложения детрита; q - коэффициент возврата биогенных элементов в экосистему. Модель имеет следующий вид:

$$\dot{S} = F(S_0 - S) - \frac{\mu_2 P}{Y_2} + \sum_{i=3}^{n} q(\frac{1}{Y_i} - 1)\mu_i C_i + q\varepsilon_d D$$

$$\dot{P} = \mu_2 P - \varepsilon_2 P - \frac{\mu_3 C_3}{Y_3}$$

$$\dot{C}_i = \mu_i C_i - \varepsilon_i C_i - \frac{\mu_{i+1} C_{i+1}}{Y_{i+1}}$$

$$\dot{D} = \varepsilon_2 P + \sum_{i=3}^{n} \varepsilon_i C_i - \varepsilon_d D$$

Результаты моделирования

В процессе проведения численных экспериментов модель экосистемы была дополнена уравнением для детрита (Барцев, 2005). Результаты экспериментов приведены на рисунках.

Рисунок 1. Неустойчивое поведение модели экосистемы, характеризуемое уходом ее из стационарного состояния в опасный (для реальной экосистемы) режим колебаний

Рисунок 2. Адаптивная самоорганизация модели экосистемы, возвращающая ее из режима колебаний к стационарному состоянию (формирование аттрактора)

Как указывается в (Гиляров, 1990), получить колебательные режимы типа Лотки-Вольтерра даже в лабораторных условиях очень трудно. Приведенные результаты

демонстрируют, что методы КАС позволяют сблизить поведение экологических моделей с поведением реальных экосистем, стремящихся к стационарным состояниям.

Литература

Барцев С.И. Теоретические модели в решении ключевых задач биосферики: Дисс. докт. физ.-мат. наук.- Красноярск, 2005.- 221 с.

Барцев С.И., Барцева О.Д. Эвристические нейросетевые модели в биофизике.- СФУ: Красноярск, 2007. - 92с.

Гиляров А.М. Популяционная экология.- М.: Изд-во МГУ, 1990.- 191 с.

Ланкин Ю.П. Моделирование экологической сложности на основе самоорганизующихся адаптивных сетей // Материалы Национальной конференции с международным участием "Математическое моделирование в экологии" ЭкоМатМод-2009.- Пущино: ИФХиБПП РАН, 2009.- С.153-154.

Экологическая биофизика. Том 3. Экология и биофизика: время интеграции / Ответственные редакторы: академик И.И. Гительзон, профессор Н.С. Печуркин.- М.: Логос, 2002.- 304 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТРАВЯНОГО ПОКРОВА В ГОРОДСКИХ САДОВО-ПАРКОВЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Лантратова А.С., Платонова Е.А., Шредерс М.А.

Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия
meles@sampo.ru

Аннотация: в результате исследования определены основные параметры разнообразия растительного покрова садов и парков г.Петрозаводска, установлено влияние освещенности, почвенно-гидрологического режима и антропогенного фактора на структуру травяного покрова. Даны рекомендации по оптимизации состава травяного покрова зеленых насаждений в связи с их функциональным назначением.

Зеленые насаждения садово-паркового типа являются одним из широко распространенных типов урбоэкосистем. Такие экосистемы занимают частично трансформированные экотопы, где сохраняются отдельные фрагменты предшествующих окультуриванию природных экосистем. Несмотря на то, что растительные сообщества садов и парков создаются при участии человека, значительную роль имеют процессы спонтанного заселения и формирования мозаики растительного покрова. Вертикальная структура парков включает древесный ярус, образованный в основном, культивируемыми видами, травяной ярус, в котором распространены аборигенные и заносные виды, часть из которых представляют собой сеяные травы, и мохово-лишайниковый ярус. Внеярусная растителность представлена, в основном, эпифитными мхами и лишайниками.

Функциональное назначение садово-парковых экосистем включает несколько важных составляющих: санитарно-гигиеническую (обеспечение оптимальной экологической среды на урбанизированных территориях), экосистемную (сохранение природного разнообразия), социально-культурную (рекреационное, образовательное значение). Исследование проводилось в садах и парках г.Петрозаводска, включая арборетум Ботанического сада ПетрГУ. При создании парков особое внимание уделялось подбору древесных растений, особенности структуры нижних ярусов практически не изучались. Наше исследование нацелено на установление состава травяного покрова, выявление факторов его организации и моделирование этого компонента экосистемы с целью обеспечения благоприятной среды для человека в соответствии с функциональным назначением садово-парковых насаждений. Использовались методы анализа травяного покрова на пробных площадях и специальные методы учета структуры травяного покрова в фитогенных полях древесных растений, составлялись и анализировались карты зеленых насаждений с использованием ГИС технологий.

В результате исследования в садах и парках г. Петрозаводска установлено 273 вида древесных и 241 вид травянистых растений. В травяном покрове преобладают аборигенные

виды растений (более 80%). Многолетние растения составляют 78 %, довольно высока доля однолетних растений (14%). В спектре биоморфологических групп преобладают гемикриптофиты (76 %), доля терофитов составляет 14 %, криптофитов – 9 %, хамефитов – 1 %. Среди широтных групп наибольшим числом представлены виды бореальной (54 %) и плюризональной (34 %) групп. Среди долготных групп преобладают евразиатский (65 %) и циркумполярный (23 %) элементы.

В результате специального исследования было установлено, что доля видов травяного покрова, которые реагируют на изменение среды в фитогенном поле древесных растений довольно велика — 43 вида из обследованных 89 видов с высокой встречаемостью. При удалении от ствола к периферии и за пределы крон древесных растений происходит увеличение проективного покрытия и встречаемости луговых видов, и уменьшение этих показателей лесных и некоторых адвентивных видов. Среди наиболее широко распространенных видов травяного покрова у 11 видов (*Achillea millefolium* L., *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm., *Artemisia vulgaris* L., *Amoria repens* (L.) C.Presl, *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Leontodon autumnalis* L., *Poa pratensis* L., *Poa trivialis* L., *Taraxacum officinale* Wigg., *Trifolium pratense* L., *Urtica dioica* L.) обнаружено изменение встречаемости и проективного покрытия в фитогенном поле большинства видов древесных растений; у других видов (например, *Alchemilla acutiloba* Opiz., *Dactylis glomerata* L., *Festuca pratensis* Huds., *Festuca rubra* L., *Heracleum sibiricum* L., *Phleum pratense* L., *Plantago major* L., *Ranunculus acris* L.) изменение проективного покрытия и встречаемости наблюдается в фитогенных полях отдельных видов древесных растений.

В связи с наличием фитогенных полей в горизонтальной структуре травяного покрова могут быть выделены два варианта фитохор. Первый вариант характерен для затененных участков под кронами древесных растений. В городских парках с высоким постоянством здесь представлены *Urtica dioica* L., *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm, *Heracleum sibiricum* L., *Ranunculus repens* L., *Arctium tomentosum* Mill, *Stellaria media* (L.) Vill., *Aegopodium podagraria* L. В арборетуме Ботанического сада на таких участках высока доля лесных видов. Второй вариант фитохор приурочен к освещенным пространствам газонов. В составе арборетума на таких участках формируются луговые сообщества формации обыкновеннополевичников. В составе садов и парков выявлен третий вариант фитохор, который приурочен к берегам рек и представляет собой фрагменты прибрежно-водной индигенной растительности. Таким образом, разнообразие растительного покрова обеспечивается варьированием освещенности в зависимости от структуры древесного яруса, разнообразием почвенно-гидрологического режима и влиянием антропогенного фактора, который обуславливает степень трансформации растительного покрова.

Обеспечение социально-культурной функции зеленых насаждений может быть достигнуто путем расширения ассортимента следующих групп хозяйственно-полезных растений: декоративные, фитонцидные, устойчивые к антропогенным воздействиям. В результате анализа видового состава травяного покрова выявлены эти группы растений и предложен список аборигенных видов, позволяющих расширить разнообразие травяного покрова и повышения его функционального значения. Особое внимание заслуживает группа видов, присутствие которых нежелательно в составе городских садов и парков. Это растения-аллергены, сорные и рудеральные виды, снижающие эстетическую привлекательность городских насаждений, а также агрессивные инвазионные виды.

Полученные результаты могут служить основой для моделирования структуры травяного покрова при планировании зеленых насаждений.

Авторы выражают благодарность студентам Э.В.Шевцовой, М.А.Садыковой и Н.А.Камаевой за помощь в сборе материалов.

ПРОБЛЕМА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТИ И МАСШТАБНЫЕ УРОВНИ ВАРЬИРОВАНИЯ ^{137}Cs В ПРИРОДНЫХ ЛАНДШАФТАХ

Линник В.Г.

Учреждение Российской академии наук Ордена Ленина и Ордена Октябрьской революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), г.Москва, Россия

linnik@geokhi.ru

Аннотация: выполнен анализ варьирования запаса ^{137}Cs в почве в зависимости от площади отбора образцов и площади измерения в полевых условиях. Установлено снижение варьирования запаса ^{137}Cs при увеличении измеряемой площади, различающееся для автоморфных и гидроморфных условий.

В задачах моделирования водного режима почвенного покрова важное значение отводится обоснованию выбора репрезентативного элементарного объема (Representative elementary volume, REV) – в пределах которого повторные измерения параметра показывают близкие значения (Bear, 1972). При уменьшении объема измеряемого образца дисперсия результатов измерения увеличивается (McBratney, 1998). Хорошо известно, что различные физические и химические свойства почвы характеризуются различным размером REV, что служит причиной иерархической мультимасштабной организации структуры почвенного покрова (Hoosbeek, Bryant, 1992). Анализ распределения техногенных радионуклидов в почвенном покрове, как удобного трассера, позволяет исследовать масштабные уровни организации геохимических полей, сформировавшиеся как результат влияния разномасштабных ландшафтных факторов.

Проблема представительности отбора проб и радиометрических измерений техногенных изотопов в природных ландшафтах занимает важное место в радиоэкологических исследованиях (Хомутинин и др., 2001). В практике радиоэкологических исследований измерение радиоактивности (в данном случае ^{137}Cs) в почвенном покрове может выполняться на разных масштабных уровнях: 1 – с использованием отбора проб с фиксированной площади (S=6,4-15,5 x10^{-3} м^2); и 2 – методом полевой радиометрии (измерение радиометром КОРАД, S=2x10^0 м^2); 3 - методом аэрогаммасъемки, S=1x10^4 м^2. Все эти методы измерения содержания ^{137}Cs различаются площадью (support), или, другими словами, масштабом измерения. Результаты наземного опробования (отбор проб или радиометрия) не могут обеспечить непрерывную площадную съемку и всегда выполняются по сетке в локальных точках. Используя полученные в узлах сетки значения, различными методами интерполяции строится непрерывное поле моделируемого параметра, в данном случае поле загрязнения ^{137}Cs. Аэрогаммасъемка дает непрерывное поле загрязнения, для которого интерполяция не требуется.

Для результатов полевой радиометрии и контрольного отбора проб ранее были установлены определенные расхождения в полученных результатах (Мартыненко и др., 2003). Как было показано в данной работе, причина таких расхождений связана с различной площадью детектирования загрязненной техногенными радионуклидами земной поверхности. На расхождение в результатах измерения ^{137}Cs в почве при разной площади отбора проб обращалось также внимание в работе (Хомутинин и др., 2001).

В основе указанных расхождений наряду с различием в технических способах измерения радиоактивности в почве, лежат также фундаментальные геохимические принципы, связанные с иерархией масштабных уровней ландшафтной организации на микроландшафтном уровне (Линник и др., 2006).

Масштабирования (scaling) определяет правила, в соответствии с которыми закономерности, полученные на одном масштабном уровне (иерархическом уровне геосистем) могут быть перенесены на другой уровень. Для перехода от одного масштабного уровня к другому разрабатываются методы апскейлинга и даунскейлинга. В первом случае закономерности, полученные в крупном масштабе переносятся на средний и мелкий масштаб, во втором случае – осуществляется переход от мелкого или среднего масштаба к крупному.

Анализ распределения запаса ^{137}Cs, нормированного по средней концентрации ^{137}Cs показал, что отношение стандартного отклонения радионуклида по данным отбора проб к результатам радиометрической съемки ($Std_{корад}/Std_{проба}$) примерно равно 0,5 (Мартыненко и др., 2003), таким образом, получено, что при изменении площади измерения запаса ^{137}Cs в почве в 300 раз его вариабельность снижается в 2 раза.

Для площадок радиоэкологического мониторинга в Брянской области (размером примерно 100x100 м) сравнение результатов полевой радиометрии и пробоотбора, (выполненного методом «конверта», 4 точки по углам площадки и 1 точка в центре) показало также снижение коэффициента вариации для измерения полевым радиометром. Установлено, что отношение вариабельности распределения ^{137}Cs, полученное методом полевой радиометрии к данным пробоотбора ($CV_{корад}/CV_{проба}$) существенно различается для автоморфных и гидроморфных условий – в автоморфных условиях (площадки В2, В3) эти отношение равны соответственно 0,47 и 0,49, тогда как в гидроморфных условиях (площадка В1, В4) различаются – 0,6 и 0,36.

Литература

Линник В.Г., Савельев А.А., Говорун А.П., Иваницкий О.М., Соколов А.В. Анализ поля загрязнения ^{137}Cs на микроландшафтном уровне на целинных лугах западной части Брянской области//Геохимия биосферы (к 90-летию А.И. Перельмана). Сборник докладов Международной научной конференции. Москва, 15-18 ноября 2006 г. Смоленск, Ойкумена, 2006.- С. 201-203.

Мартыненко В.П., Линник В.Г., Говорун А.П., Потапов В.Н. Сопоставление результатов полевой радиометрии и отбора проб при исследовании распределения ^{137}Cs в почвах Брянской области//Атомная энергия.– 2003.- Т. 95.- №4.- С.312-319.

Хомутинин Ю.В., Кашпаров В.А., Жебровская Е.И. Оптимизация отбора и измерений проб при радиоэкологическом мониторинге: Монография.– К.: УкрНИИСХР, 2001.- 160 с.

Bear, J., Dynamics of fluids in porous media. Elsevier, New York.- 1972.- 764 p.

Hoosbeek M.R.,Bryant R. Towards the quantitative modelling of pedogenesis: a review//Geoderma.– 1992.– Vol. 55.– P. 183–210.

McBratney Alex. B. Some considerations on methods for spatially aggregating and disaggregating soil information//Nutrient Cycling in Agroecosystems.- 1998.- Vol. 50.- P.51–62.

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ^{137}Cs В ЛАНДШАФТАХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

Линник В.Г., Соколов А.В.

Учреждение Российской академии наук Ордена Ленина и Ордена Октябрьской революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН),

г. Москва, Россия

linnik@geokhi.ru

Аннотация: выполнен анализ распределения ^{137}Cs ландшафтах ополья Брянской области. Первичное поле радионуклидного загрязнения характеризуется значительной пространственной неоднородностью. В результате влияния ландшафтных факторов поле загрязнения претерпело

существенные изменения. Исследовано влияние различных морфометрических параметров рельефа на распределение ^{137}Cs.

В результат аварии на ЧАЭС в 1986 г. загрязнению ^{137}Cs подверглись значительные территории. Объект исследования размером 3.8x2.3 км расположен в центральной части Брянской области в бассейне р.Костица, приток р. Судость (Рис.1) . Модельный участок расположен в ландшафтах ополья (Волкова, Жучкова, 2000), представленных лессовыми возвышенностями с многочисленными западинами, с развитой овражно-балочной сетью, с серыми лесными почвами, полностью распаханными.

Рисунок 1. Распределение ^{137}Cs в бассейне р.Костица, приток р. Судость (Брянская область). А- склон южной экспозиции. Б – склон северной экспозиции.

Исследование латеральной миграции привлекает внимание различных специалистов (Голосов и др., 2008; Квасникова и др., 2002; Линник и др., 2006), поскольку ^{137}Cs служит хорошей меткой как для изучения эрозионно-денудационных, так и ландшафтно-геохимических процессов. В настоящей работе для анализа пространственного распределения ^{137}Cs использованы данные аэрогаммасъемки Брянской области, выполненной в 1993 г. по сетке 100x100м, а также цифровые модели рельефа радарной съемки топографии Земли с борта "Шаттла" SRTM с разрешением 90 метров.

Математическое моделирование в ландшафтном анализе основывается на различных приемах дифференцирования рельефа и выявления статистических связей параметров рельефа с различными внутри ландшафтными процессами (Пузаченко и др., 2002; Сысуев, 2003; Florinsky, Arlashina, 1998; Shary et.al., 2002).

В результате процессов латеральной миграции первичное поле загрязнения ^{137}Cs претерпело существенные изменения. Обращает внимание асимметрия распределения ^{137}Cs в бассейне р.Костица, в наибольшей степени процессы латеральной миграции проявились на склонах южной и юго-западной экспозиции (рис.1А), тогда как на склонах северной экспозиции (рис.1Б) процессы латеральной миграции выражены не столь отчетливо. Склон .южной экспозиции и балки частично покрыты лесными участками, тогда как склон северной экспозиции полностью распахан.

Выполненный анализ связи загрязнения ^{137}Cs от основных морфометрических характеристик выявил максимальную связь (r= -0.47) с высотным положением в рельефе. Склоны южной экспозиции отличаются максимальной крутизной (до 7°), тогда как склон северной экспозиции более пологий. В результате процессов латеральной миграции максимальные концентрации ^{137}Cs наблюдаются в нижней части склонов южной экспозиции а также в заторфованной левосторонней пойме р. Костица.

Процессы латеральной миграции ^{137}Cs характеризуются значительной пространственной неоднородностью, обусловленной рядом факторов. Влияние морфометрических факторов на латеральную миграцию радионуклидов существенным образом корректируется типом землепользования, задернованностью склонов, а также физико-химическими формами миграции радионуклидов.

Литература

Волкова Н.И., Жучкова В.К. Полесско-опольские ландшафтные экотоны // Вестник ВГУ.- География и геоэкология.- 2000.- №1.- С.26-30.

Голосов В.Н., Маркелов М.В., Беляев В.Р., Жукова О.М. Проблемы определения пространственной неоднородности выпадений ^{137}Cs для оценки темпов эрозионно-аккумулятивных процессов // Метеорология и гидрология.- 2008.- №4.- С.30-45.

Квасникова Е.В., Стукин Е.Д., Титкин Г.И., Жукова О.М., Самонов А.Е., Борисенко Е.Н., Шагалова Э.Д., Жукова О. Митр. Трансформация радиоактивного загрязнения почв Брянско-Белорусского полесья // Метеорология и гидрология.- 2002.- №1.- С.46-57.

Линник В.Г., Говорун А.П., Моисеенко Ф.В. Латеральная миграция ^{137}Cs в агроценозах долины р. Ипуть в Брянской области // Геохимия биосферы (к 90-летию А.И. Перельмана). Сборник докладов Международной научной конференции. Москва, 15-18 ноября 2006 г. Смоленск, Ойкумена, 2006.- С. 199-201.

Пузаченко Ю.Г., Онуфреня И.Л., Алещенко Г.М. Спектральный анализ иерархической организации рельефа // Известия РАН.- Сер. Геогр.– 2002.- №4.- С.29-38.

Сысуев В.В. Физико-математические основы ландшафтоведения. - М.: Географический факультет МГУ, 2003.- 175 с.

Florinsky I.V., Arlashina H.A. Quantitative topographic analysis of gilgai soil morphology // Geoderma.– 1998.– V. 82. – № 4.- P. 359-380.

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002.- V.107.- №1-2.- P.1-32.

ПРИМЕНЕНИЕ ЛОГИТ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИТОТОКСИЧНОСТИ ПРИ НЕФТЯНОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ ПОЧВ

Липатов Д.Н., Елисеева А.В.

Факультет почвоведения МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
dlip@soil.msu.ru

Аннотация: построены уравнения логит регрессии, описывающие токсическое воздействие нефтяного загрязнения почв на травянистый покров. Логит регрессионные модели позволили оценить LK_{05}, LK_{50}, LK_{95} в почве для растений в различных природных и техногенных условиях.

Введение

Оценка фитотоксичности при загрязнении почв является важным звеном в задачах экологического нормирования, экологической диагностики, анализа экологических рисков. Нефтяное загрязнение почв подавляет рост и развитие растений, приводит к уменьшению их продуктивности, дигрессии и гибели фитоценозов (Казанцева, 1994; Киреева и др., 2009).

В экологических исследованиях проведение полевых экспериментов в импактных зонах загрязнения более эффективно по соотношению затрат и точности, чем активные лабораторные и полевые эксперименты или экспертные оценки (Воробейчик, 2004). Техногенная контрастность ореолов загрязнения способна выступать экспериментальным материалом, с помощью которого на основе регрессионного анализа можно оценивать изменения состояния экосистем, в частности, фитотоксичность загрязненных почв.

Объекты и методы

Целью нашей работы явилось построение логит-регрессионных уравнений для описания воздействия нефтяного загрязнения почв на травянистую растительность. Объекты исследования – почвенный и растительный покров на 4 участках разливов нефти (таблица) в Ногликском районе северо-востока о. Сахалин. На каждом участке площадью 100х100 м заложено по 16 точек опробования, растительный покров оценивался в рамке 20х20 см, почвенный образец отбирался под ней из слоя 0-10 см.

В общем виде регрессионная модель с использованием логит-преобразования может выражаться следующим образом:

$$\ln(p/(1-p) = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + ... + b_n \cdot x_n, \quad (1)$$

где p - вероятность переменной отклика, x_1, x_2, … x_n - независимые аргументы, b_0 - свободный член, b_1, b_2, b_n - коэффициенты регрессии.

В условиях нашей задачи переменная отклика являлась бинарной: 0 соответствовал отсутствию растений, 1 – их наличию. В качестве аргумента рассмотрено содержание в почве углеводородов нефти (УВН), его диапазон варьирования составил 100-75000 мг/кг. Регрессионная модель оценивалась методом максимального правдоподобия, вычисления проводились в модуле «Обобщенные линейные/нелинейные модели» программы Statistica.

Результаты

Полученные логит-регрессионные модели (таблица) использованы для расчета концентраций УВН в почве, при которых гибнет (или не происходит восстановление) заданной доли травянистого покрова. В соответствии с антропоцентрическим подходом, согласно которому воздействие техногенных факторов на биоту анализируется в отношении популяций, а не отдельных индивидуумов, целесообразно рассматривать LK_{50}, а в некоторых случаях – LK_{95}. Если нормировать воздействие загрязнения на ценные растения или уникальные фитоценозы, необходимо снижение при выборе контрольного уровня до LK_{05}.

Таблица 1. Параметры уравнений логит-регрессии для оценки фитотоксичности на четырёх участках

№	Почва	Растительность	b_0	b_1[x_1=УВН(мг/кг)]
1	Техно-подзол песчаный	Осоково-злаковая	-5,13	$3{,}10*10^{-3}$
2	Подзол супесчаный	Хвощево-злаковая	-2,26	$0{,}12*10^{-3}$
3	Торфяно-подзолистая песчаная	Осоково-кустарничковая	-4,45	$0{,}40*10^{-3}$
4	Бурая лесная легкосуглинистая	Кустарничково-злаковая	-6,25	$0{,}34*10^{-3}$

Логит-регрессионные модели и рассчитанные значения LK отражают особенности токсического воздействия УВН на исследованные травянистые фитоценозы в различных почвенных и техногенных условиях на 4-х участках (рисунок 1). Так, на участке № 1 восстановление травянистого покрова происходит на техно-подзоле с поверхностными механическими нарушениями, т.е. на фоне дополнительного мощного техногенного фактора, что увеличивает чувствительность растений к нефтяному загрязнению, поэтому на нем получены наиболее низкие значения LK_{05}, LK_{50}, LK_{95}. Хвощи и злаковая растительность является более устойчивыми к нефтяному загрязнению, чем кустарнички (багульник, шикша), поэтому на участке № 2 зафиксированы наиболее высокие пороговые уровни LK_{50}, LK_{95}. Кроме того, уровни токсичности зависят от состава нефти, концентрации ее отдельных компонентов и продуктов трансформации в почве (Пиковский и др., 2003).

Рисунок 1. Модельные оценки LK_{05}, LK_{50}, LK_{95} УВН (мг/кг) в почве для травянистого покрова

Оценка качества логит-регрессионных моделей, проведенная на основе апостериорной классификации предсказанных значений, показала 80-95% правильной классификации.

Методология логит-регрессионного моделирования применима для широкого спектра задач экологического нормирования: при воздействии многих типов техногенных нагрузок на различные группы реципиентов, а также при разработке рекультивационных и ремедиационных технологий.

Литература

Воробейчик Е.Л. Экологическое нормирование токсических нагрузок на наземные экосистемы: Дис. ... докт. биол. наук.- Екатеринбург, 2004.- 362 с.

Казанцева М.Н. Влияние нефтяного загрязнения на таежные фитоценозы Среднего Приобья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. - Екатеринбург, 1994.- 26 с.

Киреева Н.А., Новоселова Е.И., Григориади А.С. Влияние загрязнения почв нефтью на физиологические показатели растений и ризосферную микробиоту // Агрохимия.- 2009.- № 7.– С.71-80.

Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Чернянский С.С., Сахаров Г.Н. Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Почвоведение.- 2003.- № 9.- С.1132-1140.

ДВЕ ПАРАДИГМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ЭКОЛОГИИ. ВОЗМОЖЕН ЛИ СИНТЕЗ?

Логофет Д.О.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Российская Федерация
daniLaL@postman.ru

Аннотация: обсуждается диалектика линейности и нелинейности в области моделей динамики популяций и сообществ. Исторические успехи теории связаны с нелинейными моделями динамики взаимодействующих однородных популяций, а в практических приложениях востребована линейная парадигма матричных моделей изолированных популяций с дискретной структурой. Синтез двух парадигм демонстрируется на примере матричной модели конкуренции вейника и березы, растущих совместно на ранних стадиях вторичной сукцессии после вырубки ельника.

Современная математическая популяционная экология выросла из математической теории динамики взаимодействующих популяций, где исторически первой, относительно завершенной теорией явилась система моделей Вито Вольтерра (Volterra, 1931). Теория строилась на основе принципа *встреч*, или *столкновений*, порождавшего нелинейные члены в правой части популяционных уравнений Лотки–Вольтерра. С этой *нелинейной* парадигмой связаны успехи теории (колебания численностей хищника и жертвы в постоянной среде, формализация и обобщение принципа конкурентного исключения, длина устойчивых трофических цепей и т. п.), однако практические приложения были весьма скудны. Практика наблюдений требовала формализации того факта (не учтенного в уравнениях Лотки–Вольтерра), что популяция есть совокупность разнородных особей, классифицируемых по определенному основанию (возрасту, стадии развития, размеру, фенотипу и т.д.), т.е. популяция имеет определенную *структуру*, которая отражает различную адаптацию особей к среде обитания и определяет динамику численности во времени. Формализация (Leslie, 1945) и дальнейшее развитие привели к тому, что сейчас называют *матричными моделями* популяций, т.е. к системам линейных разностных уравнений вида

$$\boldsymbol{x}(t+1) = \boldsymbol{L}\,\boldsymbol{x}(t), \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{x}(t) \in \mathbb{R}^n_+$ – вектор структуры популяции в момент t, $\boldsymbol{L}$ – *проекционная* матрица, чьи элементы суть статусноспецифические коэффициенты дожития и репродукции, а строение отражает жизненный цикл организмов данного биологического вида в терминах рассматриваемой структуры популяции. Фробениусово собственное число проекционной матрицы $\lambda_1(\boldsymbol{L}) > 0$ служит обобщением классического мальтузианского параметра (скорости неограниченного роста популяции) на многомерный случай и широко применяется в современной демографии для оценки потенциала роста реальных популяций в реальных условиях среды.

Фундаментальная причина такого успеха – в общеизвестной роли линейного члена в математической теории приближений и соответственно роли линейного приближения в анализе ляпуновской устойчивости нелинейных систем. В приложениях диалектика линейности и нелинейности разнообразна и даже содержит пример, где калибровка линейной модели сводится к нелинейной задаче оптимизации, точное решение которой достигается в сопряженной линейной задаче. Пример относится к задаче калибровки матрицы $\boldsymbol{L}$ в модели динамики популяции вейника *Calamagrostis canescens* со стадийно-возрастной структурой по данным наблюдений типа «идентифицированные особи от неизвестных родителей» (Логофет, 2010; Logofet, 2011).

Парадигма линейности уступает место нелинейным моделям, когда моделируется взаимодействие видов, например, конкуренция за общие ресурсы. Потребность в синтезе обеих парадигм возникает там, где результат экологического взаимодействия принципиально зависит от демографической структуры взаимодействующих популяций. Такая ситуация

наблюдается, например, на определенном этапе экологической сукцессии при зарастании сплошной вырубки ельника: после захвата отрытой территории вейником наземным (*Calamagrostis epigeios*) рост его популяции начинает тормозиться успевшим сформировавшимся подростом березы повислой (*Betula pendula*), однако дальнейшее пополнение популяции березы сталкивается с конкурентным сопротивлением со стороны взрослых стадий вейника. Исход конкуренции – и соответственно дальнейший ход сукцессии (к лесу или к лугу) – определяется соотношением демографических структур популяций-конкурентов в начальной фазе сукцессии (Уланова и др., 2008).

Попытка синтеза двух математических парадигм популяционной теории предпринята нами в построении *нелинейной матричной* модели динамики популяций вейника и березы, растущих совместно. Модель построена как расширение линейных моделей динамики одновидовой популяции со стадийно-возрастной структурой: состояние популяции по-прежнему описывается вектором структуры, а постоянные значения возрастно-стадийно-специфических параметров выживания и репродукции модифицированы некоторыми убывающими функциями этого вектора – *факторами* – для вида-конкурента или/и собственной популяции. Специальная агрегация стадийно-возрастной структуры каждого из видов-конкурентов позволила снизить размерность нелинейного матричного оператора до уровня, допускающего калибровку параметров модели по данным наблюдений, а также поиск равновесного решения и анализ его устойчивости при конкретном выборе нелинейной функциональной формы модифицирующих факторов.

Формы нелинейности многообразны, и выбор частной модели остается неформализуемым аспектом в синтезе двух парадигм. Аргументами в пользу конкретного выбора служат прежде всего калибруемость модели и качественное соответствие между модельной динамикой и наблюдаемой картиной сукцессии. В рассмотренном частном случае имеет место локальная устойчивость равновесного состояния, которое интерпретируется как молодой березовый лес, где береза оказывает сильное подавляющее влияние на развитие вейника и собственного подроста. Устойчивость установлена методом линейного приближения нелинейной системы в окрестности равновесия.

Анализ бифуркаций (к иным динамическим режимам) способен обнаружить разнообразие возможных вариантов глобального асимптотического поведения модели, которое отражало бы известное разнообразие путей и исходов сукцессии. Подобное разнообразие должно служить дополнительным аргументом в пользу той или иной формы нелинейной модели.

Литература

Логофет Д.О. Свирежевский принцип замещения и матричные модели динамики популяций со сложной структурой // Журн. общ. биол.– 2010.– Т. 71.- № 1.- С.30-40.

Уланова Н.И., Белова И.Н., Логофет Д.О. О конкуренции среди популяций с дискретной структурой: динамика популяций вейника и березы, растущих совместно // Журн. общ. биол.– 2008.– Т. 69. - № 6.- С. 478-494.

Leslie P.H. On the use of matrices in certain population mathematics // Biometrika.– 1945.– V. 21.- P.1-18.

Logofet D.O. Identified progeny of unknown parents: matrix calibration via an extremal principle // J. Math. Biol.– 2011 (in press).

Volterra V. Leçons sur la Théorie Mathématique de la Lutte pour la Vie. - Paris: Gauthier–Villars, 1931.- 214pp. Русский перевод: Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование.- М.: Наука, 1976.- 286с.

ПРИМЕНЕНИЕ T&P МОДЕЛИ ДЛЯ ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ДЫХАНИЯ ПОЧВЫ В ЭКОСИТЕМАХ ЮЖНО-ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ

Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Петров А.С.

Учреждение Российской Академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино Московская обл., Россия
vlopes@mail.ru

Аннотация: были протестированы разные версии T&P модели для численной оценки среднемесячной эмиссии CO_2 из почв в четырех экосистемах южно-таежной зоны. Показано, что наиболее адекватно выбранная модель описывала среднемесячную интенсивность дыхания дерново-подзолистых почв под лесным и луговым ценозами (σ = 0,028 и 0,033 г См$^{-2}$сут$^{-1}$) и менее точно оценивала этот показатель в серых лесных почвах под лесным и агро- ценозоми (σ = 0,037 и 0,048 г См$^{-2}$сут$^{-1}$).

Введение

Эмиссия CO_2 из почв (или общее дыхание почвы, SR) наряду с аккумуляцией углерода в результате фотосинтетической деятельности растений являются основными, противоположно направленными потоками в углеродном цикле наземных экосистем. SR характеризуется высокой временной и пространственной вариабельностью, а основными абиотическими факторами, влияющими на его величину, являются температура почвы (и опосредовано - температура воздуха), а также увлажнение почв, которое в вегетационный период часто выражают через количество осадков. Поэтому, SR, как правило, описывают с помощью простых или множественных, линейных или экспоненциальных моделей, используя в качестве параметров гидротермические характеристики: температуру воздуха и количество осадков, либо - температуру и влажность почв. Один из подходов, позволяющих на основе климатических параметров (среднемесячной температуры воздуха, *T* и количества осадков, *P*) описывать глобальное распределение SR на месячном уровне осреднения, был предложен американскими исследователями (*T&P модель*; *Raich and Potter, 1995*). Цель настоящей работы заключалась в верификации и оценке точности различных версий *T&P модели* для расчета дыхания почвы в различных экосистемах южно-таежной зоны на основе данных многолетнего круглогодичного мониторинга.

Объекты и методы исследования

Экспериментальные участки, на которых в течение 13 лет велись наблюдения за интенсивностью выделения CO_2 из почв, располагались на территории Приокско-террасного государственного биосферного заповедника (54°55'N, 37°34'E; дерново-подзолистая песчаная почва; лесной и луговой ценозы) и на территории опытно полевой станции ИФХиБПП РАН (54°20'N, 37°37'E; серая лесная суглинистая почва; лесной и агро- ценозы). Скорость выделения CO_2 из почв (общее дыхание почвы) определяли круглогодично с ноября 1997 г. по октябрь 2010 г. с интервалом 7-10 дней, используя камерный статический метод. Величина среднемесячной интенсивности почвенного дыхания (SRm) рассчитывалась как арифметическое среднее из 3-5 измерений, проведенных за расчетный месяц. Климатические данные (среднемесячные температуры воздуха и месячные суммы осадков) были любезно предоставлены на Станции фонового мониторинга (п. Данки, Серпуховский район, Московская обл.), расположенной на территории Приокско-террасного заповедника.

T&P модель для оценки среднемесячной интенсивности выделения CO_2 из почв (*SRm, г См$^{-2}$сут$^{-1}$*) на основе среднемесячной температуры воздуха (*Ta, ^oC*) и суммы осадков за соответствующий месяц (*P, см*) имеет следующий вид (*Raich and Potter, 1995):*

$$\mathrm{SRm} = R_0 \cdot e^{Q \cdot Ta} \cdot (P/K + P) \qquad (1),$$

где R_0 *(г См$^{-2}$сут$^{-1}$)* – дыхание почвы при 0°С в отсутствие лимитирования влаги; *Q (^{o}C^{-1})* – экспоненциальное отношение между почвенным дыханием и температурой и *К (см)* – константа полунасыщения в гиперболическом отношении между SR и месячным количеством осадков. Первоначально были предложены следующие параметры модели *(T&P-1): R_0 = 1,334 гСм$^{-2}$сут$^{-1}$, Q = 0,03992 ^{o}C^{-1}* и *К = 1,634 см* (*Raich and Potter, 1995)*. В следующей версии (*T&P-2)* использовались несколько иные параметры: *R_0 = 1,25 гСм$^{-2}$сут$^{-1}$, Q = 0,05452 ^{o}C^{-1}* и *К = 4,259 см* (*Raich et al., 2002*).

Для оценки среднемесячной интенсивности SR в 4-х различных экосистемах южно-таежной зоны были протестированы обе предложенные версии - *T&P-1* и *T&P-2*, а также репараметризованные нами по коэффициенту R_0 версии моделей *T&P-1p* и *T&P-2p*, в которых величина R_0 представляла экспериментально определенную для каждой из четырех экосистем среднемесячную величину дыхания почвы при среднемесячной Та, равной 0°С. Параметр R_0 составил соответственно: 1,79 и 1,96 г См$^{-2}$сут$^{-1}$ для лесного и лугового ценозов на дерново-подзолистой почве, и 1,28 и 0,77 г См$^{-2}$сут$^{-1}$ для лесного и агро- ценозов на серой лесной почве. Оценка точности различных версий *T&P* модели проводилась методом наименьших квадратов (R^2 и коэффициент регрессии, а), средней квадратичной ошибки (σ, г См$^{-2}$сут$^{-1}$) и «коэффициента несовпадения» Тейла (КНТ, *Шитиков и др., 2003*).

Результаты и обсуждение.

Наиболее адекватно среднемесячную интенсивность дыхания дерново-подзолистых почв описывали: *T&P-1p* версия модели - для лесного ценоза и версия *T&P-2p* - для лугового (таблица). Коэффициенты несовпадения Тейла были для этих версий самые низкие (0,16 и 0,19), а средние квадратичные ошибки составляли 0,028 и 0,033 г См$^{-2}$сут$^{-1}$. Дыхание серых лесных почв на месячном уровне осреднения все тестируемые версии *T&P* модели описывали несколько хуже. Наиболее адекватным для численной оценки SR в лесном ценозе были версии *T&P-1* и *T&P-1p* (σ = 0,037-0,038 г См$^{-2}$сут$^{-1}$; КНТ = 0,20-0,21), а в агроценозе - версии *T&P-1 и T&P-2* - (σ = 0,048-0,051 г См$^{-2}$сут$^{-1}$; КНТ = 0,27-0,28). Несовпадение экспериментальных и расчетных данных наблюдалось, главным образом, в летние месяцы.

Таблица 1. Оценка точности разных версий *T&P* модели для расчета среднемесячной интенсивности дыхания почвы в различных экоситемах южно-таежной зоны.

Модель	*T&P-1*	*T&P-1p*	*T&P-2*	*T&P-2p*	*T&P-1*	*T&P-1p*	*T&P-2*	*T&P-2p*
	Дерново-подзолистая почва, лес				*Дерново-подзолистая почва, луг*			
R^2	0,67	0,67	0,38	0,66	0,67	0,67	0,41	0,66
а	1,42	1,05	1,01	0,88	2,05	1,38	1,52	1,15
σ, г См$^{-2}$сут$^{-1}$	0,036	0,028	0,178	0,049	0,234	0,053	0,057	0,033
КНТ	0,20	0,16	0,37	0,17	0,47	0,22	0,31	0,19
	Серая лесная почва, лес				*Серая лесная почва, агроценоз*			
R^2	0,63	0,63	0,41	0,56	0,43	0,43	0,44	0,62
а	1,23	1,27	1,00	1,07	1,07	1,83	0,94	1,10
σ, г См$^{-2}$сут$^{-1}$	0,037	0,038	0,148	0,082	0,048	0,064	0,051	0,093
КНТ	0,20	0,21	0,35	0,26	0,28	0,34	0,27	0,38

Работа выполнялась при поддержке МНТЦ (проект 4028) и Программы Президиума РАН.

Литература

Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации.- Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003.- 463 с.

Raich J.W., Potter C.S., Bhagawatti D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94 // Global Change Biol.- 2002.- V. 8.- P. 800-812.

Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils // Global Biogeochem. Cycles.- 1995. Vol.9.- P. 23-36.

МОЗАИЧНОСТЬ ЛЕСНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ И ВЗАИМОСВЯЗИ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ - ПОЧВЕННАЯ БИОТА - ПОЧВА

Лукина Н.В.[1], Смирнов В.Э.[2], Орлова М.А.[1], Камаев И.О.[1], Кравченко Т.В.[1], Краснов Д.А.[1]

[1]*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32*
lukina@cepl.rssi.ru

[2]*Институт математических проблем биологии РАН, 142290, г. Пущино Московской обл., ул. Институтская, д.4*

Аннотация: в докладе развиваются представления о фундаментальном свойстве лесного биогеоценотического покрова – мозаичности. Анализируются несколько базовых концепций мозаичности биогеоценозов и их отдельных компонентов: лесная парцелла Н.В. Дылиса (1969), лесные элементарные почвенные ареалы В.М. Фридланда (1986), ценобиотическая микрогруппировка Л.Г.Раменского (1958). Тессера рассматривается как элементарная единица лесных биогеоценозов, на уровне которой реализуются взаимосвязи растительность - почвенная биота - почва. На примере таежных лесов показано, что информативными показателями этих взаимосвязей являются характеристики качества опада и плодородия почв.

Мозаичность является фундаментальным свойством лесного биогеоценотического покрова. Познание механизмов формирования мозаичности биогеоценозов необходимо для понимания закономерностей их функционирования и прогнозирования развития. Причиной мозаичности покрова может быть влияние как абиотических (рельеф, почвообразующие породы), так и биотических факторов. На продвинутых стадиях развития леса представлены мозаикой сукцессионных стадий, обусловленной влиянием биоты, так называемых экосистемных инженеров (Jones et al, 1994). Можно выделить несколько базовых концепций мозаичности лесных биогеоценозов и их отдельных компонентов: лесная парцелла Н.В. Дылиса (Дылис, 1969), лесные элементарные почвенные ареалы В.М. Фридланда (Фридланд, 1986), ценобиотическая микрогруппировка Л.Г. Раменского (Раменский,1938). В связи с изучением мозаичности лесных биогеоценозов актуальной является проблема взаимосвязей растительность – почвенная биота – почва. Факторами, обусловливающими эти взаимосвязи, являются качество опада и плодородие почв. Известно довольно много работ по влиянию растений, регулирующих условия местообитания, на сообщества микроорганизмов (Spetch, 1958; Northup et al., 1999; Никонов и др., 2006 и др.). Исследования, касающиеся пространственного распределения почвенной мезофауны в связи с мозаикой растительности, единичны.

Цель данной работы – дать анализ связей между мозаичностью таежных лесов, обусловленной биотой, и плодородием почв.

Для поиска взаимосвязей растительность – почвенная биота – почва решающее значение имеет выбор элементарной единицы лесного покрова, на уровне которой они реализуются. Парцелла включает в себя все эти компоненты, однако не является элементарной единицей биогеоценоза. Нами развиваются представления о тессере как единице лесного покрова (Jenny, 1958, Карпачевский, 1977, Карпачевский и др., 2007). По нашим представлениям тессера – элемент мозаики всего лесного биогеоценотического покрова. С учетом фундаментальной роли растений как продуцентов органического вещества, площади и формы тессеры идентифицируются по доминирующим растениям, т.е. по растительному компоненту, который соответствует понятию ценобиотической микрогруппировки Л.Г. Раменского. Существование связей между составом растительных сообществ, почвенной биоты и плодородием почв на уровне биогеоценозов не вызывает

сомнений. Эти связи выражаются в формировании гумуса трех типов: мор, модер и мулль. Тип гумуса обусловлен качеством растительного опада и связанным с ним составом почвенной биоты, и может изменяться в ходе эволюции и сукцессии лесов. Открытым остается вопрос о существовании таких связей внутри биогеоценозов на уровне тессер. Взаимосвязи растительность – почвенная биота – почва в тессерах реализуются через растительный опад, из которого формируются почвенное органическое вещество и органогенные горизонты, и который является источником энергии для почвенной биоты. Информативными интегральными показателями этих взаимосвязей в тессерах являются характеристики плодородия почв, формирующегося с участием как растений, так и почвенной биоты. Диагностическим критерием плодородия почв является качество опада, включающее в себя два компонента - элементы питания и вторичные метаболиты (Berg, 2000). Различные виды растений формируют опад различного качества. Нами установлено, что в северотаежных лесах и лесах на северном пределе распространения почвы древесных тессер богаче элементами питания, по сравнению с почвами межкроновых кустарничково-зеленомошных и лишайниково-зеленомошных тессер. Содержание элементов питания в почвах древесных (еловых или березовых) и разнотравных тессер сопоставимо. На примере еловых лесов показано, что уровень плодородия почв в древесных тессерах связан с возрастом деревьев, а также с формированием крон различного строения и плотности. На фоне повышенного содержания азота и доступных соединений кальция и марганца в органогенных горизонтах почв, высокое содержание в них вторичных метаболитов (полифенолов, танинов, лигнина), обусловленное составом опада, стволовых и кроновых вод, является причиной относительно низкой биомассы базидиомицетов в еловых тессерах по сравнению с межкроновыми зеленомошно-кустарничковыми (Лукина и др., 2008). Почвы сосновых тессер, напротив, отличаются высокой биомассой базидиомицетов по сравнению с межкроновыми тессерами. Внутрибиогеоценотическое пространственное размещение почвенной мезофауны, за исключением зоофагов, связано с тессерами, что обусловлено формированием опада и органогенных горизонтов почв специфического состава с различным содержанием вторичных метаболитов и регулированием древесными растениями внешних условий среды.

На основе полученных результатов можно заключить, что для анализа динамики биоразнообразия и циклов элементов питания необходимы модели, учитывающие мозаичность лесного покрова. Эти модели позволят учесть различные пространственные масштабы проявления взаимосвязей растительность - почвенная биота - почва, начиная с элементарной единицы – тессеры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ для молодых ученых МК-4046.2011.4, РФФИ 10-04-00213а, Программы Президиума РАН «Биологичесое разнообразие».

Литература

Дылис Н.В. Структура лесного биогеоценоза // "Комаровские чтения".- Т.21.- М.: Наука, 1969.- 28 с.

Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе.- М.: Изд-во МГУ, 1977.- 312 с.

Лукина Н.В., Полянская Л.М., Орлова М.А. Питательный режим почв северотаежных лесов.- М.: Наука, 2008.- 342 с.

Никонов В.В., Лукина Н.В., Полянская Л.М. и др. Численность и биомасса почвенных микроорганизмов северотаежных сосновых лесов при пирогенной сукцессии // Почвоведение.- 2006.- №4.- С.484-494

Раменский Л.Г. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель.- М.-Л.: Сельхозгиз. 1938.- 620 с.

Фридланд В.М. Проблемы географии генезиса и классификации почв.- М.: Наука, 1986.- 243 с.

Berg, B Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soil. Forest Ecology and Management, 2000,133: 13-22

Jenny H. Role of the plant factor in the pedogenic functions // Ecology, 1958, Vol.39, №1, p.5-16

Jones C.G, Lawton J.H, Shachak M. Organisms as ecosystem engineers.- Oikos, 1994.- 69.- P. 373-386.

Mathieu J., Grimaldi M., Jouquet P. et al. Spatial patterns of grasses influence soil macrofauna biodiversity in

Amazonian pastures // Soul Biology and Biochemistry.- 41.- 2009. P. 586-593.
Northup B.K., Brown J.R., Holt J.A. Grazing impacts on the spatial distribution of soil microbial biomass around tussock grasses in a tropical grassland // Applied Soil Ecology.- №13.- 1999.- P. 259-270.
Spetch R.L. Micro-environment (soil) of natural plant community. In: Proceedings of Canberra Symposium. UNESCO, Paris.- 1958.- P.150-155

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ЛЕГКИХ ДЕРНОВО-СЛАБОПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ ПРИОКСКО-ТЕРРАСНОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА

Лукьященко К.И.[1], Архангельская Т.А.[2]

[1,2]*Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[1]kseniya.lu@gmail.com [2]arhangelskaia@rambler.ru

Аннотация: в статье приводятся результаты математического моделирования зависимостей температуропроводности от влажности для дерново-слабоподзолистых супесчаных почв Приокско-Террасного Биосферного Заповедника. Температуропроводность почв при увлажнении возрастает в 2,5-5 раз. В результате аппроксимации экспериментальных данных подобраны параметры, позволяющие рассчитывать температуропроводность исследованных почв при любых значениях влажности. Среднеквадратичные относительные ошибки расчетов составили 2,2-7,5 %.

Введение

В связи с тем, что экспериментальное определение температуропроводности почв трудоемко, все большее распространение получают методы расчетного определения данного показателя по данным о плотности, содержании органического вещества, гранулометрическом и минералогическом составе, текущих значениях влажности.

Некоторые результаты моделирования температуропроводности дерново-слабоподзолистых супесчаных почв лесной и луговой экосистем Приокско-Террасного Биосферного Заповедника представлены в данной работе.

Объекты и методы

Образцы ненарушенного сложения были отобраны из двух разрезов, расположенных на лугу (разрез № 1) и в лесу (разрез № 2) на территории Приокско-Террасного Биосферного Заповедника (ПТБЗ). Район исследований относится к подзоне смешанных лесов.

Профили исследованных почв включали в себя следующие горизонты. Разрез № 1: Ad (0-4см), А ст пах (4-20(22)см), ВС (20 (22)-58см), С1 (58-84см), С2 (84-120см). Разрез № 2: Ао (0-4см), АЕ (4-10(15)см), В (10(15)-24(35)см), ВС (24(35)-57(62)см), С1 (57(62)-85см), С2 (85-120см).

Температуропроводность отобранных монолитов определяли в лаборатории, применяя метод, основанный на теории регулярного режима Г.М. Кондратьева. Для каждого образца определяли зависимость температуропроводности (к) от влажности (ϑ) в диапазоне от капиллярного насыщения до воздушно-сухого состояния. После проведения измерений температуропроводности для каждого образца определяли плотность почвы, содержание углерода, плотность твердой фазы.

Полученные экспериментальные кривые были аппроксимированы четырехпараметрической регрессионной зависимостью к(ϑ).

Результаты и обсуждение

Лабораторные исследования показали, что плотность исследованных почв в целом увеличивалась с глубиной, значения составили от 1,27 г/см^3 в гор. АЕ до 1,76 г/см^3 в гор. C_1 (таблица 1). Диапазон значений плотности твердой фазы составил 2,65-2,74 г/см^3; содержания углерода – 0,05-0,93 г/100 г.

Экспериментальные зависимости температуропроводности от влажности для старопахотного, гумусо-элювиального и переходного к породе горизонтов обладают схожей формой опрокинутой параболы с резким ростом температуропроводности в диапазоне влажности от 0 до 0,10-0,20 см^3/см^3, максимумом при влажностях 0,15-0,32 см^3/см^3 (κ_{max} = 7,64-9,92×10^{-7} м^2/с) и прекращением роста температуропроводности или даже некоторым уменьшением ее при последующем увлажнении. Зависимости $\kappa(\vartheta)$ для более плотного и тяжелого по гранулометрическому составу нижнего слоя материнской породы представляют собой кривые выраженной S-образной формы с длинным пологим участком при влажности менее 0,13-0,20 см^3/см^3 и областью выраженного роста с выходом на максимум при дальнейшем увлажнении (κ_{max} = 5,80-9,70×10^{-7} м^2/с).

Проведенный корреляционный анализ показал, что среди исследованных физических свойств ни одно не было решающим в формировании температуропроводности почвы. Тем не менее, существует тенденция: чем плотнее почва, тем более выражена S-образность зависимости $\kappa(\vartheta)$. Возможно, различия в значениях температуропроводности определяются комплексными характеристиками, такими, как структура почвы.

Полученные экспериментальные кривые были аппроксимированы регрессионной зависимостью $\kappa(\vartheta)$, предложенной ранее:

$$\kappa = \kappa_0 + a\exp\left[-0.5\left(\frac{\ln\left(\frac{\vartheta}{\vartheta_0}\right)}{b}\right)^2\right] \qquad (1)$$

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

Для исследованных горизонтов были рассчитаны параметры аппроксимации уравнения (1). Все полученные параметры являются значимыми ($p<0,05$). Эти параметры могут быть использованы для оценки температуропроводности исследованных горизонтов при любых значениях влажности.

Таблица 1. Параметры аппроксимации формулой (1) экспериментальных зависимостей $\kappa(\vartheta)$ для исследованных горизонтов, среднеквадратичная относительная (Δотн) ошибка расчетов температуропроводности

Глубина отбора	Горизонт	ρ, г/см^3	κ_o, 10^{-7} м^2/с	a, 10^{-7} м^2/с	ϑ_o, см^3/см^3	b	Δотн, %
5-15 см	Аст пах	1,44	2,41	4,91	0,26	1,03	4,1
25-35 см	BC	1,57	2,94	7,05	0,12	1,34	3,2
70-80 см	C_1	1,76	4,66	5,36	0,20	0,18	7,5
90-100 см	C_{2g}	1,66	2,03	3,85	0,33	0,20	2,2
4-14 см	AE	1,27	2,49	5,01	0,19	0,78	6,2
25-35 см	B(BC)	1,51	2,24	7,52	0,16	1,67	6,4
65-75 см	C_1	1,56	1,97	7,83	0,15	1,04	2,3
90-100 см	C_2	1,66	3,30	5,58	0,27	0,37	3,2

Полученные регрессионные кривые хорошо описывают экспериментальные данные, полученные для всех горизонтов: несмещенная оценка коэффициента детерминации R изменяется в диапазоне 0,984-0,998. Среднеквадратичные относительные ошибки расчетов составили от 2,2 до 7,5 % от экспериментальных величин. Низкие ошибки расчетов позволяют надеяться, что параметры, приведенные в таблице 1, могут успешно

использоваться для расчетной оценки температуропроводности исследованных почв при любых значениях влажности.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МИНЕРАЛЬНОГО И ОРГАНИЧЕСКОГО АЗОТА В ПОЧВЕ

Лямкина Ю.Б.

Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия
lyamkina@inbox.ru

Аннотация: рассматривается модель динамики азота в почве с учетом симбиотической азотфиксации клубеньковыми бактериями корней сои. Благодаря образованию на корнях клубеньков с азотфиксирующими бактериями, соя сама питается азотом из этого источника и обогащает почву связанным азотом.

Почва – сложная система, состоящая из минерального и органического компонентов. Она служит субстратом для развития растений (Пенников, 1997). Основные источники пополнения запасов азота в почве – азотфиксирующие свободноживущие и клубеньковые микроорганизмы, а также поступление его с осадками. Наиболее значительное количество накапливается в почве благодаря жизнедеятельности клубеньковых бактерий бобовых растений.

Клубеньковые бактерии снабжают бобовое растение азотом, который фиксируют из воздуха. Растения же, в свою очередь, поставляют бактериям продукты углеводного обмена и минеральные соли, необходимые им для роста и развития (Мильто, 1982).

Модель динамики азота в почве учитывает разложение свежего органического вещества (растительных остатков, корневых волосков и отмерших клубеньков) и гумуса, за счет которых происходит пополнение почвенного азота. Информационное обеспечение модели составят экспериментальные данные специально спланированных полевых опытов, проведенных в ГНУ АНИИСХ (АНИИЗиС). В докладе рассматриваются результаты полевых опытов, и анализируется возможность их использования для идентификации параметров модели, а именно: уровень азотфиксации и продуктивность сортов сои в зависимости от азотного питания; влияние фосфорных и калийных удобрений на азотфиксацию и урожайность сои; влияние молибдена и кобальта на накопление микроэлементов и урожайность сои.

Модель динамики азота ориентирована на совместное использование с базовой моделью AGROTOOL, разработанной в лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического института РАСХН (г. Санкт-Петербург), включающей в качестве одного из блоков модель азотного цикла почвы (Полуэктов и др., 2006), что позволит рассчитывать обеспеченность растений сои как симбиотическим (Лямкина, 2010), так и почвенным минеральным азотом.

Литература

Азотное питание и продуктивность растений.– Л.: Изд-во ЛГУ, 1988.– 186 с.

Лямкина Ю.Б. Моделирование продукционного процесса бобовых растений на примере сои. // Известия АлтГУ, 2010. – №1. – С. 93–96.

Мильто Н.И. Клубеньковые бактерии и продуктивность бобовых растений.– Минск: Наука и техника, 1982.– 296 с.

Пенников В.Д., Минеев В.Г. Почва, климат, удобрение и урожай.– М.: Агропромиздат, 1987.– 512 с.

Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур.– СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2006.– 396 с.

ДВА ПРЕДЕЛЬНЫХ ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Маергойз Л.С. [1], Салагаева А.В. [2], Сидорова Т.Ю. [1], Хлебопрос Р.Г. [1,2]

[1] *Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*
[2] *Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, Россия*
olikru@yandex.ru

Аннотация: в работе рассмотрены современные проблемы антропогенного воздействия на климат (проблема глобального потепления) и предложен математический алгоритм объективизации критериев определения дифференцированной ответственности государств в сфере сокращения выбросов парниковых газов и борьбы с изменением климата.

Первые научные работы, связанные с повышением температуры поверхности Земли, появились в первой половине XX века, а осознание обществом этой проблемы, озабоченность общественных кругов и начало политических дискуссий следует отнести к концу XX века. Физические причины глобального потепления достаточно последовательно проанализированы наукой, однако до сих пор в общественном сознании и даже в научных кругах высказываются сомнения в доминирующем антропогенном влиянии на климат Земли.

Согретая поверхность Земли излучает в космос инфракрасные лучи, энергия которых возрастает с повышением температуры δT4, где δ - постоянная Стефана-Больцмана, T - абсолютная температура поверхности Земли. Наличие парниковых газов в атмосфере (к ним относятся молекулы воды, углекислого газа, метана и др.) приводит к тому, что часть излученной Землей энергии возвращается на земную поверхность. И поэтому термодинамическое равновесие в первом приближении описывается уравнением

$$E(1-A) = \delta T4(1-a),$$

где E – энергия Солнца, A – альбедо Земли, a - параметр, определяющий долю излученной Землей тепловой энергии, которая возвращается парниковыми газами к поверхности Земли.

Рисунок 1. Уточненный фазовый портрет динамики глобальной температуры Земли

Среди парниковых газов водяной пар занимает особое место. Содержание углекислого газа и других газов практически не меняется при изменении температуры поверхности Земли. А содержание метана и в особенности водяных паров в атмосфере резко возрастает с повышением температуры, поэтому возникает так называемая положительная обратная связь. Возросла температура поверхности Земли - существенно возросло содержание паров воды в атмосфере. Как следствие возрос парниковый эффект и возросла температура поверхности Земли. Этот процесс может продолжаться вплоть до полного испарения всех океанов. В результате образуются две устойчивые точки: точка 1 - весь океан замерз, температура поверхности Земли ~ минус 20 °С; точка 3 - весь океан испарился, температура поверхности Земли - 600 °С (рис. 1).

Между этими двумя устойчивыми состояниями возникает "водораздел": неустойчивая точка 2, соответствующая температуре ~ 10 ◦С [1]. Левее точки 2 в системе Земля -Солнце при наличии парниковых газов температура земной поверхности самопроизвольно опустится до минус 20 ◦С, а правее точки 2 земная поверхность разогреется до 600 ◦С. Ближайшие к Земле планеты демонстрируют нам это предсказание (Марс и Венера). В температурной эволюции поверхности Земли важную роль сыграла возникшая на Земле жизнь (биосфера), которая стала управлять содержанием двух парниковых газов - метана и углекислого газа. На фазовой портрете возникают новая устойчивая (5) и неустойчивая (4) точки.

Таким образом, на Земле установилась благоприятная для всего живого температура, которая эволюционировала в зависимости от соотношения между выделяемым вулканами углекислым газом и активностью биосферы по захоронению углерода в земную толщу. То обстоятельство, что последние 1,5 - 2 столетия люди стали все более интенсивно использовать невозобновляемые топлива (уголь, нефть, природный газ), приводит к тому, что именно человечество непроизвольно влияет на содержание парниковых газов в атмосфере. Парниковые газы, выброшенные в атмосферу в результате нашей деятельности, увеличивают температуру Земли, что в свою очередь увеличивает содержание парникового газа в атмосфере - паров воды (увеличивается параметр а), и таяние ледников (уменьшается параметр А). Одновременное изменение этих параметров с повышением температуры создает угрозу перегрева земной поверхности за пределы точки 4 и катастрофического спонтанного движения в сторону температуры, соответствующей точке 3. Более последовательный анализ взаимодействия биосферы и атмосферы показал, что на фазовом портрете динамики глобальной температуры Земли возникают еще две точки - равновесная 7 и неравновесная 6, которые оказываются левее точек 4 и 5.

Антропогенное влияние на стабилизацию температуры поверхности Земли возможно в двух направлениях: путем регулирования в атмосфере и на поверхности Земли параметров А и а (парниковый эффект). Изменять А и а можно меняя в составе атмосферы не только присутствие парниковых газов, но и отражательную способность земной поверхности за счет изменения количества облаков на разных высотах.

Литература

Макарьева А.М. Парниковый эффект и проблема устойчивости среднеглобальной температуры земной поверхности / А.М. Макарьева, В.Г. Горшков // Доклады РАН.- 2001.- Т. 376.- С. 810-814.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ЦИКЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ. ПРИНЦИП "БРИТВЫ ОККАМА"

Маклаков К.В.[1], Кшнясев И.А.[2]

ИЭРиЖ УрО РАН, Екатеринбург, Россия
[1]kvm@sky.ru [2]kia@ipae.uran.ru

Аннотация: на примере сравнения простых и сложных моделей, описывающих циклическую динамику, показано преимущество простых моделей с небольшим набором интегральных параметров как более прозрачных для понимания и дающих больше разносторонних возможностей для дальнейшей разработки и уточнения.

Бритва Оккама используется в науке по принципу: если какое-то явление может быть объяснено двумя способами, например, первым — через привлечение сущностей (терминов, факторов, преобразований и т. п.) A, B и C, а вторым — через A, B, C и D, и при этом оба способа дают одинаковый результат, то сущность D лишняя, и верным является первый способ (который может обойтись без привлечения лишней сущности).

Порой принцип выражается в словах «То, что можно объяснить посредством меньшего, не следует выражать посредством большего» (лат. *Frustra fit per plura quod potest fieri per pauciora*). При этом обычно приводимая историками формулировка «сущности не следует умножать без необходимости» (лат. *Entia non sunt multiplicanda sine necessitate*) в произведениях Оккама не встречается. В современной науке под бритвой Оккама обычно понимают более общий принцип, утверждающий, что если существует несколько логически непротиворечивых определений или объяснений какого-либо явления, то следует считать верным самое простое из них.

Современное моделирование циклического поведения популяций сталкивается с проблемой всё большего усложнения механизмов регулирования циклов. Этому способствует разработанный для экологии математический аппарат и развитие вычислительной техники. При этом наблюдается явное увлечение в объяснении циклической динамики численности межвидовым взаимодействием хищник-жертва, идея которого была описана моделью Лотки-Вольтерра, многократно усложнявшейся в дальнейшем. Современные модели, претендуя на универсальность в описании циклов на основании взаимодействия хищник-жертва, оперируют длинным набором (до 11) различных экологических параметров, многие из которых трудноопределимы (рис.1).

Рис.1. Динамика популяционной численности в модели с хищничеством (11 параметров) (Wang et al., 2009)

Однако авторы многих популяционных моделей не могут не учитывать в своих построениях ограниченный рост популяции и используют в описании роста логистическое уравнение Ферхюльста-Перла с некоей ограниченной ёмкостью среды (K), независимой от

обилия хищников. Следует отметить, что понятие ёмкости среды как предельной численности (плотности) популяции является интегральной оценкой благоприятности условий жизни на данный момент и может отражать, например, сезонную динамику климатических и других условий.

Так, 3-4-летние циклы численности мелких грызунов в высоких широтах могут описываться динамической ёмкости среды (описываемая, например, синусоидой с двумя параметрами K и A) в сочетании с «популяционным моментом» (демографическими параметрами вида). Если динамическую функцию ёмкости среды грубо описывать синусоидой, то достаточно двух параметров: K – среднегодовая ёмкость среды и A – амплитуда колебаний ёмкости среды. Для описания «популяционного момента» так же достаточно двух экологически определимых параметров: T – времени запаздывания в реакции популяции на изменения ёмкости среды и либо λ – коэффициент геометрического роста (geometric growth rate), либо r – удельная мгновенная скорость роста популяции (per capita instantaneous growth rate) в зависимости от выбранной либо дискретной, либо дифференциальной модели популяционного роста соответственно (в соответствующих таким моделям общепринятых обозначениях).

Рис.2. Динамика численности в дискретной и дифференциальной модели с динамической ёмкостью среды

Получаемые при моделировании (с 4 параметрами) результаты так же хорошо воспроизводят популяционные циклы грызунов, как и более сложные модели с влиянием хищничества (Кшнясев, Жигальский, Хворенков, 2002). Конечно, такой интегральный показатель как ёмкость среды может включать в себя влияние хищничества, но он же позволяет учитывать и другие важные условия (например, кормовые, температурные или защитные) при дальнейшей разработке более простой, но адекватной исходной модели.

Литература

Wang H.,Nagy O.D., Gilg O., Kuang Y., The roles of predator maturation delay and functional response in determining the periodicity of predator–prey cycles // Mathematical Biosciences.– 2009.- V.221.- C.1–10.

Кшнясев И. А., Жигальский О. А. Хворенков А. В. Динамика европейской рыжей полевки в хвойно-широколиственных лесах Удмуртии. Компоненты рядов численности // Многолетняя динамика численности птиц и млекопитающих в связи с глобальными изменениями климата: Материалы междунар. симп. Казань.- 2002.- С. 222-229.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА КРАСНОЯРСКОЙ ГЭС

Мельников А.Ю. [1], Хлебопрос Р.Г.[1,2]

[1] *Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*
alexmel@mail.ru

[2] *Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, Россия*
alexmel@mail.ru

Аннотация: построение математической модели для изучения экологических последствии строительства крупных гидротехнических сооружений и связанного с этим появления крупных водохранилищ позволяет на основании верификации параметров модели в ретроспективе натурных измерений осуществлять прогноз изменения климата в ближайшие десятилетия и состояние экологических параметров водохранилища.

В мире насчитывается более 30 тыс. водохранилищ с суммарным полным объемом около 6 тыс. куб. км. При этом полезный объем оценивается почти в 3,5 тыс. куб. км, что близко к 10% среднегодового стока всех рек мира. Общая площадь зеркала водохранилищ мира составляет 600-620 тыс. кв. км.

В России около 1200 водохранилищ и их суммарный объем свыше 900 куб. км, а полезный около 450 куб. км. Площадь их водного зеркала превышает 100 тыс. кв. км.

Одно из них расположено на территории Красноярского края и Хакасии.

Красноярская ГЭС образует крупное Красноярское водохранилище. Площадь водохранилища около 2000 кв. км, полный и полезный объём 73,3 и 30,4 куб. км соответственно.

Общая протяженность береговой линии по контуру водохранилища 2560 км. Ширина водохранилища от 4-х до 15 км. Максимальная глубина у створа ГЭС 100 м.

Проектирование и строительство Красноярской ГЭС осуществлено в соответствии с действовавшими в тот период требованиями и нормами по экологии, современные требования более точно отображают реальные проблемы связанные с защитой окружающей среды.

Создание водохранилища существенно изменило ландшафт и гидрологический режим, также создало следующие экологические проблемы:

1) В результате не правильного решения проблемы полезного водосброса образовалась Полынья длинной 200 км и все связанные с ней проблемы (образование облаков, тумана, смога; повышенная влажность, осадки, холодная зима, уменьшение количества солнечных дней).
2) В результате небрежной подготовки зоны затопления под водой оказались леса, деревни, кладбища и т.д., что негативно повлияло на качество воды и состояние рыбного хозяйства.

Для исследования данных проблем и экологических последствий, а также для поиска возможных решений целесообразно построить математическую модель описывающую влияние водохранилища и полыньи на различные экологические аспекты прилегающих территорий.

Блок-схема такого антропогенного влияния на окружающую среду приведена на рисунке 1.

Для верификации параметров модели можно воспользоваться натурными измерениями экологических параметров за десятилетия до строительства ГЭС, сопоставив их с натурными измерениями тех же экологических параметров, которые эволюционировали за десятки лет после строительства.

Температура ↑		Осадки ↓↑	
Облачность и Влажность воздуха			
↕	↕	↕	
Здоровье людей	Сельское и лесное хозяйство	Водные ресурсы	Подъем уровня водохранилища
Болезни передаваемые водой ↑	Урожайность↓↑ Животноводство ↓↑ Прирост древесины ↓ Рыболовство↓	Водопотребление↓↑ Водообеспечение↓↑ Качество воды↓	Затопление берегов↑ Стоимость защитных сооружений↑ Деградация земель↑ Качество подземных вод↓

Рисунок 1 – Пути антропогенного влияния на окружающую среду

В результате появится возможность прогнозировать, а возможно и управлять эволюцией этих экологических параметров в ближайшее десятилетие.

Литература

РАОЭиЭ «ЕЭС России», Методические указания по оценке влияния гидротехнических сооружений на окружающую среду РД 153-34.2-02.409-2003 / Департамент научно-технической политики и развития ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» Санкт-Петербург, 2003.

Понтрягин Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Л.С. Понтрягин.– М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974.

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ВОДЫ КРАСНОЯРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Мельников А.Ю. [1], Сапожников В.А.[1]

[1] *Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*
alexmel@mail.ru

Аннотация: в работе рассматривается модель прогнозирования качества воды в экосистеме водоема. Для модели показаны существование, единственность решения, и устойчивость по Ляпунову.

Для Красноярского водохранилища, имеющего важное хозяйственное значение для всего приенисейского региона, задача оценки и прогнозирования качества воды пока не решена. Водная экосистема Красноярского водохранилища представляет очень сложный объект исследования. Более 30 лет на Красноярском водохранилище ведутся натурные исследования и экспериментальные работы, сформирована база данных различных параметров водохранилища (гидрологических, гидрохимических, гидробиологических и других данных) [1]. В настоящее время появилась возможность приступить к следующему этапу, заключающемуся в математическом анализе имеющихся данных и верификации на их основе математической модели параметров качества воды в водохранилище.

Системный подход к решению этой задачи предполагает использование базы данных по основным характеристикам водохранилища, разработку математического и программного обеспечения для моделирования процессов, связанных с прогнозированием качества воды, а также проведение вычислительных экспериментов на базе математической модели водной экосистемы.

При построении упрощенной модели качества воды, учитываются следующие параметры: концентрации сине-зеленых (CA1), диатомовых (CA2) водорослей, бактериопланктона (CB), зоопланктона (CZ), минеральных фосфора (PS), азота (NS), детрита (CD), растворённой органики (POB), растворенного кислорода (O2).

На рисунке 1 показана схема связей выбранных параметров.

Рисунок 1. Блок-схема модели: E – освещенность поверхности водоёма[Вт/м^2]; стрелками обозначены направления потоков вещества и энергии между компонентами экосистемы

Также в построенной математической модели учитываются процессы: рост микроорганизмов, выделение продуктов метаболизма, смертность микроорганизмов, процессы оседания, переходы по трофической цепи, процессы разложения, атмосферная реаэрация, денитрификация, лимитирующие факторы и аэрация воды.

На рисунке 2 показано сопоставление динамики параметров воды (модельные расчеты) и натурных измерений.

Рисунок 2 Сопоставление динамики параметров математической модели с натурными данными.

Из рисунка 2 видно, что динамические процессы полученные из модельных вычислений качественно совпадают с реальной динамикой параметров водной экосистемы полученной в натурных измерениях. Это позволяет предположить, что принятые нами «биологические представления» послужившие основой нашей математической модели, детерминируют в реальной кинетике Красноярского водохранилища.

Действительно: CA1 -теплолюбивы и взаимозависимы от PS и в вегетационный период наблюдается их рост, CA2 -наблюдается рост в вегетационный период за счет тепла, PS и NS заметно убывают за счет зоопланктона, который употребляет CA2.

Таким образом, построенная математическая модель, описывает качество воды с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений, для системы показано: существование и единственность, доказана устойчивость по Ляпунову. Модель описывает происходящие процессы, которые считаются зависимыми только от одной независимой переменной – времени т.е. построена точечная модель.

Литература

В.А. Сапожников, В.Е. Распопов, З.Г. Гольд, И.В. Осипов, В.А. Попельницкий Математическое моделирование экосистемы плёсов Красноярского водохранилища // Объединение субъектов российской Федерации и проблемы природопользования в Приенисейской Сибири: тезисы и материалы докладов региональной научной практической конференции Красноярского Государственного университета.- Красноярск, 2005.

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ КОНВЕКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ В ПОЧВЕ

Микайылов Ф.Д.

Сельскохозяйственный факультет университета «Сельчук», Конья, Турция
farizmikayilov@selcuk.edu.tr

Аннотация: в работе представлены аналитические решения задачи о конвективно-дисперсионном переносе солей в почве конечной и полубесконечной толщины при граничных условиях на поверхности почвы первого и третьего рода под влиянием попеременного (пульсационне) воздействия промывных вод. Приведены численные исследования (эксперименты с помощью ЭВМ) уравнения солепереноса при равновесной сорбции и линейной изотерме в почве, с целью влияние краевых условий на процесс переноса солей в пористых средах.

При моделировании процессов переноса солей в почвогрунтах возникает необходимость анализа решений уравнения конвективной диффузии, поскольку для практических расчетов солевого режима могут быть использованы приближенные решения. Они имеют более простой вид, обладают достаточной точностью и должны быть по возможности в более полном соответствии с физической картиной процессов опреснения. Для этого целесообразно проанализировать влияние на процесс переноса солей в почвогрунтах наиболее часто используемые в практике упрощения, оценить влияние краевых условий, отдельных членов и коэффициентов дифференциальных уравнений, влияние размеров области на описываемый процесс.

Объектом анализа являются решения уравнения солепереноса в водонасыщенных районах с глубоким и близким залеганием уровня грунтовых вод с учетом равновесной сорбции (характеризуемый линейной изотермой обмена), а также неравневесной необратимой сорбции (характеризуемой биологической трансформацией в почвенном растворе, протекающей в соответствии с моделью кинетики первого порядка) в почве, который имеет вид (Веригин и др., 1979; Микайылов, Пачепчкий, 2003):

$$\left(1+\frac{\rho}{\theta}k\right)\frac{\partial C}{\partial t}=D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}-v\frac{\partial C}{\partial x}$$

здесь, $C(x,t)$ - концентрация солей почвенного раствора (моль/м^3); θ - объемная влажность почвы (см^3/см^3); k – эмпричекое константа линейного уравнения изотерма адсорбции Фрейндлиха; ρ - плотность сложения почвы (г/см^3); $D=D_{\text{М}}+\lambda|v|$ – коэффициент

конвективной диффузии, где D_M – коэффициент молекулярной диффузии (м^2/с); λ – коэффициент, учитывающий дисперсию скорости потока в порах разного размера, называемый шагом смешения (м); $v = q^{\downarrow} / \theta$ - средняя скорость потока почвенной влаги (м/с); $q^{\downarrow}$ - нисходящий поток влаги (м/с); t - время (с); x - расстояние (м) ; L - глубина залегания грунтовых вод (м) .

Литература

1. Веригин Н.Н., Васильев С.В., Куранов Н.П., В.С., Шульгин Д.Ф. Методы прогноза солевого режима грунтов и грунтовых вод.- М.: Колос, 1979.- 336 с.
2. Микайылов Ф.Д., Пачепский Я.А. Аналитическое решение уравнения неравновесного солепереноса в почве с бинарной пористостью // Почвоведение.- 2003.- № 4.- С. 441-450.

ДВА ПОДХОДА К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ РАЗЛОЖЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ В ПОЧВЕ: ВЗГЛЯД ИЗВНЕ И ИЗНУТРИ

Мироненко Л. М.

ИФХиБПП РАН, г. Пущино, Россия
lmir2006@yandex.ru

Аннотация: дана сравнительная характеристика двух типов математических моделей разложения растительных остатков (РО) в почве, построенных на основе (1) представлений о микробной сукцессии, осуществляющей разложение РО, и (2) представлений о ферментативной кинетике процесса. Приводятся результаты проверки моделей по данным разложения пшеничной соломы в лабораторной почвенной микроэкосистеме (Knapp et al., 1983).

Используемая здесь 1-я математическая модель микробной сукцессии является частным случаем модели, изложенной в работе (Мироненко, 1999). Схема процесса и система уравнений представлены на рисунках 1a и 1b.

Главными компонентами растительных остатков (РО) являются легкодоступные вещества, целлюлоза и лигнин. Поэтому в сукцессии постулированы 3 микробных сообщества: 1-е перерабатывает легкодоступные вещества, освобождая 2-му сообществу путь к целлюлозе, после разрушения которой получает доступ к лигнину 3-е сообщество.

Когда в устоявшуюся почвенную микроэкосистему с РО одномоментно добавляется какое-либо питательное вещество, то сукцессия соответствующим образом «оживляется», добирая недостающие вещества из отработанного материала (см. рисунок 1c; где стрелками обозначены моменты добавления таких веществ).

Биомасса и находящийся в обороте субстрат выражены в азоте (N). Выделяющийся CO_2 – в углероде (C). Полагается, что количество CO_2, приходящееся на единицу потребляемого микроорганизмами азота, непостоянно, и зависит от состава сообщества.

2-я математическая модель (Knapp et al., 1983).представлена на рисунках 1e (схема процесса) и 1f (система уравнений). Микробное сообщество полагается единым, характеризуемым постоянными параметрами жизнедеятельности. Биомасса подразделяется на пул лабильных веществ клеток, через который идет обмен легкодоступными веществами и, собственно, живую составляющую, ответственную за разрушение РО. Процесс сформулирован в терминах ферментативных реакций. Все величины выражены в C и N.

При сравнении этих двух моделей видно, что в условиях 1-ой наблюдатель находится как бы снаружи явления разложения РО, и, не вдаваясь в подробности химических преобразований компонент, имеет результатом общие закономерности. В условиях 2-ой модели наблюдатель помещает себя внутри системы, соответственно, занят частностями, в совокупности составляющих процесс, и «за деревьями может не увидеть леса».

Варианты	A, 0 ч	A, 240 ч	D, 360 ч	C, 360 ч	B, 0 ч	B, 240 ч	E, 240 ч	F, 120 ч
Суммарный азот биомассы микроорганизмов, мг/г почвы								
Модель Knapp et al. (1983)	0.023	0.057	0.059	0.093	0.023	0.033	0.039	0.093
Данные эксперим.	0.023	0.072	0.047	0.069	0.023	0.037	0.027	0.030
Модель сукцессии	0	0.072	0.057	0.065	0	0.029	0.027	0.030
Значения коэффициента C при dC_2/dt, (мг C/мг N)/ч								
Модель сукцессии	-	2.00	2.00	8.00	-	3.05	2.00	8.00

Рисунок 1. Материалы для сравнения двух моделей разложения РО. Пояснения в тексте

Обе модели проверялись на одних экспериментальных данных (Knapp et al., 1983). Измельченную пшеничную солому (1,5 г) смешивали с песком (148,5 г) и 30 г воды. В варианте A (0-240 ч) при t=0 и в варианте B (0-240 ч) при t=240 ч в систему добавлялся N в количестве 0.06 мг/г почвы ($(NH_4)_2SO_4$). Затем в варианте A при t=240 и в варианте E (240-480 ч) при t=480 добавлялся C в количестве 1,33 мг/г почвы (глюкоза). На рисунке 1d (динамика кумулятивного $C\text{-}CO_2$) эти моменты указаны стрелками.

Как видно по рисункам 1d (динамика кумулятивного C-CO_2, квадратики – экспериментальные данные, линии синие рассчитаны по 1-ой модели, черные – по 2-ой) и 1g (сравнительная таблица значений N-биомассы, определенных экспериментально и рассчитанных по обеим моделям) результаты 1-ой модели заметно ближе к экспериментальным значениям, чем результаты 2-ой модели. Взгляд извне оправдывает себя.

Литература

Мироненко Л.М. Математическая модель экологической сукцессии // Сб. Математика. Компьютер. Образование.– 1999.- Вып. 6.- Ч. 2.- С. 516-525.

Knapp E.B., Elliott L.F. and Campbell G.S. Carbon, nitrogen and microbial biomass Interrelationships during the decomposition of wheat straw: a mechanistic simulation model // Soil Biology and Biochemistry.- 1983.- Vol. 15.- № 4.- P 455-461.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОБНОЙ СУКЦЕССИИ

Мироненко Л. М.

ИФХиБПП РАН, г. Пущино, Россия
lmir2006@yandex.ru

Аннотация: дано описание математической модели микробной сукцессии. Приводятся результаты проверки модели по данным трансформации соединений селена в лабораторной модели пруда (Tokunaga et al.,1996).

Данная математическая модель является частным случаем модели, изложенной в работе (Мироненко, 1999). Система уравнений и соответствующие графики представлены на рисунках 1a и 1b.

Субстрат и биомасса микроорганизмов выражаются здесь в соответствующих количествах некоторого химического элемента, входящего в состав субстрата и вовлекаемого в оборот деятельностью микроорганизмов. Это может быть углерод, азот, сера или селен – любой химический элемент в зависимости от того, в какой реальной среде с помощью данной модели выявляется сукцессия.

Модель формировалась, согласно определению сукцессии по Ф. Клементсу, как процесс сменяющих друг друга во времени сообществ, где каждое предыдущее сообщество формирует условия для развития последующего в одном и том же участке пространства. Соответственно, в настоящей модели полагается, что первоначально однородный в отношении приемлемости для 1-й группы микроорганизмов субстрат по мере его переработки местами становится для них неприемлемым и заселяется в этих местах микроорганизмами 2-й группы, и т. д.

В результате и субстрат, и все сообщество сукцессии микроорганизмов приобретают изменяющийся во времени смешанный, мозаичный вид. На вставке рисунка 1b изображен один из моментов такого смешения.

Особенностью модели является наличие только двух констант скоростей a и b, независимо от количества субстратов x_i и биомасс y_i. В результате сукцессионный ряд оказывается жестко связанным, и при произвольном изменении значения константы при какой-либо переменной разваливается на фрагменты.

В данной работе модель адаптирована под рассматриваемый ниже эксперимент.

Для оценки соответствия модели реальному положению дел были использованы данные по трансформации соединений Se в водной фазе в лабораторной модели пруда (Tokunaga et al.,1996). На рисунке 1c изображена соответствующая экспериментальная колонка. В две из 4-х таких колонок были добавлены и перемешаны с верхним слоем почвы в 30 мм растительные остатки (РО) в количестве 1.03 г на колонку. В каждую колонку были

добавлены соли $NaSeO_4$ и $NaSeO_3$ в количествах, обусловивших начальные водные концентрации Se(VI) и Se(IV) соответственно в 235.2 и 4.8 мг/л.

Существуют микроорганизмы, способные к иммобилизации, минерализации и трансформации Se: $Se^{2+} \leftrightarrow Se^0 \leftrightarrow SeO_3^{2-} \leftrightarrow SeO_4^{2-}$ (Doran, 1982). В связи с этим, сравнивая экспериментальные кривые на рисунках 1d и 1e (с РО) с кривыми на вставках (без РО), можно предположить, что добавление РО вызвало сукцессию трансформирующих Se микроорганизмов. А именно: иммобилизуя Se(VI), 1-е сообщество микроорганизмов концентрировало его в своей биомассе, отторгая по мере преобразования в Se(IV) в процессе своего отмирания; то же самое происходило с Se(IV) в следующем сообществе по мере преобразования в Se(0), после чего мог иметь место и обратный процесс. В результате по динамике Se(VI) и Se(IV) оказывалось возможным отследить сукцессию.

По этой причине основное внимание при расчетах уделялось не собственно субстратам x_i и биомассам y_i i=1, … ,6 а соответствующим их суммам $s_i=x_{i-1}+y_i$, i=1, … ,6 (см. рисунок 1b), поскольку полагалось, что если на данный момент времени Se(VI) или Se(IV) содержится в субстрате x_{i-1} , то он содержится и в биомассе y_i.

Рисунок 1. Математическое моделирование микробной сукцессии: a – система уравнений; b – соответствующие расчетные кривые, на вставке – схема процесса; c – лабораторная модель пруда (Tokunaga et al., 1996); d и e – экспериментальные (черные) линии и точки и расчетные (цветные) линии динамики содержания Se(VI) и Se(IV) в колонках с РО, на вставках – без добавления РО

Как видно из рисунков 1d (где при y_2 константа b=0.00618/ч, а не 0.01/ч) и 1e, расчет по модели хорошо согласуется с экспериментом, и это свидетельствует в пользу гипотезы, что трансформация Se в присутствии РО осуществлялась посредством микробной сукцессии. Однако заметим, что на рисунке 1e расчетные формулы сложны и в них нет системы. Такой

результат может отражать некоторое рассогласование в этих экспериментальных данных (хотя ритм сукцессии по ним просматривается), которое могло быть вызвано возмущением среды при взятии проб из соответствующей колонки, на что указывает заметная разница в рисунках 1d и 1e, несмотря на то, что обе колонки закладывались одинаково (Tokunaga et al.,1996). Сукцессию, по-видимому, как и соответствующую ей в данной работе систему уравнений, легко нарушить.

Литература

Мироненко Л.М. Математическая модель экологической сукцессии // Сб. Математика. Компьютер. Образование. –1999.- Вып. 6.- Ч. 2.- С. 516-525.

Tokunaga T.K., Pickering I. J., Brown G. E. Selenium Transformation in Ponded Sediments // Soil Sci. Soc. Am. J. –1996.- №60.- С. 781-790.

Doran J.W. Microorganisms and the Biological Cycling of Selenium // Advances in Microbial Ecology.-1982.- Vol. 6.- P. 1-33.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОДООБЕСПЕЧЕННОСТИ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ В ТЕЧЕНИЕ ДНЯ СВЕТОВЫХ КРИВЫХ ФОТОСИНТЕЗА

Молчанов А.Г.

Институт лесоведения РАН, с. Успенское, Московская обл. Одинцовский р-он.
root@ilan.msk.ru, a.georgievich@gmail.com

Аннотация: световые кривые фотосинтеза в течение дня изменяются от множества факторов, однако практически во всех моделях этот факт не учитывается. Мы предлагаем для расчетов использовать данные фотосинтеза, полученные за световой день и не на отдельном листе, а на облиственном побеге. Интенсивность фотосинтеза (Ph) облиственного побега за день также изменяется в зависимости от интенсивности солнечной радиации (Q) за день, условий водоснабжения (P) и температуры воздуха (T). Рассчитано уравнение зависимости интенсивности фотосинтеза от этих трёх факторов.

$Ph = -0{,}001*Q^2 + 0.672*Q - 113{,}6*P^2 + 102.07*P - 0.271*T^2 + 15.42*T - 138.6; \quad R^2=0.77$

В большинстве экофизиологических моделей анализируется зависимость фотосинтеза от трех факторов среды: интенсивности ФАР, температуры воздуха и дефицита давления водяных паров в воздухе (Корзухин и др. 2004). Влияние водного и температурного режима почвы учитываются редко. В работе Ю.Л. Цельникер и др. (Цельникер и др. 2007) экофизиология фотосинтеза хвойных изучалась в зависимости от пяти факторов среды: интенсивности ФАР, температуры воздуха и почвы, дефицита давления водяных паров в воздухе и запаса доступной влаги в почве. Однако до сих пор в моделях фотосинтеза не учитывается изменчивость световых кривых в течение дня от окружающих условий и водообеспеченности. Значительно меньше изучена изменчивость световых кривых фотосинтеза в течение дня. С.Н. Чмора (1966) показала, что у кукурузы они являются функцией времени дня. Для древесных растений этот вопрос был изучен нами (Молчанов 1983, 2002).

Интенсивность фотосинтеза в течение дня изменяется в зависимости от интенсивности солнечной радиации, расположения листа на побеге, условий водоснабжения и температуры воздуха. Световые кривые фотосинтеза, полученные в первой половине дня, значительно изменяются в течение дня в зависимости от предрассветного давления воды в листьях (ПДВЛ). Так, для сеянцев дуба, выращенных в лизиметре, депрессия фотосинтеза с увеличением дефицита почвенной влажности наступала в более ранние часы и при более низкой солнечной радиации. Так, при -0.9 МПа депрессия начинала развиваться при 50% от максимальной интенсивности света, при -2.2 МПа - при 40%, а при -3.3 МПа - при 20% света (Молчанов и др.1996).

Зависимость интенсивности фотосинтеза от освещенности у 60-летних деревьев в осоко-снытевой дубраве в течение дня в разных условиях влажности почвы также значительно изменяется (Молчанов, 2002). В малооблачные дни в средних условиях доступности влаги в почве (давление почвенной влаги в горизонте 0-30 см составляло от -1.5 до -2.0 МПа) интенсивность фотосинтеза у световых листьев при световом насыщении в полуденные и послеполуденные часы по сравнению с утренними уменьшилась примерно на 40%, утром - 20, а в полдень - 15, а в послеполуденные часы 12 мкмоль CO_2 $м^{-2}с^{-1}$. Несколько изменился и угол наклона световой кривой. Световое насыщение фотосинтеза наступило при меньшей интенсивности солнечной радиации: утром - при 800, в полдень - при 600, а в послеполуденные часы - при 400 мкмоль $м^{-2}$ $с^{-1}$. С увеличением недостатка влаги в почве до -2.2 ÷ -3.3 МПа. Интенсивность фотосинтеза при световом насыщении в утренние и полуденные часы уменьшилась примерно на 50% по сравнению с интенсивностью фотосинтеза при водном потенциале почвы -1.5 ÷ -2.0 МПа, а в послеполуденные часы она снизилась в три раза.

Световые кривые фотосинтеза, полученные на листьях из световой и теневой частей кроны, также не остаются постоянными в течение дня. В безоблачный день при среднем уровне водного стресса в почве (-1.5 МПа) интенсивность фотосинтеза при световом насыщении в полдень составила 50 % по сравнению с утренними часами. Интенсивность солнечной радиации при световом насыщении фотосинтеза также уменьшается. Световые кривые фотосинтеза световых и теневых листьев различаются. Интенсивность фотосинтеза при световом насыщении теневых листьев составляет около 50 % от интенсивности фотосинтеза световых листьев.

На световые кривые фотосинтеза также оказывает влияние состояние облачности, особенно при значительном дефиците влаги в почве. Так, у 5-летних сеянцев в лизиметре, когда ПДВЛ достигало –2.0 ÷ -2.5 МПа в малооблачный день интенсивность фотосинтеза при световом насыщении была 5 мкмоль CO_2 $м^{-2}с^{-1}$, в день с переменной облачностью интенсивность была выше - 7 мкмоль CO_2 $м^{-2}с^{-1}$.

На побеге листва находится к горизонтальной поверхности под разными углами и, кроме того, взаимозатеняется. Так, по нашим данным у горизонтально расположенных листьев интенсивность фотосинтеза за день равна 240 мг CO_2 $дм^{-2}день^{-1}$, а лист, обращенный на восток, имеет интенсивность фотосинтеза 190 мг CO_2 $дм^{-2}день^{-1}$, а обращенный на запад- 100 мг CO_2 $дм^{-2}день^{-1}$. В разных условиях недостатка влаги в почве листья с разной экспозицией ведут себя по-разному. В оптимальных условиях водоснабжения вертикально расположенные листья имеют большую интенсивность фотосинтеза за день по сравнению с горизонтально расположенными листьями и, наоборот, в более жестких условиях водоснабжения горизонтально ориентированные листья имеют более высокую продуктивность.

Интенсивность фотосинтеза за день также изменяется в зависимости от интенсивности солнечной радиации в течение дня, расположения листа на побеге, условий водоснабжения и температуры воздуха.

Таким образом, мы пришли к выводу, что для учета факторов, влияющих на фотосинтез, лучше использовать интенсивность фотосинтеза за день, полученную на облиственных побегах в зависимости от солнечной радиации за день, среднедневную температуру воздуха и ПДВЛ.

На основе экспериментальных данных фотосинтеза и данных окружающей среды полученных в течение около 50 дней было рассчитано уравнение зависимости интенсивности фотосинтеза за день (Ph) у облиственного побега дуба черешчатого от окружающих факторов:

$Ph = -0.001*Q^2 + 0.672*Q – 113.6*P^2 + 102.07*P – 0.271*T^2 + 15.42*T – 138.6;\ R^2=0.77$

где Q – интегральная солнечная радиация, кал $см^{-2}день^{-1}$, P – предрассветное давление воды в листе, МПа; T – средняя за дневное время температура воздуха, ^oC.

Расчетные и экспериментальные данные интенсивности фотосинтеза за день в различных условиях окружающей среды и водообеспеченности близки [Молчанов, 2002]. Основным ингибитором фотосинтеза является водообеспеченность. Так в дни с высокой солнечной инсоляцией (в среднем около 450 кал/$см^2$ день) и высоким дефицитом влаги, (ПДВЛ= -1.6) интенсивность фотосинтеза за день составила около 50 мг CO_2 $дм^2$/день. В дни с оптимальным водообеспечением (ПДВЛ = -0.2 МПа) и суммой солнечной радиации равной около 300 кал/$см^2$ день интенсивность фотосинтеза была в три раза выше.

Литература

Корзухин, М.Д., Н.Н. Выгодская, И.М.Милюкова, Ф.А.Татаринов, Ю.Л. Цельникер. 2003. Применение комбинированной модели фотосинтеза и устьичной проводимости для анализа ассимиляции ели и лиственницы в лесах России // Физиология Растений 2004.

Молчанов А.Г., Т.Г. Молчанова, В.В. Мамаев. Физиологические процессы у сеянцев дуба черешчатого при недостатке влаги.// Лесоведение.- 1996, №1.- С.54-64.

Молчанов А.Г. Экофизиологическое изучение продуктивности древостоев. М. Наука, 1983. 135с.

Молчанов А.Г. Изменчивость интенсивности фотосинтеза дуба черешчатого от факторов окружающей среды // Лесоведение.- 2002.- № 6.- С. 13-22.

Цельникер Ю.Л., Корзухин М.Д., СуворовaГ.Г., Янькова Л.С.,Копытова Л.Д., Филиппова А.К. Анализ влияния факторов среды на фотосинтез хвойных Прибайкалья // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.- 2007.- Том 21.- С. 265-292.

Чмора С.Н. Световые кривые фотосинтеза в посеве кукурузы // Фотосинтетические системы высокой продуктивности.- М.: Наука, 1966.- С. 142-148.

РЕЖИМЫ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ПОПУЛЯЦИИ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ВОЗРАСТОМ НАСТУПЛЕНИЯ ПОЛОВОЙ ЗРЕЛОСТИ

Неверова Г.П.

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия
galina.nev@gmail.com

Аннотация: исследуется модель динамики численности двухвозрастной популяции с сезонным характером размножения. Плотностно – зависимая регуляция численности осуществляется путем вариации возраста наступления половой зрелости. Проведено аналитическое и численное исследование модели.

Уравнения динамики

У млекопитающих может изменяться возраст наступления половой зрелости в связи с переуплотнением, вызванным ростом численности популяции. В работе исследуется влияние данного эффекта на динамику численности популяций, у которых в отсутствие плотностного лимитирования все особи достигают половозрелости за год. Примером такого вида являются лесные полевки рода *Myodes* (или *Clethrionomys*) rutilus [Дажо, 1975]. Уравнения динамики таких популяций имеют вид:

$$\begin{cases} x_{n+1} = ay_n + s\cdot(1-d(x_n,y_n))\cdot x_n \\ y_{n+1} = sd(x_n,y_n)x_n + vy_n \end{cases} \qquad (1)$$

где x - численность младшего возрастного класса, y - численность старшего возрастного класса, составляющего репродуктивную часть популяции, n – номер периода размножения, a – коэффициент рождаемости, $d(x,y)$ описывает долю особей, у которых наступила половая зрелость, s коэффициент выживаемости молоди, v $(0 \le v \le 1)$ – коэффициент выживаемости взрослых особей. Функция $d(x,y)$ выбрана по аналогии с моделью Рикера [14] в виде

$d(x,y)=e^{-\alpha\cdot x-\beta\cdot y}$, где α - коэффициент, описывающий интенсивность воздействия особей младшего возрастного класса, коэффициент β характеризует интенсивность воздействия особей второго возрастного класса. Функция *d (x,y)* монотонно убывает и стремится к нулю при бесконечном возрастании аргументов. Следует отметить, что уравнения (1) являются модификацией моделей исследованных в работах [Фрисман и др.,1988, Шапиро, 1983, Фрисман и др., 2010, Неверова, 2010]

Результаты исследования

Проведено подробное исследование частных случаев модели (1), когда $\alpha=0$, $\beta=0$, $\alpha=\beta$. Для каждого случая показано, что возможно единственное нетривиальное стационарное состояние системы. Определена область его устойчивости, проанализирован характер потери устойчивости и сценарии переходов динамических режимов. Сделаны выводы о динамике численности популяции в зависимости от значений параметра выживаемости молоди.

Если возраст наступления половой зрелости особей зависит только от численности старшего возрастного класса ($\alpha=0$), то рост выживаемости молоди ведет к сужению области устойчивости неподвижной точки. Потеря устойчивости нетривиального равновесия происходит только при переходе одного из собственных чисел через -1, т.е. по сценарию удвоения периода. Возникающие динамические режимы в области нерегулярной динамики при $s=0.9$ представлены на рисунке 1 а.

Рисунок 1. Карты динамических режимов на плоскости параметров v,a при а) $\alpha=0$, $s=0.9$; b) $\beta=0$, $s=0.4$. Цифрами отмечены периоды наблюдаемых колебаний, НД – нерегулярная динамика

Если возраст наступления половой зрелости особей регулируется только численностью младшего возрастного класса ($\beta=0$), то потеря устойчивости системы происходит, при комплексно сопряженных корнях характеристического уравнения системы (1), при переходе $|\lambda|$ через 1, и сопровождается появлением предельных инвариантных кривых. Причем рост выживаемости молоди при $s\le 0.513$ приводит к сужению области устойчивости нетривиального равновесия. Дальнейший рост значений параметра s наоборот расширяет

область устойчивости. Возникающие динамические режимы в области нерегулярной динамики при $s = 0.4$ представлены на рисунке 1 b. Как видим сложно организованные колебания возникают при высоком репродуктивном потенциале, что свойственно видам, имеющим несколько приплодов в течение одного сезона размножения.

В случае, когда возраст наступления половой зрелости регулируется численностью всей популяции ($\alpha = \beta$), потеря устойчивости происходит при комплексно-сопряженных корнях характеристического многочлена системы (1) и сопровождается образованием инвариантной кривой. При этом численность младшего класса, является доминирующим фактором, поскольку добавление влияния старшего класса по сравнению с предыдущим случаем ($\beta = 0$) не дает новых эффектов.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке ДВО РАН (конкурсные проекты №09-I-ОБН-12, № 09-I-P15-01) и РФФИ (проект № 09-04-00146а).

Литература

Дажо Р. Основы экологии.- М.: Прогресс, 1975.- С. 416.

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.

Неверова Г.П. Применение двухкомпонентной модели к описанию демографической динамики // Информатика и системы управления., 2010, №4(26).- С. 22-35.

ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ СОСНОВОЙ ПЯДЕНИЦЫ: АНАЛИЗ С ПОМОЩЬЮ ДИСКРЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Недорезова Б.Н., Недорезов Л.В.

Учреждение Российской академии наук Центр междисциплинарных исследований по проблемам окружающей среды РАН, Санкт-Петербург, Россия
b.n.nedorezova@gmail.com

Аннотация: анализируются три связанных временных ряда по динамике различных фаз сосновой пяденицы в посадках сосны шотландской в Нидерландах. Показывается, что только дискретная логистическая модель дает удовлетворительное описание для всех трех рядов. Анализируется структура пространства параметров модели, образованная однопараметрическим семейством доверительных областей и бифуркационными поверхностями.

Сосновая пяденица (*Bupalus piniarius* L.) относится к числу наиболее опасных вредителей хвойных насаждений (Исаев и др., 1984). Пяденица относится к эруптивным открытоживущим видам насекомых, динамика численности которых характеризуется фазовым портретом с весьма сложной структурой. Это означает, что добиться достаточно хорошей аппроксимации исходных данных (по изменению численности по годам) с помощью каких-либо простейших математических моделей динамики численности практически невозможно. Если же удается найти такую модель, то это может означать, например, что анализируемые временные ряды достаточно коротки, что и позволяет найти простые модели, дающие удовлетворительную аппроксимацию данных. Это также может означать, что в данном локальном местообитании пяденица не проявляет своих эруптивных свойств и, соответственно, фазовый портрет динамики ее численности не столь сложен, как в тех местообитаниях, где эруптивные свойства проявляются полностью. Возможен и еще один ответ: в течение всего периода наблюдений реализовался достаточно простой режим

изменения численности (например, монотонное изменение численности популяции или относительно небольшие флуктуации около стабильного уровня). Окончательное решение вопросов – недостаточность данных, или специфика местообитания, или что-то иное, – видимо, должно носить экспертный характер.

Для аппроксимации известных данных Г. Кломпа (Klomp, 1966), которые вызывают значительные трудности при идентификации типа динамики численности (Исаев и др., 1984), использовались следующие модели с дискретным временем:

Модель Костицына: $x_{k+1} = ax_k(1+bx_k)^{-1}$,

Дискретная логистическая модель: $x_{k+1} = ax_k(b-x_k)$,

Модель Скеллама: $x_{k+1} = a(1-e^{-bx_k})$,

Модель Морриса – Варли – Градуэлла: $x_{k+1} = ax_k^{1-b}$,

Модель Морана – Риккера: $x_{k+1} = ax_k e^{-bx_k}$,

x_k –плотность популяции в k-ый момент времени (год), a, b - неотрицательные параметры. Поскольку все три временных ряда (по изменению плотностей отложенных яиц, гусениц на квадратный метр, а также плотности куколок) относятся к одному виду в одном и том же местообитании (парк De Hoge Veluwe, Нидерланды), то модель дает удовлетворительную аппроксимацию данных тогда и только тогда, когда она дает удовлетворительную аппроксимацию для всех трех временных рядов одновременно.

Для каждой модели оценивались значения параметров в соответствии с критерием:

$$Q(x_0,\vec{\alpha}) = \sum_{t=0}^{N}(\tilde{x}_t - F^{(t)}(x_0,\vec{\alpha}))^2 \to \min_{\vec{\alpha},x_0}, \qquad (1)$$

где $F^{(t)}(\cdot)$ – итерации функции F, стоящей в правой части моделей, $F^{(0)}(x_0,\vec{\alpha}) = x_0$, $F^{(1)}(x_0,\vec{\alpha}) = x_1$ и так далее; $\vec{\alpha}$ – вектор неизвестных параметров модели. В этом выражении минимизируется сумма квадратов отклонений значений экспериментальной траектории и соответствующих значений траектории модели (глобальное приближение). Отклонения теоретических (модельных) значений от реальных данных тестировались на нормальность со средним равным нулю (критерии Колмогорова – Смирнова и Шапиро - Вилка), а также на наличие/отсутствие сериальной корреляции (критерий Дарбина - Ватсона).

Анализ последовательностей остатков показал, что только дискретная логистическая модель дает удовлетворительное описание всем трем временным рядам. Во всех трех случаях значение функционала (1) для данной модели существенно меньше, чем для остальных моделей. По критерию Шапиро – Вилка в одном из случаев вероятность того, что совокупность отклонений имеет нормальное распределение, близка к единице; в остальных случаях гипотеза о нормальности отклонений не может быть отклонена даже с 10% уровнем. И во всех случаях у отклонений для данной модели нет сериальной корреляции. На рисунке 1 представлена 99% доверительная область для данной модели при аппроксимации данных по динамике плотности гусениц. Из этого рисунка видно, что вероятность того, что наблюдаемая траектория соответствует режиму вырождения популяции меньше 0.01. Также невелика и вероятность того, что в данном случае наблюдается сложный динамический режим. Наибольшую вероятность имеет режим асимптотической стабилизации численности на ненулевом уровне: доверительная область почти целиком располагается между бифуркационными кривыми $ab = 1$ и $ab = 3$.

Рисунок 1. 99% доверительная область (закрашена) для дискретной логистической модели и временного ряда по динамике плотности гусениц. Пересечение прямых L_1 и L_2 показывает точку найденного глобального минимума функционала (1)

Литература

Исаев А.С., Хлебопрос Р.Г., Недорезов Л.В., Киселев В.В., Кондаков Ю.П. Динамика численности лесных насекомых.- Новосибирск: Наука, 1984.- 224 с.

Klomp H. The dynamics of a field population of the pine looper, Bupalus piniarius L. (Lep., Geom.) // Advances in Ecological Research.- 1966.- V. 3.- P. 207-305.

ПРАВ ЛИ БЫЛ Г.Ф. ГАУЗЕ?

Недорезов Л.В.

Учреждение Российской академии наук Центр междисциплинарных исследований по проблемам окружающей среды РАН, Санкт-Петербург, Россия
l.v.nedorezov@gmail.com

Аннотация: для аппроксимации временных рядов для Paramecia aurelia и Paramecia caudatum (Gause, 1934) использовались модели Ферхюльста, Гомпертца, Розенцвейга и Свирежева. Для каждой модели оценивались параметры. Отклонения между теоретическими и экспериментальными данными тестировались на нормальность и наличие/отсутствие сериальной корреляции. Показано, что в большинстве случаев модель Гомпертца дает лучшую аппроксимацию данных.

Видимо, не существует в природе учебника по экологическому моделированию, в котором не были бы представлены результаты известных опытов Г.Ф. Гаузе (Gause, 1934) по культивированию популяций простейших и анализу динамики их численности (в том числе, результаты опытов по культивированию Paramecia aurelia и Paramecia caudatum). Во многих случаях эти результаты используются и как хорошие иллюстрации соответствия экспериментальных траекторий и траекторий модели Ферхюльста, и как обоснование правомерности использование данной модели для аппроксимации реальных данных.

Однако в монографии Г.Ф. Гаузе не проводился анализ соответствия теоретических результатов с экспериментальными данными. Сопоставление тех и других данных носило исключительно визуальный характер. Кроме этого, не проводилось сравнения с

результатами аппроксимации данных с помощью других, известных к тому времени моделей (в частности, с моделью Гомпертца). В работе фактически постулируется, что модель Ферхюльста является единственно верной и пригодной для аппроксимации данных. Насколько подобная точка зрения справедлива можно понять, лишь проведя сравнение результатов аппроксимации для группы моделей одного класса, а также проанализировав поведение отклонений экспериментальных данных от теоретических.

Кроме этого, в монографии Г.Ф. Гаузе приводятся данные для оценок параметров, но не указывается, как именно эти оценки были получены. В результате этого возникает определенное недопонимание результатов, представленных в работе. Действительно, если логистическая модель – единственно верная, то тогда параметр K является максимально предельной численностью, которая может быть достигнута популяцией. Но на рисунках из монографии видно, что численности рассматриваемых популяций превышают этот порог. Это означает, что, либо модель неверна (численности превышают порог, который *принципиально* превысить не могут; но, с другой стороны, правильность модели постулируется изначально), либо выбран неправильный метод аппроксимации данных (но тогда неверны все результаты, в которых фигурируют результаты аппроксимации).

Для аппроксимации данных были выбраны следующие модели:

$$\frac{dx}{dt} = \alpha x\left(1 - \frac{x}{K}\right),\ \frac{dx}{dt} = \alpha x \ln\frac{K}{x},\ \frac{dx}{dt} = \alpha x^2\left(1 - \frac{x}{K}\right),\ \frac{dx}{dt} = \alpha x\left(1 - \left(\frac{x}{K}\right)^{\gamma}\right),$$

где $x(t)$ - численность популяции в момент времени t, α, K, γ - параметры, $K, \gamma > 0$. Оценки параметров моделей находились из условия

$$Q(\vec{\alpha}) = \sum_{k=1}^{N} (x_k - x(k, x_0, \vec{\alpha}))^2 \to \min_{\vec{\alpha}},$$

где x_k, $k = 0,1,...,N$, - исходная экспериментальная выборка (рис. 24 из монографии Г.Ф. Гаузе), $x = x(t, x_0, \vec{\alpha})$ – решение соответствующего уравнения, $\vec{\alpha}$ – вектор параметров. Рассматривались два варианта: когда выполняется дополнительное ограничение

$$K \geq \max_k x_k,$$

и когда это условие не выполняется. В каждом из четырех рассматриваемых вариантов (два временных ряда и два случая для каждого ряда) отклонения теоретических (модельных) значений от экспериментальных данных тестировались на нормальность со средним арифметическим равным нулю (критерии Колмогорова – Смирнова и Шапиро - Вилка), а также на наличие/отсутствие сериальной корреляции (критерий Дарбина - Ватсона).

Статистический анализ обоих временных рядов по динамике численностей P. aurelia и P. caudatum показывает, что в двух случаях модель Гомпертца позволяет получить результаты аппроксимации данных, которые не хуже результатов, получаемых с помощью модели Ферхюльста. В других двух случаях модель Гомпертца позволяет получить результаты, которые существенно лучше результатов, получаемых с помощью модели Ферхюльста. Более того, в двух из четырех рассмотренных случаев модель Ферхюльста оказалась вообще непригодной для аппроксимации данных (даже с 1% уровнем значимости гипотезу о нормальности совокупности отклонений пришлось отклонить по критерию Шапиро – Вилка; см. рисунок). Полученные результаты позволяют высказать утверждение о том, что для данных видов парамеций действие саморегуляторных механизмов гораздо слабее, чем это постулируется в модели Ферхюльста. Это подтверждается и результатами, полученными для модели Гомпертца, в рамках которой действие саморегуляторных механизмов описывается выражением $x \ln x$ (влияние саморегуляторных механизмов на скорость роста численности пропорционально этому выражению), и результатами, полученными для модели Розенцвейга.

Рисунок 1. Результаты аппроксимации данных по P. aurelia без дополнительного условия на значения параметров. Модель Ферхюльста дает наилучшее приближение среди всех моделей, но при этом оказывается непригодной (по критерию Шапиро – Вилка).

Во всех четырех случаях модель Свирежева показывала наихудшую аппроксимацию данных. При этом, следует отметить, в отдельных случаях (в том числе, представленном на рисунке) совокупность отклонений имела наилучшие показатели среди всех моделей.

Литература

Gause G.F. The Struggle for Existence.- Baltimore: Williams and Wilkins, 1934.- 163 p.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ СОПРЯЖЕННО-ИСКЛЮЧАЕМЫХ ФРАГМЕНТОВ ФЕНОТИПА ПРИ ПАСПОРТИЗАЦИИ ВНУТРИПОПУЛЯЦИОННОГО РАЗНООБРАЗИЯ

Неуймин С.И.

Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Россия
sergneu@mail.ru

Аннотация: предложена модель сопряженно-исключаемых фрагментов фенотипа. Рассмотрена возможность перевода вариантов сочетаний количественных признаков в виде частот распределения значений радикального показателя (Рп ССО). На основе Рп ССО проведена паспортизация внутрипопуляционного разнообразия житняка пустынного и гребневидного.

Введение

В настоящее время все острее встают вопросы паспортизации видового и внутривидового многообразия растительных форм. Рассматриваются различные подходы к изучению изменчивости не только отдельных признаков, но и их варианты в сочетаниях. Выделяется особая категория последовательностей элементов количественных признаков, суммарное выражение которых отнесено нами к финальным признакам. Эти варианты как составные части финальных признаков, имеют определенное местонахождение на единой основной траектории развития – которая обуславливает формирование нормального для популяции или линии фрагментов «фенотипа»: ($\{a_1, a_2,\ldots, a_S\}$, $\{b_1, b_2,\ldots, b_S\}$,…, $\{n_1, n_2,\ldots, n_S\}$), совокупность которых собственно и будем именовать экоморфа. Используя понятие «экоморфа» мы пытаемся подчеркнуть реализацию в процессе развития определенных отличных от нормы *устойчивых состояний фенотипа* соответствующих конкретным

организмам *A, B, C, D*…. Рассматриваются так же *мелкие приспособительные варианты* в пределах популяции, которые по нашей номенклатуре определены как финальные признаки *a, b, c, d*… (Неуймин, 2008; Неуймин, Темирбекова, Филатенко, 2009).

Объекты и методы

В качестве модельных объектов исследований были рассмотрены 4 типичных экоморфы житняка пустынного *A. desertorum* (Fisch. ex Link) Schult. и житняка гребеневидного *Agropyron cristatum subsp. pectinatum* (Bieb.) Tzvel. собранных на территории Южного Урала в естественных условиях произрастания.

Для формального выражения конструктивных элементов количественного признака нами разработан математический алгоритм: «Радикальный показатель системы сжатых отображений» (Рп ССО) (Неуймин, 1991; Неуймин, Монтиле, Шавнин, 2006). Анализ частот Рп ССО поведен по методу Л.А. Животовского, 1982.

Результаты

В таблице 1 представлены результаты анализа сопряженной изменчивости частот Рп ССО с учетом последовательного исключения фрагментов «фенотипа» ($\{a_1, a_2,\ldots, a_S\}$, $\{b_1, b_2,\ldots, b_S\},\ldots, \{n_1, n_2,\ldots, n_S\}$). В целом, по средним значения Рп ССО, представленные образцы на уровне вида существенно не различаются. Так у вида *A. desertorum* (Fisch. ex Link) Schult. значения Рп ССО находится в пределах от 0,492102 до 0,792583, а у вида *Agropyron cristatum subsp. pectinatum* (Bieb.) Tzvel. от 0,520133 до 0,522258 соответственно. Тем не менее, при внутривидовой дифференциации отмечаются существенные различия по среднему числу вариант частот «μ» и доли редких вариант частот «h». Отмечен так же существенный полиморфизм у представленных экоморф в зависимости от варианта исключаемых фрагментов «фенотипа». Так экоморфы DA_137 и DA_248 по значениям «μ» находятся в пределах от 26,73 до 33,60 и 30,36 до 38,86, соответственно экоморфы pA_286 и pA_257 по тем же значениям от 18,75 до 19,94 и от 14,79 до 16,35.

Выводы

Таблица 1. Показатели сопряженной изменчивости вариант частот Рп ССО при последовательном исключении фрагментов фенотипа

Экоморфа	Название вида	Варианты исключения фрагментов фенотипа	Среднее значение Рп ССО $\bar{x}$	Среднее число вариант частот Рп ССО, $\mu \pm S\mu$	Доля редких вариант частот Рп ССО, $h \pm Sh$
DA_137	*A. desertorum* (Fisch. ex Link) Schult.	$\{a_1, a_2,\ldots, a_S\}$	0,492102	33,60 ± 1,110	0,116 ± 0,029
		$\{b_1, b_2,\ldots, b_S\}$	0,492103	27,95 ± 0,971	0,126 ± 0,030
		$\{c_1, c_2,\ldots, c_S\}$	0,492103	26,73 ± 0,976	0,138 ± 0,031
		$\{d_1, d_2,\ldots, d_S\}$	0,492103	27,57 ± 1,008	0,138 ± 0,031
DA_248	*A.desertorum* (Fisch. ex Link) Schult.	$\{a_1, a_2,\ldots, a_S\}$	0,492075	31,61 ± 1,075	0,122 ± 0,030
		$\{b_1, b_2,\ldots, b_S\}$	0,492572	30,36 ± 1,083	0,132 ± 0,031
		$\{c_1, c_2,\ldots, c_S\}$	0,492583	32,80 ± 1,071	0,113 ± 0,029
		$\{d_1, d_2,\ldots, d_S\}$	0,492583	38,86 ± 1,290	0,117 ± 0,029
pA_286	*Agropyron cristatum subsp. pectinatum* (Bieb.) Tzvel.	$\{a_1, a_2,\ldots, a_S\}$	0,520134	18,75 ± 0,593	0,107 ± 0,028
		$\{b_1, b_2,\ldots, b_S\}$	0,520133	19,94 ± 0,585	0,094 ± 0,027
		$\{c_1, c_2,\ldots, c_S\}$	0,520133	19,08 ± 0,552	0,091 ± 0,026
		$\{d_1, d_2,\ldots, d_S\}$	0,520133	19,72 ± 0,612	0,104 ± 0,028
pA_257	*Agropyron cristatum subsp. pectinatum* (Bieb.) Tzvel.	$\{a_1, a_2,\ldots, a_S\}$	0,522258	15,61 ± 0,426	0,082 ± 0,025
		$\{b_1, b_2,\ldots, b_S\}$	0,522258	15,01 ± 0,352	0,062 ± 0,022
		$\{c_1, c_2,\ldots, c_S\}$	0,522258	14,79 ± 0,386	0,076 ± 0,024
		$\{d_1, d_2,\ldots, d_S\}$	0,522258	16.35 ± 0.474	0.092 ± 0.026

Таким образом, в зависимости от видовой принадлежности и вариантов исключения фрагментов фенотипа наблюдается специфичный вклад в сопряженную изменчивость вариант частот. На межвидовом уровне исключение фрагментов фенотипа существенно не влияют на среднее значение Рп ССО. Наиболее информативным и видоспецифичным при паспортизации внутрипопуляционного разнообразия, является анализ частот Рп ССО с использованием показателя популяционной изменчивости Л.А. Животовского (1982 С.38).

Работа выполнена по программе Президиума РАН «Биологическое разнообразие».

Литература

Неуймин С.И. Система изменчивости пшеницы эфиопской (*Triticum aethiopicum* Jakubz.): Автореф...канд.биол. наук.- Ленинград, 1991.- С.19.

Неуймин С.И., Монтиле А.И., Шавнин С.А. Модель сжатия совокупности и эпигенетических признаков растений в виде интегрального показателя // Математическая биология и биоинформатика: I Международная конференция, г. Пущино, 9-15 октября 2006 г.: Доклады / Под ред. В.Д. Лахно.– М.: МАКС Пресс, 2006.– С. 162-163.

Неуймин С.И. Использование «Закона гомологических рядов в наследственной изменчивости» Н.И. Вавилова для паспортизации видового разнообразия *Agropyron cristatum* (L.) Beauv. // Культурные растения для устойчивого сельского хозяйства в 21-ом веке. Научные труды. Посв.120-летию Н.И. Вавилова. Том 3.- М.- Россельхозакадемия.- 2008.- С. 87-90.

Неуймин С.И., Темирбекова С.К., Филатенко А.А. Периодическая система конструктивных элементов генеративной сферы житняка гребенчатого *Agropyron cristatum* (L.) Beauv. // Вестник РАСХН, Москва, 2009.- № 6.- С. 38-41.

Животовский Л.А. Показатели популяционной изменчивости по полиморфным признакам // Фенетика популяций.- М.:Наука, 1982.- С. 38-45

СУКЦЕССИИ В ЛЕСНЫХ ЦЕНОЗАХ: МОДЕЛЬ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВТОРОГО РОДА

Овчинникова Т.М., Суховольский В.Г.

Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

ovchinnikova_tm@mail.ru

Аннотация: рассмотрена модель, в соответствии с которой сукцессии рассматривались как экологические фазовые переходы второго рода.

Смена пород и замена одновозрастного лиственного насаждения (береза, осина) в возрасте 50 80 лет на условно одновозрастное хвойное насаждение является практически обязательным этапом сукцессии в таежных ценозах. Стандартной методикой, используемой при моделировании сукцессионных переходов в лесных ценозах, является построение кинетических уравнений, характеризующих временную динамику основных компонентов таких экосистем: лиственных деревьев верхнего яруса, лиственных и хвойных деревьев второго яруса. Ясно, что деревья нижнего яруса могут конкурировать друг с другом, но не способны вытеснить деревья верхнего яруса, плотность и суммарная фитомасса которых уменьшается в процессе естественного отпада.

Систему уравнений, описывающую эти процессы, можно было бы записать в следующем общем виде:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{f}(\mathbf{x})\mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{y}} = [\mathbf{g}(\mathbf{y}) - \mathbf{v}(\mathbf{x},\mathbf{y}) - \mathbf{w}(\mathbf{y},\mathbf{z})]\mathbf{y} \\ \dot{\mathbf{z}} = [\mathbf{g}_1(\mathbf{z}) - \mathbf{v}_1(\mathbf{x},\mathbf{z}) - \mathbf{w}_1(\mathbf{z},\mathbf{y})]\mathbf{z} \end{cases} \qquad (1)$$

где x – фитомасса верхнего яруса, y, z – суммарная фитомасса соответственно деревьев лиственных и хвойных пород второго яруса; $f(x)$ – интенсивность естественного отпада лиственных деревьев верхнего яруса; $g(y)$ и $g_1(z)$ – функции роста соответственно лиственных и хвойных деревьев второго яруса, $v(x,y)$, $v_1(x,z)$, $w(y,z)$, $w_1(z,y)$ – функции, характеризующие взаимодействия деревьев второго яруса с деревьями верхнего яруса и друг с другом.

Как видно, система (1) содержит значительное число неизвестных функций и параметров, что крайне затрудняет ее решение. Даже в предположении линейности взаимодействий деревьев разных пород и ярусов необходимо оценить значения не менее пяти параметров (1). Кроме того, процессы смены пород могут зависеть от климатических условий территории, что потребует введения дополнительных функций для описания этих процессов.

В качестве альтернативы кинетическому подходу ранее была предложена модель, в соответствии с которой сукцессии рассматривались как экологические фазовые переходы второго рода (Исаев и др, 2009). В этой модели в качестве макроскопического параметра, характеризующего состояние второго яруса насаждения, использовался параметр порядка q – доля деревьев (или фитомассы) лиственных пород во втором ярусе. Фитомасса X лиственного насаждения первого яруса выступала в качестве переменной состояния системы (аналога температуры в физических системах). Для описания фазового перехода использовался аналог уравнения Ландау для температурных фазовых переходов второго рода в физических системах (Ландау, 1937; Ландау, Лифшиц, 1964):

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{G}_0 + \boldsymbol{a}(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_r)\boldsymbol{q}^2 + \boldsymbol{b}\boldsymbol{q}^4 \qquad (2)$$

Функция G в (2) трактовалась как функция экологического риска и постулировалось, что устойчивые состояния системы характеризуются условием минимума этой функции (Суховольский и др, 2005; Суховольский и др, 2009):

$$\boldsymbol{G} \Rightarrow \min \qquad (3)$$

Таким образом, модель сукцессионного фазового перехода второго рода представляет собой всего одно уравнение с тремя параметрами *a*, *b*, X_r. Из условия (3) можно найти стационарные значения параметра порядка, решая уравнение $\frac{\partial \boldsymbol{G}}{\partial \boldsymbol{q}} = 0$:

$$\boldsymbol{q}^2 = \begin{cases} 0, & \boldsymbol{X} \geq \boldsymbol{X}_r \\ \frac{\boldsymbol{a}}{2\boldsymbol{b}}(\boldsymbol{X}_r - \boldsymbol{X}), & \boldsymbol{X} < \boldsymbol{X}_r \end{cases} \qquad (4)$$

При значениях фитомассы верхнего яруса больше критической величины X_r, параметр порядка равен нулю, то есть в таких условиях второй ярус составляют исключительно хвойные деревья. В случае, когда фитомасса верхнего яруса меньше критической, второй ярус формируется как смешанный. При этом, чем меньше фитомасса первого яруса, тем больше доля деревьев лиственных пород во втором ярусе.

Рис.1. Решения уравнения (4), рассчитанные по данным Л.Кайрюкштиса (1969). 1 – второй ярус смешанного или число лиственного состава; 2 – второй ярус из деревьев хвойных пород.

Графически решение уравнения (4) можно представить в виде своеобразной «хоккейной клюшки». На рис.1 представленные результаты расчетов по уравнению (4) с использованием данных из работы Л. Кайрюкштиса (1969) по соотношению деревьев хвойных и лиственных пород в елово-лиственных насаждениях.

Как видно из рис.1, во втором ярусе формируется чисто хвойное насаждение, если фитомасса верхнего яруса превышает критическое значение 350 м^3 га$^{-1}$.

В (4) можно ввести дополнительное экологическое поле $\boldsymbol{h} = \boldsymbol{kL}$, пропорциональное освещенности $\boldsymbol{L}$ деревьев второго яруса. Тогда вместо (2) получим:

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{G}_0 + \boldsymbol{a}(\boldsymbol{X} - \boldsymbol{X}_r)\boldsymbol{q}^2 + \boldsymbol{bq}^4 - \boldsymbol{chq} \qquad (5)$$

В этом случае при больших значениях $\boldsymbol{h}$ решение $\boldsymbol{q} = \boldsymbol{0}$ уравнения $\frac{\partial \boldsymbol{G}}{\partial \boldsymbol{q}} = 0$ не реализуется, фазовый переход «лиственные – хвойные» не происходит, и второй ярус формируется как смешанное насаждение с большой долей деревьев лиственных пород. Тогда после выпадения деревьев верхнего яруса формируется новое лиственное насаждение.

Работа поддержана РФФИ (грант 10-04-00256).

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОГО И ФАКТИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЦЕНТРАЛЬНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В ГОЛОЦЕНЕ

Ольчев А.В. [1], Новенко Е.Ю.[2]

[1] *Учреждение Российской Академии Наук Институт Проблем Экологии и Эволюции имени А. Н. Северцова РАН, Москва, Россия*
aoltche@gmail.com

[2] *Учреждение Российской Академии Наук Институт Географии РАН, Москва, Россия*
lenanov@mail.ru

Аннотация: уравнения для расчета годовых сумм фактического и потенциального испарения, а также транспирации бореальных лесов по значениям среднегодовой температуры и суммарного количества осадков были получены по результатам численных экспериментов с моделью H_2O и CO_2 обмена Mixfor-SVAT. Полученные уравнения были использованы для расчета испарения еловых лесов Центрально-Европейской территории России в Голоцене.

Введение

Основной целью данного исследования являлась разработка упрощенных выражений для расчета годовых значений фактического (E) и потенциального (PE) испарения, а также транспирации (TR) еловых лесов Европейской территории России в голоцене по палеоклиматическим данным. Параметризации были получены на основе анализа значений TR, E и PE, рассчитанных для модельных древостоев с разным участием ели (от 0 до 100%) при разных температурных условиях и режиме увлажнения с помощью Mixfor-SVAT модели. PE рассчитывалось с помощью уравнения Пристли-Тейлора.

Модель Mixfor-SVAT

Одномерная процесс-ориентированная математическая модель MixFor-SVAT была разработана для расчета переноса радиации, потоков турбулентного тепла, H_2O и CO_2 в разновозрастных смешанных древостоях (Ольчев и др., 2008, Olchev et al. 2008, 2009). В качестве основной концепции модели использовано сопряженное описание физических и биологических процессов, протекающих на различных иерархических уровнях лесной экосистемы: от уровня отдельного листа до уровня отдельного дерева и всей экосистемы в целом. Основным преимуществом модели является ее способность не только определить интегральные потоки H_2O и CO_2 на уровне экосистемы, но также и адекватно оценить вклад деревьев разных пород в суммарные потоки с учетом их индивидуальной реакции на изменения условий внешней среды, а также различий в структуре и биофизических свойствах.

Результаты

Результаты проведенных модельных расчетов показали высокую чувствительность E и TR к изменению температуры и видового состава древостоя (рисунок 1). Для параметризации значений E, PE и TR была выбрана мультипликативная нелинейная функция, предполагающая зависимость суммарного испарения от температуры, осадков и видового состава древостоя. В общем виде для E уравнение может быть записано как:

$$E = a0 \cdot \left(a1 \cdot 6/T + a2\right) \cdot \left(a3 \cdot N + a4\right) \cdot \left(a5 \cdot 700/p + a6\right) \quad (1)$$

где T - среднегодовая температура, p - годовое количество осадков в мм год$^{-1}$, N - доля ели в древостое (0 - 1), a0-a6 - эмпирические коэффициенты. Значения коэффициентов a0-a6 в уравнении 1 были получены методом Левенберга-Марквардта на основе анализа результатов расчетов E, PE и TR по модели MixFor-SVAT (таблица 1).

Результаты расчетов E, PE и TR для различных периодов голоцена показали в частности, что для оптимума голоцена (5.5-6 тыс. ^{14}C лет назад) E составляло в среднем 460-490 мм год$^{-1}$, а TR - 300-310 мм год$^{-1}$. В период раннесуббореального похолодания (4.5-4.8 тыс. ^{14}C лет назад) E не превышала 310-330 мм год$^{-1}$, а TR снижалась до 210-220 мм год$^{-1}$.

Рисунок 1. Смоделированная изменчивость E, TR и PE как функции среднегодовой температуры воздуха и доли ели в древостое

Таблица 2. Значения эмпирических коэффициентов для расчета испарения по формуле 1

Параметр	a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6
Фактическое испарение	360	0.8957	0.6152	-0.0641	0.7644	0.0479	1.0933
Транспирация	240	0.7362	0.7456	-0.0637	0.7550	-0.0053	1.1074
Потенциальное испарение	520	0.4049	0.9530	0.0639	0.7497	0.0189	1.0429

Литература

Ольчев А.В., Курбатова Ю.А., Варлагин А.В., Выгодская Н.Н. Модельный подход для описания переноса CO_2 между лесными экосистемами и атмосферой // Лесоведение.- 2008.- № 3.- С. 3-13.

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. // J. Ecological Modelling, 2008.– 212.- P. 122–130.

Olchev A, Novenko E, Desherevskaya O, Krasnorutskaya K, Kurbatova J Effects of climatic changes on carbon dioxide and water vapor fluxes in boreal forest ecosystems of European part of Russia // Environ. Res. Lett.-. 4.- 2009.- 045007 (8pp)

МОДЕЛЬ ГЕНЕТИКО-ПОПУЛЯЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ПАРТЕНОГЕНЕТИЧЕСКОГО ВИДА КАВКАЗСКОЙ СКАЛЬНОЙ ЯЩЕРИЦЫ *DAREVSKIA UNISEXUALIS* НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА

Омельченко А.В. [1,2], Вергун А.А. [2,3], Петросян В.Г. [1], Корчагин В.И. [3], Токарская О.Н. [3]

[1]*УРАН Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*
omi@bk.ru

[2]*ГОУ ВПО Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия*
vermand@mail.ru

[3]*УРАН Институт биологии гена РАН, Москва, Россия*
tokarskaya@list.ru

Аннотация: в настоящей работе представлена математическая модель генетико-популяционной структуры партеновидов, созданная на основе данных о межпопуляционном полиморфизме микросателлитных маркеров генома партеногенетической ящерицы Darevskia unisexualis с использованием математического аппарата многомерного анализа, позволяющая количественно оценить генетический вклад популяций в генофонд вида.

Введение

Облигатно-партеногенетические рептилии и, в частности, партеногенетические виды Кавказских скальных ящериц рода Darevskia, система размножения которых исключает какое-либо взаимодействие с мужским геномом, популяции которых представлены исключительно самками, а размножение осуществляется по принципу естественного биологического клонирования, являются уникальными природными объектами для анализа геномов, мониторинга генетической изменчивости и связанной с ней динамики генофондов (Рысков, 1999). Однополые виды животных, и в том числе, виды рода Darevskia, значимо отличаются от двуполых отсутствием генетической рекомбинации при размножении, половым составом популяций, репродуктивным поведением и т.п. (Darevsky et al. 1985), что делает не возможным применение моделей для двуполых видов к видам партеногенетическим. Поэтому, изучение генетических процессов на однополых видах и разработка на основе этих данных математических моделей популяционных структур партеновидов может внести значительный вклад в понимание процессов дифференцировки популяций однополых видов, привести к разработке инструментов количественной оценки генетического вклада каждой популяции в генофонд вида и оценки эффективной численности партеновидов.

Объекты и методы

В качестве входных данных использовалась матрица частот встречаемости 6 аллельных вариантов полиморфного локуса Du214 генома *D.unisexualis.* Общее число особей составляло 65 (из пяти изолированных популяций). Программная реализация модели предполагает использование генератора случайных чисел, при помощи которого были сформированы 5000 выборок из всех популяций партеновида по 10 особей в каждой. Гетерозиготность определялась по формуле Нея (Хедрик, 2003).

Результаты и обсуждение

На основе применения математического аппарата теории многомерного анализа с использованием Евклидового расстояния, нами был получен ряд формул, выражающих оценку генетического вклада каждой популяции в генофонд вида:

$$d_i = \sqrt{(m_{i1})^2 + (m_{i2})^2 + \ldots + (m_{ik})^2}$$

$$d_s = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{l} m_{i1}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{l} m_{i2}\right)^2 + \ldots + \left(\sum_{i=1}^{l} m_{ik}\right)^2}$$

$s_i = \dfrac{d_i}{d_s}$, где: m_{ij} - абсолютная частота аллеля j (j = 1, 2, 3…k) в популяции i (i = 1, 2, 3,…,l); k – число аллелей в геномах особей исследуемых популяций; l – число популяций, составляющих исследуемый партеновид; - множитель (длина k-мерного вектора), характеризующий распространенность k аллелей в популяции i; - множитель (длина k-мерного вектора), характеризующий распространенность k аллелей по виду в целом; - доля всех аллелей популяции j в ДНК всего вида (генетический вклад популяции j в генофонд вида).

Данная математическая модель предполагает, что генетический вклад особей популяций в генофонд вида определяется двумя факторами: генетическим разнообразием особей популяций составляющих вид и численностью этих популяций. Результаты применения предложенной математической модели представлены на рисунке 1. А оценка генетического разнообразия показана на рисунке 2.

Рисунок 1. Генетический вклад популяций в генофонд вида *D.unisexualis*

На основании анализа результатов можно сказать, что наибольший вклад в генофонд вносят популяции наименее изменчивые и наиболее генетически стабильные – популяции Лчап, Загалу и Норатус (см. рисунок 2). Дисперсия полученных значений генетического вклада и гетерозиготности равны нулю, т.к. все особи данных популяций содержат только два аллеля исследуемого локуса. В свою очередь, популяции Кутчак и Такярлу, населяющие высокогорные районы демонстрируют высокий уровень генетического разнообразия и низкий уровень генетического вклада (19,24(±0,4)% и 20,13(±0,2)% соответственно), вероятнее всего обусловленный небольшой численностью особей этих популяций.

Рисунок 2. Гетерозиготность популяций *D.unisexualis*

Исследование поддержано грантом Президента РФ МК-2697.2011.4.

Литература

Рысков А.П. Мультилокусный ДНК-фингерпринтинг в генетико-популяционных исследованиях биоразнообразия // Молекуляр. биология, 1999. Т. 33. № 6. С. 997-1011.
Хедрик Ф. Генетика популяций. М.: Техносфера, 2003.- 592с.
Darevsky I.S., Kupriyanova L.A., Uzzel T. Parthenogenesis in Reptiels // Boilogy of Reptilia. 1985.V.15. P. 412-526.
Schцn I., Martens K., van Dijk P. Lost Sex: The Evolutionary Biology of Parthenogenesis.- Springer, 2009.– P.615.

РАЗЛИЧНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРИЗНАКОВ ИНТРОДУЦИРУЕМЫХ СОРТОВ КАРТОФЕЛЯ

Оплеухин А.А.[1], Стрельцова Т.А.[2] , Федюнина М.В.[3]

[1] *Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия*
plymbym@rambler.ru

[2] *Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия*
tomagorny@yandex.ru

[3] *Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия*
marmed08@mail.ru

Аннотация: пример комплексного использования нескольких методов статистической обработки для анализа данных экологического сортоиспытания картофеля в течении трех лет в зонах различной высотной поясности. В процессе анализа использованы методы позволяющие оценить взаимодействие факторов и всех признаков, с последующей оценкой вариации отдельных признаков в зависимости от факторов среды.

Введение

Применение статистической обработки экспериментальных данных при анализе экспериментального материала позволяет представить скрытые закономерности и связи количественно. Сделана попытка комплексного использования нескольких методов статистической обработки для анализа данных экологического сортоиспытания картофеля.

Объекты и методы

В 1999-2001 годах было проведено экологическое сортоиспытание и генетический мониторинг 14 сортов картофеля в трех пунктах Горного Алтая разных по высотной поясности — в Майме (350м над уровнем моря), Чемале (630м) и Усть-Кане (1100м). Испытания проводились согласно "Методическим указаниям по экологическому сортоиспытанию картофеля" (1982), с использованием и других современных методик. Полевые опыты размещались синхронно по вертикальной зональности (площадь делянок 7,5м, повторность 4-х - кратная, рендомизированно).

Испытуемая коллекция включала генотипы 3-х групп спелости - ранние (Приекульский ранний, Корине, Новосибирский, Алмаатинский и Уральский сувенир); среднеранние (Невский, Огонек, Адретта, Свитанок киевский, Эскорт и Гибрид 89/18) и среднеспелые – Луговской, Ласунок и Символ. Фиксировались показатели: продуктивность (грамм/куст), число клубней с одного куста, крупность (средняя масса одного клубня), высота стебля, число стеблей. Статистическая обработка была проведена при помощи модулей ППП STATISTICA: факторный анализ, главные компоненты и классификационный анализ, дисперсионный анализ; для построения графика распределения вариантов эксперимента в пространстве главных компонент использовался Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Первоначальная обработка — факторный анализ (метод главных компонент). Два фактора, объясняющие 70% дисперсии имели следующие факторные нагрузки указанных переменных (таблица 1).

Таблица 3. Факторные нагрузки

	Фактор 1	Фактор 2
Масса клубней с куста	0,912	0,075
Число клубней с куста	0,290	0,929
Число стеблей	0,246	-0,121
Высота стеблей	0,838	0,062
Крупность	0,409	-0,870

Первый фактор включает большую часть дисперсии продуктивности и высоты стеблей. Второй фактор число клубней и крупность, при этом крупность вносит отрицательный вклад.

Рисунок 1. Центроиды, обозначающие положение показателей сортов, в пространстве главных компонент, в зависимости от года и места выращивания (треугольник – 1999 г, ромб – 2000 г, квадрат – 2001 г: цвет белый – Майма, серый – Чемал, черный – Усть-Кан)

Для рассмотрения распределения вариантов эксперимента мы использовали полученные координаты вариантов в пространстве главных компонент для построения графика (рисунок 1), из графика видно, что по оси второй главной компоненты (ось ординат) наиболее отличны варианты за 1999 год в Майме и Усть-Кане. По координатной оси первой главной компоненты (ось абсцисс) распределение наблюдается в основном по годам вегетации: наименьшие значения имеет 2000 г, около нуля 1999, и наибольшие, в целом, 2001 г, однако, с довольно сильными различиями по пунктам выращивания. Обратимся к данным по средним арифметическим признаков, для выяснения причин смещения в

пространстве главных компонент указанных вариантов. Продуктивность и высота стеблей были наименьшими в 2000 г (480 г/куст, 59см) особенно в Усть-Кане (399 г/куст. 49см) и наибольшими в 2001 (713 г/куст, разница по высоте стеблей с 2000 г не столь существенна).

В 1999 г в Майме наблюдалось большое число клубней с куста (16) и низкая крупность (39 г), в то время как в Усть-Кане малое количество клубней с куста (5,6), но высокая крупность (103 г), что, однако, не отразилось на продуктивности, в результате обратной корреляции указанные величины скомпенсировали продуктивность.

Для объяснения отклонений крупности и количества клубней в 1999 г в Усть-Коксе и Майме обратимся к метеорологическим данным. По-видимому, критическим было количество осадков в июле: в Майме на 30% ниже нормы, в Усть-Кане на 16% выше нормы.

Выводы

Примененный подход позволяет при анализе экспериментальных данных не постепенно интегрировать найденные закономерности, а изначально охватить общую картину полученных данных и закономерностей, и затем углубить анализ в направлении наиболее информативных блоков. Это уменьшает временные затраты при анализе, изначально выстраивая четкую картину полученных результатов.

АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ СРЕДНЕЙ СИБИРИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ

Парфенова Е.И. [1], Чебакова Н.М.[1], Лысанова Г.И.[2]

[1]*Институт леса СО РАН, Красноярск, Россия*
lyeti@ksc.krasn.ru
[2]*Институт географии СО РАН, Иркутск, Россия*
lysanova@irigs.irk.ru

Аннотация: рассматриваются изменения агроклиматических ресурсов территорий, используемых для выращивания сельскохозяйственных культур на юге Средней Сибири. Данные метеонаблюдений с середины XX века и прогнозные сценарии изменения климата для XXI века показывают направленный тренд в увеличении теплоресурсов территории, что может повлечь изменение ассортимента и урожайности возделываемых культур.

Многочисленные исследования подтверждают тенденции в изменении климата с середины прошлого века и особенно в его последней четверти (IPCC 1990, 1995, 2001, 2007). Существующее агроклиматическое районирование различного уровня (всероссийского, регионального, локального) основано на многолетних средних метеопоказателях с учетом погодичных флуктуаций, но без учета направленных трендов. Цель нашего исследования: оценить текущие изменения климата в Средней Сибири по данным наблюдений за 1960-2010 гг. и спрогнозировать локализации «горячих точек» изменений агропотенциала в текущем и будущем климате к концу века.

В Сибири прогнозируется, что при изменении климата в течение XXI века 40% площади может быть занято лесостепью и степью за счет отступания лесов на север (Tchebakova et al., 2011). Именно эти растительные зоны являются пригодными для сельского хозяйства, и потепление климата может способствовать его продвижению на север. Общее агроклиматическое районирование подразделяет территорию на пояса, зоны, подзоны в соответствии с тепло- и влагоресурсами, а специальное агроклиматическое районирование дает основу для оценки возможности возделывания конкретных сельскохозяйственных культур (Синицина и др. 1973). Мы провели общее агроклиматическое районирование Средней Сибири для текущего и будущего климата с учетом трендов изменения климата.

Для 100 метеостанций в регионе исследований были собраны данные (температуры января и июля и годовое количество осадков) за период 1960-2010 гг. (рис. 1а), по которым оценено изменение климата за период 1990-2010 гг. по отношению к базовому периоду 1960-1990 гг. Анализ данных показал, что за последние два десятилетия (1990-2010 гг.) зима и лето потеплели на 1-2°С (рис. 1 б, в) в лесостепной и степной зонах. Осадки в основном увеличились на 10%, хотя в межгорных сухих котловинах юга отмечается уменьшение осадков на 10-20% (рис. 1 г). В агроклиматическом районировании Красноярского края и Республики Хакасия (Атлас…,1994) наивысшей градацией по теплу указана сумма температур выше 10°С, равная 2000-2200, а в течение периода 1990-2010 гг. появляются агрорайоны с суммами температур 2200-2600.

а б в г

Рисунок 1. Локализация метеостанций (а) и изменения метеоэлементов за период 1991 -2010 г.г. относительно базового: б) температура июля; в) температура января; г) осадки за год, %

В соответствии со сценариями изменения климата HadCM3A2 и HadCM3B1 Центра Хадли аномалии метеоэлементов на территории Средней Сибири достигнут к 2080 г. 4-5°С для июльской температуры, 5-8°С для январской температуры и 10-20% увеличения годовых осадков (www.ipcc-data.org). При таком изменении к 2080 г. увеличатся площади теплых и очень теплых агрорегионов на 8-10%, которые будут пригодны для использования в сельском хозяйстве при достаточном увлажнении или поливе. Также появятся жаркие и экстремально жаркие агрорегионы (до 10% по сценарию А2), которые окажутся непригодными для использования из-за недостатка увлажнения. Такие изменения в климатических ресурсах приведут к изменению как ассортимента культивируемых видов и их размещения, так и оптимумов их урожайности.

Рисунок 2. Зависимость урожайности зерновых от климатических факторов и ее распределение по территории Средней Сибири в границах приемлемых типов почв

Используя показатели ресурсов тепла для различных культур (Синицина и др., 1973), построены ареалы основных культур в пределах исследуемой территории в современном климате и в 2080 году. Также, на основе собранных статистических данных по урожайности возделываемых агрокультур в течение 1966-2008 гг. в районах с различными климатическими условиями на юге Красноярского края, Хакасии и Тывы были найдены

корреляционные зависимости урожайности этих культур от климатических факторов – суммы градусо-дней выше 5°С и годового индекса увлажнения (рис. 2).

Климатические факторы объясняют 20-70% (R^2 = 0.2-0.7) вариации урожайности основных культур. При потеплении в течение XXI века урожайность зерновых может увеличиться с 20 до 35 ц га$^{-1}$, кукурузы на силос – с 300 до 600 ц га$^{-1}$, картофеля с 100 до 200 ц га$^{-1}$, ягодников – с 10 до 60 ц га$^{-1}$. При этом климатический потенциал агрорегионов ограничивается почвенным потенциалом, за который можно принять почвенные условия степи, лесостепи, подтайги и южной тайги. Традиционные культуры (зерновые, картофель) можно постепенно продвигать на север, примерно 50 км за десятилетие, а также интродуцировать на юге новые культуры (кукурузу на зерно, некоторые сорта винограда, абрикос), которые будут определяться условиями зимы, или могут потребовать дополнительного полива. Таким образом, Агроклиматическое районирование Средней Сибири должно быть скорректировано в соответствии с наблюдаемыми и прогнозируемыми климатическими трендами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 10-05000941

Литература

Атлас Красноярского края и Республики Хакасия. Ред. В.И.Иванов. Роскартография.- Новосибирск. 1994.– 84 с
Синицына Н.И, Гольцберг И.А., Струнников Э.А. Агроклиматология.– Л.: Гидрометеоиздат, 1973.– 344 с.
Tchebakova N.M, Parfenova E.I., and Soja A.J. Climate change and climate-induced hot spots in forest shifts in central Siberia from observed data // Regional Environmental Change.- 2011.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОПУЛЯЦИЙ ОРГАНИЗМОВ (НЕ ПОДЛЕЖАЩИХ ПРЯМОМУ ПЕРЕСЧЕТУ) МЕТОДОМ «НУЛЕВЫХ ПРОБ» НА ПРИМЕРЕ ФИТОПАРАЗИТИЧЕСКИХ НЕМАТОД

Перевертин К.А.

Центр паразитологии Института проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова, Москва, Россия
perevertink@mai.ru

Аннотация: эффективное управление популяциями фитопаразитических нематод (nematode control) в агробиоценозах даже при развитом аппарате математического моделирования при производственном внедрении не может быть реализовано без достаточно простого технологически, но корректного статистически метода оценки главной входной переменной модели – плотности популяции нематод, P_i,(особей/100 см^3 почвы). Апробированный нами метод нулевых проб (zero cores) позволяет не пересчитывать микроорганизмы в каждой пробе, а лишь констатировать их наличие/отсутствие. Доля (%) нулевых проб позволяет адекватно оценить P_i.

На долю фитопаразитических нематод приходится до 1/4 потерь мирового урожая от вредных организмов (Maggenty, 1981, Метлицкий, 1981). Хозяйственная значимость потерь сельхозпродукции от фитогельминтозов, неизмеримо возросшая в период интенсификации земледелия, предопределила повышенный научный интерес к этой группе фитопаразитов и, в частности, интерес к математическому моделированию. Успешности последнего способствуют биоэкологические особенности объекта моделирования/управления. Нематода не бегает, не прыгает, не летает, локализуется в слое прикорневой почвы растения-хозяина и имеет достаточно низкий потенциал размножения – сотни--тысячи, альтернативой миллионным порядкам у грибов и миллиардным у вирусов. Однако эйфория работы с «идеальным объектом», выразившаяся в построении множества красивейших матмоделей (имеющих прочный фундамент «от» основных модельеров ─ Ферхюльста и Лотки с Вольтерра (Seinhorst, 1965, 1984, Ferris, 1976, 1984, etc.,)), сменилась определенным унынием, при попытках производственного внедрения, натолкнувшись на необходимость

полевой оценки главной входной величины модели – допосевной плотности популяции нематод – P_i. (Для удобства цитирования отметим P_i =). На прямой вопрос практиков: «Так сколько же проб (cores) и какого объема, необходимо брать на гектар?» приходилось юлить, предлагая известные рекуррентные (секвенциальные) алгоритмы с необходимостью тестирования почвенных проб на каждом шаге еще до объединения их в смешанный образец (sample) по учетной единице.

Занятно, что текущий (2011) год можно назвать юбилейным после выхода фундаментальной статьи Taylor L.R. в журнале «Nature», 1961. За полувековой период многочисленные исследователи, подтверждая наличие степенной связи между средней и дисперсией S^2=a расходятся в главном. Правило… или Закон? (Taylor's power low или Taylor’s power rule?) Статистически-приемлемое описание для множества частных случаев, или все же фундаментальное положение справедливое везде и всегда? А ведь Биология очень нуждается в ЗАКОНАХ. Очень заманчиво выглядела Тэйлоровская декларация о видоспецифичности параметра b, пик проверки которой в нематологии пришелся на 90-е (Brown, 1993, Boag &Topham, 1984, Молоканова, 1993 и др.), но она также не нашла убедительного подтверждения.

По нашему мнению, истина лежит, как всегда, посредине. Стаи птиц, стада сайгаков, пятна планктона и даже неравномерное (очаговое) распределение нематод в «равномерных» агробиоценозах свидетельствуют в пользу гипотезы Тэйлора. Явный минус последней в корреляционном (не функциональном) характере зависимости, но это в огромной степени связано с несовершенством наших учетов, и уж ни в коей мере нельзя предварительно декларировать некорректность Правила для использования в прикладных разработках. Здесь уместно вспомнить о «до-Тэйлоровских» статистических законах распределения, которые многократно употреблялись (и употребляются) в биометрии и, в частности, применительно к нематодным популяциям: и логнормальное, и биномиальное, и Неймана типа А и т.д. и т.п. Нельзя не упомянуть работы нашего многолетнего соавтора — С.В. Васильева (ВИЗР), касающиеся, впрочем, учета не микроскопических вредителей.

Суть метода сводится к внешне парадоксальной рекомендации – учету доли «пустых» почвенных проб, в которых нематод данного вида не обнаружено. Технологически достаточно простым методом для седентарных нематод является предложенный нами рулонный биотест (roulean bioassay, Перевертин, 1997, 2008). Математическое обоснование предполагает совместное использование правила Тэйлора и одного из законов распределений, наилучшим из которых признано отрицательное биномиальное (Noe, Barker,1985, Метлицкий, 2005).

Если p – вероятность обнаружения нематод исследуемого вида в почвенной пробе, то q – обратная вероятность выражается следующим образом:

$$q = \frac{S^2}{\overline{X}} = \frac{a\overline{X}^b}{\overline{X}} = a\overline{X}^{b-1}$$

Параметр K отрицательного биномиального распределения $(p\text{-}q)^{-K}$, отражающая степень агрегированности популяций может быть представлен так:

$$K = \frac{\overline{X}}{q-1} = \frac{\overline{X}}{a\overline{X}^{b-1} - 1}$$

Долю нулевых проб (в %) обозначим через P_0:

$$P \text{ или } \lg P_0 = 2 - K$$

Подставляя вместо K полученное ранее выражение, имеем окончательно:

$$\lg P_0 = 2 - \frac{\overline{X}}{a\overline{X}^{b-1} - 1} \times \lg a\overline{X}^{b-1}.$$

Зная параметры a и b правила Тэйлора и присваивая P_0 значения 0 до 100% с приемлемым шагом приращений, возможно в каждом случае получить компьютерное решение для P_i. Обобщая работы по *M. incognita* (Казахстан, США, Великобритания, Россия), принимаем a=1, b=2,2. Расчетные значения для P_0 и представлены в таблице

P_0, % «пустых выборок»	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95
Рассчитанная P_i, $(\bar{X})$	87,1	36,3	20,1	12,0	7,3	4,3	2,4	1,2	0,4	0,7

Таблица 4. Прогнозируемая плотность нематод *M. incognita*

Полученная аналитическим путем функциональная зависимость при практическом внедрении далеко не всегда оказывается адекватной. Рассчитанные для M.incognita теоретические зависимости «отказывались» работать, например, в Воронежской области. Настройка факторозависимыми параметрами (К и а) зачастую оказывалась недостаточной.

Данная проблема решалась нами, порой математически «не изящно», путем простой аппроксимации функции зависимости «пустых выборок» (осмотр технологически удаляемых корневых остатков после вегетации) и средней зараженности по полусекциям теплиц (Бухонова, Сергеев, Перевертин, «Защита растений», 2010). В любом случае, использование показанного математического аппарата, возможно, ряд коллег сочтет полезным для оценки плотности популяций других биологических объектов.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННО-ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ДОЛГОВРЕМЕННЫХ РЯДОВ КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ (на примере метеостанции г. Коломна, Южное Подмосковье)

Петров А.С., Курганова И.Н.

Учреждение Российской Академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино Московская обл., Россия
PetrovAS-69@yandex.ru

Аннотация: в результате анализа долговременных рядов климатических данных метеостанции г. Коломна был выявлен отчетливый тренд увеличения среднегодовой температуры воздуха (с 1913 по 2008 г.) и показано отсутствие ярко выраженного тренда изменения количества осадков (с 1966 по 2008 г.), что свидетельствует об увеличении засушливости климата Южного Подмосковья. Наиболее заметный рост среднегодовой температуры воздуха наблюдался после 1980 г и составлял более 90% от общего повышения температуры за анализируемый временной период.

Введение

Одной из актуальных экологических проблем современности является изменение климата, выражающееся в увеличении средней глобальной температуры воздуха, составляющее у поверхности Земли 0.74°С за последнее столетие (Гулев и др., 2008). Наиболее ярко изменение климата наблюдается в последние десятилетия и проявляется не только в более выраженном увеличении глобальной температуры, но и в усилении засушливости климата на значительной территории России (Золотокрылин и др., 2007). Увеличение частоты засух наблюдается как в регионах с прогнозируемым снижением количества осадков, так и в областях, где количество осадков увеличивается в последствие изменения климата (Алифанов и др., 2006). Цель настоящего исследования состояла в

анализе долговременных рядов климатических данных на примере метеостанции г. Коломна (Южное Подмосковье) с применением регрессионно-линейных моделей.

Объекты и методы исследования

Долгосрочные ряды наблюдений за температурой воздуха (1913-2008 гг.) и количеством осадков (1966-2008 гг.), полученные на метеостанции г. Коломна и опубликованные на сайте Росгидромета (*http://aisori.meteo.ru/ClimateR*), были проанализированы методом линейно-регрессионного анализа на месячном, сезонном и годовом уровнях осреднения. Для полученных временных трендов методом наименьших квадратов была оценена их достоверность (R^2) и вероятность (P, %). Интенсивность и знак наблюдаемых трендов характеризовали с помощью коэффициентов линейной регрессии в полученных статистических моделях.

Результаты и обсуждение

Рисунок 1. Наблюдаемые тренды увеличения среднегодовой (А), средне зимней и средне весенней (Б) температуры воздуха в 1913-2008 гг.

В результате проведенного моделирования был выявлен значимый (P>99%) тренд увеличения среднегодовой температуры воздуха (***СГТВ***) на 0.02°С·год$^{-1}$ (Рисунок 1А) при отсутствии отчетливого тренда изменения количества осадков, что может косвенно свидетельствовать об увеличении засушливости климата Южного Подмосковья. Общий рост *СГТВ* составил 1.56 °С за период с 1913 по 2008 год и был обусловлен главным образом увеличением средне-зимних и средне-весенних температур на 0.03°С·год$^{-1}$ (P>99%) в

среднем для каждого сезона (Рисунок 1Б). Достоверных трендов изменения температуры в летний и осенний периоды не выявлено. Наиболее отчетливый тренд повышения *СГТВ* наблюдался, начиная с 1980 года (Рисунок 1А), и составлял более 90% от общего повышения температуры за анализируемый временной период.

В зимний период наиболее значимое повышение температуры воздуха наблюдалось в декабре ($0.03^{o}C \cdot год^{-1}$; P>97%) и январе ($0.04^{o}C \cdot год^{-1}$; P>97%). В весенний период значимый рост температуры (P>99%) был характерен для всех трех месяцев и составлял 0.05, 0.03 и 0.01 $^{o}C \cdot год^{-1}$ в марте, апреле и мае, соответственно (Таблица 1).

Таблица 1. Основные характеристики (интенсивность и вероятность) наблюдаемых трендов изменения температуры воздуха в 1913-2008 гг.

Период ,сезон ,месяц	Год	Зима	Весна	Декабрь	Январь	Март	Апрель	Май
Интенсивность, $^{o}C \bullet год^{-1}$	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,03	0,02
Вероятность, %	>99	>99	>99	>97	>97	>99	>99	>99

Работа выполнялась при поддержке МНТЦ (проект 4028) и Программы Президиума РАН.

Литература

Алифанов В.М., Гугалинская Л.А., Иванникова Л.А. Оценка и прогноз гидротермических условий почвообразования серых почв // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв.- М.: Наука, 2006.- С. 471–494.

Гулев С.К., Катцов В.М., Соломина О.Н. Глобальное потепление продолжается // Вестник РАН, 2008.- Т. 78.- № 1.- С. 20-27.

Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Черенкова Е.А. Динамика засух в европейской России в ситуации глобального потепления // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеоиздат, 2007.- Т. XXI.- С. 160–182.

МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВАЖНЕЙЩИХ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ ДИКИХ КОПЫТНЫХ (ЛОСЯ, КОСУЛИ, КАБАНА) РОССИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МНОГОЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА

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: представлены модели декомпозиции трендов, периодических и случайных составляющих динамики численности важнейших охотничьи – промысловых видов лося, европейской/сибирской косули и кабана. Показано, что длина интервалов цикличности колебания для лося составляет 10 лет, а для косули и кабана - 11 лет. Приведены модельные оценки репродуктивного потенциала, годового воспроизводства и максимально возможная численность популяций изучаемых видов.

Введение

В настоящее время существуют две основные гипотезы, объясняющие причины и механизмы динамики низкой численности важнейших ресурсных парнокопытных животных в России. Сторонники первой гипотезы полагают, что многолетние колебания численности животных вызваны с глобальными изменениями климата и сукцессиями растительности и проявляются с интервалами от 5 до 120 лет[Данилкин, 2007]. Согласно второй гипотезе, основной фактор, определяющий численность копытных в России за последние 50 лет, имеет “антропогенно – хищнический” характер, т.е. утверждается, что динамики численности

может быть описана в терминах обобщенной модели “хищник – жертва”. По нашему мнению, динамические изменения численности животных имеют многофакторный характер и разработка походов для анализа и выявления закономерностей этих изменений во времени и пространстве необходимы для понимания и управления ресурсными видами диких копытных России.

Основная цель работы – анализ динамики численности и характера пространственного распределения важнейших ресурсных видов лося (A. *alces* L.), европейской / сибирской косули (C. *capreolus* L., C. *pygargus* Pall.) и кабана (S. *scrofa* L.) на основе данных многолетнего мониторинга в 1981-2007 гг.

Методика исследований

Для анализа временных рядов ресурсных видов парнокопытных и выявления закономерности динамических изменений численности разработан комплекс программ (КП), реализующих методы прикладной статистики и классические модели популяционной динамики. *Блок Предварительный анализ*: вычисляет основные описательные статистики временного ряда численности животных, осуществляет различные преобразования ряда (удаление среднего, преобразование Бокс-Кокса, применение сезонных и разностных операторов), определяет значения коэффициентов автокорреляционных (АКФ) и частных автокорреляционных функций (ЧАКФ). *Блок Тренд*: оценивает тренд методами линейной и нелинейной регрессии, предлагает различные сервисные возможности для подбора адекватных моделей на основе анализа остатков, АКФ и ЧАКФ. *Блок Модели MA(p,q)*: оценивает тренд методом скользящего среднего (MA) с параметрами шага усреднения p и полиномами степени q, включает сервисные возможности для подбора параметров p и q. *Блок Сезонные эффекты*: идентифицирует сезонную составляющую с применением аддитивных, мультипликативных и смешанных моделей взаимодействия тренда и остатков. *Блок АРМА*: определяет сезонную и несезонную модель авторегрессии - скользящего среднего (ARMA), используя выборочные коэффициенты АКФ и ЧАКФ. *Блок Состояние популяций:* включает оценку репродуктивного потенциала популяций, экологической емкости среды обитания, величины годового воспроизводства и интенсивности миграционных процессов на основе модифицированных дискретных моделей Бивертона-Холта, Рикера и Мальтуса.

Анализ результатов. С целью выбора адекватной модели, описывающей динамику численности населения лося, косули и кабана, анализировались пять классов моделей с различными параметрами. После анализа этих моделей была выбрана модель декомпозиции, включающая тренд с использованием модели скользящего-среднего, индексов перидичности и случайной составляющей. Анализ остатков на основе коэффициентов автокорреляции показывает, что ошибки можно рассматривать как гауссовский белый шум, что говорит о существовании периодической изменчивости. Длина интервалов цикличности колебания численности лося составляет 10 лет, а косули и кабана - 11 лет.

В целом существующие оценки по плотности лося наглядно показывают, что количество областей, в которых плотность принимает значение менее 1 особей/1000 равно 37, что составляет 91 % от всей площади ареала. Относительная площадь 32 регионов, на территории которых плотность лося варьирует в диапазоне 1-4 особей на 1000 лесной площади (ЛП), составляет 7% площади ареала. В ограниченном количестве регионов 7 (2 % площади ареала) плотность населения больше 4 особей на 1000 га. Эти оценки позволяют утверждать, что взвешенная оценка средней плотности лося по России составляет 0.71 особей на 1000 га ЛП.

Суммарная площадь областей, на территории которых плотность косули больше 30 особей на 1000 га ЛП**,** составляет менее 1 % площади ареала. Относительная площадь

территории, на которых плотность составляет 0.01-0.091; 1.01 – 4.92; 5.04-9.78;10.1-19.59 особей на 1000 га ЛП, соответственно равны 65, 22, 8, и 4 %%. Эти оценки указывают, что взвешенная оценка средней плотности косули по России имеет значение 2.33 особей на 1000 га ЛП.

Доля площади арела кабана, на которой плотность больше 13 особей, находится в интевалах 8-12, 3-8, 1-3 и меньше 1 особей на 1000 га ЛП составляют 0.3, 0.8, 2.1, 6.9, 89.9 %% соответственно. Средневзвещанная плотность кабана по России равняется 0.84 особей на 1000 га ЛП.

Модельные оценки численности животных в России показывают, что в природных зонах животные распределены неравномерно в широтном направлении. Наиболее высокие плотности животных лося, косули и кабана достигаются в зоне хвойно-широколиственных лесов: 6.7 – 13.6, 27.1-54.3 и 21-42 особей на 1000 га ЛП. В таежной зоне искомые величины для лося, косули и кабана изеняются в диапазонах 4.94-9.88, 19.7-39.5 и 15.3-30.6 особей на 1000 га ЛП, соответственно. В лесостепной зоне средние плотности составляют 3.26 – 6.57, 13.1-26.3, 10.1-20.3 особей для лося, косули и кабана, соответственно. В зоне притундровых лесов и редкостойной тайги искомые показатели составляют 0.2 -0.57, 4.9- 9.8, и 3.8-7.68 особей на 1000га ЛП, соответственно.

Для выявления закономерностей изменений численности животных по времени и в пространстве необходимо использовать комплексный подход, включающий как аппарат анализа временных рядов, а также модифицированные классические модели популяционной динамики [Петросян и др., 2009; 2010].

Исследование поддержано программой ОБН РАН «Биологические ресурсы России: Фундаментальные основы рационального использования» и госконтрактом МинОбрнауки № 02.740.11.0867

Литература

Данилкин А.А. К проблеме цикличности в динамике численности диких копытных животных. Вестник охотоведения.- 2007.- Т. 4.- № 1.- С. 89-99.

Петросян В.Г., Дергунова Н.Н., Бессонов С.А., Назарова К.А., Омельченко А. В. Оценка динамики численности и половозрастной структуры лося (A. Alces L.) в России с использованием имитационной модели и данных многолетнего мониторинга. Ж. Известия Самарского научного центра РАН, № 11, 1(7).- 2009.- С. 1566-1574.

Петросян В.Г., Дергунова Н.Н., Бессонов С.А. Комплексная имитационная модель оценки динамики численности, половозрастной структуры и оптимальной плотности лося (Alces alces L.) на основе данных наземных и дистанционных измерений // Успехи современной биологии.- 2010, т. 130.- № 1.- С. 88-99.

К МЕТОДОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ: ПЕРСПЕКТИВЫ СИНТЕЗА МЕРОЛОГИЧЕСКОГО И ХОЛИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДОВ

Печуркин Н.С.

ИБФ СО РАН, Академгородок, Красноярск-36, Россия,
nsla@akadem.ru

Аннотация: в работе обсуждаются методологические особенности двух основных подходов в экологическом моделировании: мерологического и холистического. Предлагается объединение двух описанных подходов на основе учета циклов лимитирующих веществ в экосистемах.

Суть имитационного моделирования (мерологический подход) заключается в максимально возможном включении в модель всех процессов и компонент, биотических и абиотических, входящих в описываемую экологическую систему. Математическая модель является как бы отражением объекта, его количественным портретом, максимально возможной имитацией. Отсюда и само название - имитационное моделирование. Например,

имитационная модель луговой экосистемы может включать в себя более двухсот нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику конкретных видов, потоков и взаимодействий. Откуда же бедным экологам взять тысячи реальных кинетических коэффициентов, связывающих эти потоки и взаимодействия. Вот и приходится их "брать из воздуха" (*from the air,* как говорится в англоязычной литературе) или "с потолка", как говорится по-русски. Биосферные модели имитационного типа становятся еще более громоздкими и неудобоваримыми, чем модели отдельных экосистем. Ждать от них особого проку, в смысле доброкачественных прогнозов длительного развития, практически, имеет мало смысла.

Другой подход в математическом моделировании экосистем, так называемый холистический. Он представляет собой другую крайность. Экосистема рассматривается как "черный ящик", в котором неизвестно что происходит, имеются только входы и выходы у этого ящика. Например, такими показателями могут служить потоки входящей и выводимой энергии, потоки биогенных и косных веществ, в частности, загрязнителей окружающей среды. Такой метод тоже имеет право на существование, особенно в тех случаях, когда мы имеем мало информации о структуре изучаемой системы, но хотим ее использовать. В физике, химических технологиях, управлении системами, иногда в медицине, он может давать неплохие результаты. Но в биологии, а особенно в моделировании и изучении экосистем его применимость резко ограничена особенностями объекта. Дело в том, что, образно говоря, экология это наука о циклах веществ, раскручивающихся под влиянием накачки внешней энергии. Циклы эти могут быть организованы по-разному, имея подциклы со своими подподциклами и т.д.

Метод черного ящика не способен улавливать и дифференцировать циклы, ибо они могут быть не связаны с входами и выходами системы, замыкаясь внутри нее. И здесь опять возникает проблема неоднозначности и множественности траекторий движения и развития так же, как и при имитационном моделировании. Действительно, разные типы систем в определенных условиях могут иметь сходные реакции и в таком случае мы их соотнесем к одинаковому типу. Но при смене условий замаскированные в них разные циклы и подциклы поведут себя совсем по-другому, и вся наша классификация рассыпется в прах. По образному выражению профессора Р. Улановича, «как известно, природа не терпит пустоты, но следует также сказать, что логика не терпит циклов». Таким образом, циклы, при "черноящичном" подходе ускользают из-под изучения.

Казалось бы, что оба описанных подхода как крайности легко объединить; один компонентный (мерологический, как говорят экологи), другой целостный (или холистический), и они должны дополнять друг друга. И действительно, этого так хотелось бы. Но, при их механистическом объединении, сведении в одно, получается задача невероятной сложности. Результаты подобных (очень громоздких и трудоемких) расчетов практически не поддаются разумной интерпретации, а потому (снова отметим, с сожалением) не дают новой информации и не годятся для "получения ее из будущего". Будущее при таком подходе остается таким же неопределенным, как и при использовании обычных вербальных моделей, т.е. при простом обсуждении проблемы безо всяких расчетов. Существует ли выход из создавшегося, очень не простого положения? Имеется в виду положительное разрешение сложившейся проблемы? По нашему убеждению, достойный выход существует, прогностическое эвристическое моделирование как отдельных экосистем, так и биосферы в целом, вполне возможно, и оно имеет неплохие перспективы даже в ближайшем будущем.

Дело в том, что основные трудности в количественном изучении экосистем связаны с их сложностью и, вообще говоря, неповторимостью или даже уникальностью. Можно согласиться с биологами-натуралистами, что нет на нашей планете хотя бы двух экосистем, во всем соответствующих друг другу. Можно согласиться с ними полностью, если речь идет о тонкой или, вернее, тончайшей структуре каждой из природных экосистем. Да, с точки

зрения структуры, каждая система уникальна. Но с точки зрения их функционирования, в их главном проявлении, в осуществлении основных функций биотического круговорота, они не только сходны и подобны, они зачастую практически не различимы. Именно функциональный подход и открывает дорогу к точным количественным методам изучения объекта, допускает оправданную его идеализацию. (Вспомним, как продвинуло механику, в том числе небесную, представление об идеальной, безразмерной материальной точке, аналитическую математику о бесконечно малом времени и пространстве, термодинамику об идеальном газе, ядерную физику об элементарных частицах, химию об орбиталях и т.д.).

Таким элементарным объектом, идеализированным кирпичиком для теоретической экологии должно быть важное эмпирическое обобщение - представление о круговороте веществ в экосистеме. И не просто о круговороте любых веществ, а, прежде всего, лимитирующих развитие экосистемы. Именно на этом пути открывается реальный шанс на объединение двух описанных крайностей, к синтезу двух обсуждаемых направлений или подходов: мерологического, в динамике популяций, сообществ и факторов среды, и холистического, или системно-теоретического. Как мы говорили, тривиальное, или простое механическое их сведение невозможно, так как, из-за резкого возрастания сложности, задача делается невозможной для количественного решения. Только изучение функционирования циклов лимитирующих веществ, их даже в больших природных экосистемах немного (основные: азот, фосфор, вода, реже кислород, кальций, сера и др.), позволяет творчески соединить оба этих направления.

Таким образом, цикл лимитирующего вещества, раскручивающийся под влиянием накачки свободной энергии извне, кладется в основу экспериментальных и математических моделей. Здесь возможно применение количественных критериев развития экосистем (например, энергетических) и резко уменьшается число описываемых процессов или явлений. Здесь же и открывается возможность разработки универсальных математических моделей экосистем, имеющих малое, минимальное, ограниченное число уравнений, описывающих только ключевые процессы, определяющие поведение всей системы. Можно надеяться, что это - реальные пути к разработке универсальных (минимальных по числу звеньев, но представительных по ключевым процессам) математических моделей, описывающих фундаментальные жизненные процессы, характерные для систем надорганизменного уровня (сукцессия, эволюция, сосуществование или элиминация видов, интродукция новых видов и т.д.).

Эвристичность моделей описанного типа (одновременно: синтезирующих экосистему как единство и редуцирующих число ее компонентов только до ключевых) позволит использовать их как эффективный инструмент для разработки количественных прогнозов поведения конкретных экосистем, в том числе, находящихся под антропогенной нагрузкой.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ ЧЕЛОВЕКА И ВЫСШИХ ХИЩНИКОВ: ЛОГИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Печуркин Н.С., Сомова Л.А.

ИБФ СО РАН, Академгородок, Красноярск-36, Россия,
nsla@akadem.ru

Аннотация: в работе обсуждается энергетический критерий для количественного описания динамики популяций человека и высших хищников на основе коэффициента потребления энергии на душу населения. Предлагается простая логистическая модель зависимости показателей прироста популяции от энергообеспеченности.

Описания популяционной динамики, главным образом, основаны на концепции “демографического перехода”, согласно которой численность человеческой популяции,

стабилизируется на высоком уровне в результате поступательного индустриально - экономического развития с заметным понижением скоростей смертности и рождаемости, характерно высоких для начальных этапов развития человечества. При этом уменьшение показателей смертности с улучшением условий жизнеобеспечения представляется вполне очевидным. Ситуация со снижением показателей рождаемости гораздо менее очевидна. Например, в развитых странах, прошедших четыре последовательных стадии в переходе от древнего (пред-индустриального) до современного (пост-индустриального) уровня, отмечается, что, чем выше степень социально-экономического развития на душу населения, тем меньше детей рождается на душу женского населения в стране. Такой пример обратной корреляции называют “демографо-экономическим парадоксом”. В некотором смысле, это находится в противоречии с концепцией Томаса Мальтуса и с "требованием" естественного отбора по максимально возможному размножению для биологических популяций различных таксонов. Однако в эволюционной экологии известно, что, чем более высок уровень хищника в биологической иерархии, тем меньше потомства он имеет и тем выше его «родительский вклад» в жизнеобеспечение (питание, забота, обучение) каждого рожденного существа. Таким способом люди, как все другие организмы, в среднем, максимизируют свою приспособленность в ряду поколений. По-видимому, так решается конфликт между избыточным текущим и требуемым будущим воспроизводством в поколениях: через оптимизацию «количества и качества» потомства. Следует отметить, что различные экономические, культурные и социальные факторы способны регулировать репродуктивное поведение на уровне конкретных людей, отдельных стран и человечества в целом. Имеет смысл попытаться выделить самые общие факторы, которые имеют универсальный характер и могут быть легко измерены. Одним из таких универсальных показателей может служить удельное потребление энергии, дополнительно используемой человеком в дополнение к его физиологической (метаболической) энергии. Именно эта энергия возросла в десятки и даже сотни раз в историческом развитии человечества. (Англоязычный термин - экстра-телесная, или экстра-метаболическая энергия; по Вернадскому – культурная биогеохимическая энергия; ее также называют – технологическая, или цивилизационная).

Согласно историко-экстраполяционному подходу, при анализе современных тенденций развития необходимо признать, что потребление энергии на душу населения является важнейшим экономическим и социальным показателем, определяющим как уровень жизни конкретной страны, так и этап исторического развития, на котором она находится.

Можно ввести количественный критерий энергетического развития в виде отношения количества (потока) потребляемой энергии к численности анализируемой популяции - ***h***, например, в единицах – *кВт/чел.* Введем представление об оптимальном уровне комфорта, желаемом для каждого «цивилизованного человека», по достижении которого он перестает стремиться к «избыточной» активности, в том числе к «избыточному» размножению, сохраняя простое воспроизводство без прироста. Назовем эту величину энергообеспеченности - ***h жук,*** т.е., величиной, соответствующей Желаемому Уровню Комфорта (ЖУК), при достижении которой отпадает необходимость «избыточной» активности, выключается «избыточное» размножение плоти, его заменяет «развитие духа». Это и есть тот самый - цивилизационный перелом - переход (не путать с демографическим переходом!), о котором все больше и больше говорится. В нем достаточно ярко представлена информационная составляющая, которая в наше время передает информацию о «существовании ***h жук***» в те регионы, где пока реально достигнутая величина *h* весьма невелика. Можно записать уравнение для относительной (удельной) скорости роста популяции человека в виде :

$$dn / dt = (dN/dt) / N = a(h\ жук - h) / h\ жук \ ,$$

где ***a*** – максимальная удельная скорость роста, генетически присущая данной популяции, ***N*** - численность анализируемой популяции, ***h жук*** - величина энергообеспеченности, соответствующей Желаемому Уровню Комфорта, ***h*** - величина энергообеспеченности, достигнутая к моменту - ***t*** описываемого времени.

Согласно этой формуле, удельная скорость роста человеческой популяции должна достигать максимальных значений для тех регионов, где текущее значение ***h*** в настоящий момент наиболее низко. По мере приближения реального текущего значения ***h*** к величине ***h жук***, скорость роста падает, доходя до нуля по достижении Желаемого Уровня Комфорта (ЖУК). Таким образом, данная модель описывает все четыре последовательных стадии демографического развития человечества: от самой ранней, с высокими скоростями рождаемости до поздней, с нулевым приростом. Внешне формула дает вполне похожее на логистическую кривую ограничение роста численности. Но «наполнение» ее совершенно иное. Не тривиальный Голод, а Энергетика и Информация правят миром! Конечно, сама величина Желаемого Уровня Комфорта (ЖУК) является многопараметрической (многовекторной, многолучевой), но в данном случае полагается, что именно ее энергетическая составляющая наиболее информативна. Перечислим основные преимущества введенной меры:

1. Она относится к основным показателям жизнеобеспечения человека, так как энергетика имеет прямое отношение к «жизнесберегающим технологиям».
2. Она имеет строгое количественное выражение.
3. Она понятна всему миру, каждому из нас, независимо от расы и вероисповедания (буквально: киловатт – он и в Африке киловатт).
4. Она не подвержена «инфляционным подвижкам», как это неизбежно происходит с экономическими показателями. Например, при сравнении величин ВВП в денежном выражении всегда приходится прибегать к трудно измеримым паритетам покупательной способности [ППС].

Еще раз подчеркнем, что те участники демографо-энергетического ралли, которые уже достигли уровня ***h жук*** к настоящему времени, должны испытывать остановку роста, что сейчас и происходит с развитыми странами. А развивающиеся страны смогут увидеть свои пределы размножения. Отдельного анализа заслуживает ситуация, при которой текущая величина ***h*** превышает величину ***h жук,*** что, давая отрицательный прирост, должно приводить к снижению численности анализируемой популяции. Это также требует более внимательного отношения к оценке значений самих величин ***h жук*** и в глобальном и в региональных аспектах. Можно надеяться, что мы имеем количественную меру, с которой можно работать или, по крайней мере, серьезно обсуждать.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ БУФЕРНОЙ ЕМКОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРИРОДНОГО КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОДАХ

Повар И.Г.

Институт химии Академии Наук, Кишинев, Республика Молдова
ipovar@yahoo.ca

Аннотация: недостаток информации о буферных свойствах водных экосистем по отношению к ионам тяжелых металлов (ТМ) объясняется отсутствием количественной теории, способной предсказать их химическую устойчивость по отношению к изменению равновесного состава. Разработанная автором теория буферной емкости сможет служить надежным математическим инструментом для оценки и предсказания долгосрочных эффектов в природном управлении содержания ТМ в загрязненных водах.

Хотя аналитические методы являются необходимым инструментом для исследования

состава и количества ионов ТМ и идентификации возможных источников загрязнения, эти определения, без дополнительной информации, являются неадекватными инструментами для полной характеристики и предсказания потенциального биологического эффекта в загрязненных водных экосистемах. На основании только данной информации, невозможно предсказать будущее изменение содержания ионов ТМ и их химических форм в загрязненных экосистемах в результате изменения условий окружающей среды (например, pH, Eh, катионов, органических веществ и других металло-комплексующих лигандов).

Экосистемы обладают буферным свойством поглощать существенное количество ионных загрязнителей, однако если последние находятся либо возникают в больших количествах, то они способны кумулятивно перегрузить систему и как следствие не смогут быть поглощены. Для оценки риска загрязненных экосистем или естественного подавления загрязнителей необходимо обязательно знать как и до какой степени они распространятся либо их концентрации убавятся в будущем. Таким образом, проблема контроля концентрациями ионов ТМ в естественных системах может быть сформулирована следующим образом: каков будет ответ системы при изменении параметров, которые управляют pM = -log a_M (отрицательный логарифм активности иона металла)? Другими словами, какова величина буферной емкости pM системы? В отсутствие буферной емкости концентрации загрязнителя водной экосистемы изменялись бы очень быстро. При повышенных концентрациях, когда приток ионных загрязнителей превышает их буферную емкость, имеют место токсичные эффекты. Любая буферная система имеет определенный потенциальный (буферный) запас, который управляет равновесием и поддерживает один из равновесных параметров (например, равновесные концентрации) постоянным.

Недостаток информации о буферных свойствах экосистем по отношению к ионным загрязнителям можно объяснить отсутствием количественной теории, которая может предсказать их буферное поведение. Низкая буферная емкость экосистем, которые неспособны сохранять постоянный предел концентраций загрязнителей, может привести к бедственным экологическим последствиям.

Главной целью нашего сообщения является количественная оценка способов перемещения и преобразования ионов тяжелых металлов (ТМ) в окружающей среде и их распространение в экосистемах при помощи разработанной нами теории буферной емкости (ТБЕ). Ожидается, что ТБЕ поможет предсказывать долгосрочные эффекты в естественном подавлении ТМ в загрязненных водах. Полученные результаты предоставят исследователям инструмент для установления надежных пределов уровней концентраций ионов ТМ в водных объектах окружающей среды. Применение ТБЕ углубит знание и понимание процессов, которые управляют концентрациями компонентов, и сможет служить надежным математическим инструментом для оценки и предсказания долгосрочных эффектов в естественном подавлении ТМ в загрязненных экологических системах. Теория химических равновесий, диаграммный способ распределения химических форм, механизм действия буферной емкости и оценка буферных свойств двухфазных систем были развиты нами в (Fishtik, 2006, Povar, 1996, Povar, 2000, Povar, 2000, Povar, 2003, Повар, 2011, Повар, 2011). В этих работах выведены теоретические соотношения для основных буферных характеристик. Буферная емкость двухфазной (гетерогенной) системы значительна больше чем аналогичная величина для монофазной (гомогенной) системы в области pM ее максимального значения.

В работе (Повар, 2011) ТБЕ применена для оценки ион-молекулярной буферной емкости, β_X, в кислых природных водах в равновесии с минералом гиббсит (твердая фаза) относительно pX, где pX =-log [X] (pX =pH для кислотно-щелочных буферов и pAl для буфера по иону алюминия). Гиббсит $Al(OH)_3(s)$ имеет основной контроль над растворимыми алюминиевыми формами при данном значении pH, однако с увеличением степени комплексообразования Al уменьшается его свободная концентрация в природных водах. Эти воды имеют тенденцию поддерживать довольно постоянное значение pAl даже когда ионы Al^{3+} могут быть введены из внешних источников. Понятие буферной емкости очень полезно

в оценке кислотно-щелочного статуса кислых природных вод наряду с оценкой Al буферного эффекта. Развитый подход учитывает оценку буферности β_H и β_{Al} в природных водах, принимая во внимание доминирование Al буферности. Изучено влияние различных факторов (температуры, pH и концентраций главных компонентов в природных водах) на буферные характеристики этих буферных двухфазных систем. Наш подход был проверен на реальных водных качественных данных и был применен к практическому анализу природных водных образцов. Установлено, что природные воды в равновесии с гиббситом обладают определенным потенциальным резервом, посредством которого регулируется равновесие и поддерживается постоянным один из его параметров. Присутствие лигандов, образующих устойчивые комплексы с ионами твердой фазы, способствует усилению буферного действия гетерогенных систем.

Термодинамические расчеты в рамках предложенного буферного подхода дают возможность: 1) расширить наше механистическое понимание естественных процессов и их ускорения, уменьшающих содержание загрязнителей в поверхностной и грунтовой водах путем их комплексообразования (хелатирования) и реакций осаждения; 2) предсказывать и идентифицировать условия и степень обратимости процессов; 3) улучшить понимание экологических механизмов и процессов. В целом, предложенный подход предназначен для идентификации доминирующих процессов, которые являются ответственными за наблюдаемые изменения концентраций загрязнителя и предоставляют исследователям знание для установления надежных пределов концентраций ионов ТМ в окружающей среде.

Литература

Fishtik I., Povar I. Buffer Capacity in Multiple Chemical Reaction Systems Involving Solid Phases // Can. J. Chem.– 2006.– V. 84.– P. 1036-1044

Povar I. Buffer properties of heterogeneous systems containing sparingly soluble acids and metal hydroxides // Russ. J. Inorg. Chem.– 1996.– V. 41.– P. 1167-1172

Povar I. On homogeneous ion buffer systems // Russ. J. Inorg. Chem.– 2000.– V. 45.– P. 1628-1631

Povar I. Buffer properties of heterogeneous water-salt systems in relation to the components of a low-solubility precipitate // Russ. J. Inorg. Chem.– 2000.– V. 45.– P. 1632-1636

Povar I., Luca C. Considerations regarding ionic-molecular buffer solutions // Rev. Chim.– 2003.– V. 54(4).– P.312-316.

Повар И., Русу В. Новый тип диаграмм распределения растворимых и нерастворимых форм алюминия в натуральных гетерогенных водных системах // Вода: Химия и экология.– 2011.- №1.– С. 44 – 49.

Повар И., Русу В. Теоретические аспекты ион-молекулярной буферности в природных водах в равновесии с минеральной фазой гиббсит // Вода: Химия и экология.– 2011 (в печати).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ РАВНОВЕСНОГО СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЫ "НАСЫЩЕННЫЙ ВОДНЫЙ РАСТВОР - МИНЕРАЛ"

Повар И., Русу В.

Институт химии Академии Наук, Кишинев, Республика Молдова
ipovar@yahoo.ca

Аннотация: моделирование химических равновесий в природной гетерогенной системе сведено к решению системы нелинейных уравнений материального баланса, учитывающих в явном виде распределение химических форм иона алюминия в жидкой и твердой фазах. На основе рассчитываемого равновесного состава многокомпонентной системы разработан новый тип диаграмм гетерогенных равновесий, количественно описывающих распределение химических форм в обеих фазах.

Можно указать несколько причин существования большого числа алгоритмов и программ расчета равновесного состава многокомпонентных гетерогенных систем. Во-первых, задача расчета равновесного состава является сложной задачей на отыскание

условного экстремума, которая обычно сводится к решению системы нелинейных уравнений. Во-вторых, существует огромное число разнообразных многокомпонентных систем, имеющие свои конкретные особенности, поэтому существует большое число термодинамических (математических) моделей, причем параметры большинства из них известны лишь для небольшого числа химических форм. Следует также принять во внимание очень широкий диапазон изменения равновесных концентраций веществ. Для определения параметров моделей необходимо иметь экспериментальные константы равновесия и достаточный теоретический базис. К тому же, процесс расчета усложняется тем обстоятельством, что связь между параметрами модели и равновесным составом многокомпонентной гетерогенной системы является нелинейной. В силу указанных обстоятельств, пока невозможно создать универсальный алгоритм, при помощи которого можно было бы вычислять равновесный состав многокомпонентных систем с использованием разных моделей.

В настоящей работе, для упрощения задачи расчета равновесного состава при математическом моделировании сложных химических равновесий в природной гетерогенной системе, предложены оригинальные уравнения материального баланса (МБ), учитывающие в явном виде вклад твёрдых фаз (природных минералов). На основе рассчитываемого равновесного состава многокомпонентной системы разработан новый тип диаграмм гетерогенных равновесий, количественно описывающих распределение химических форм в обеих, водной и твердой, фазах.

При расчете равновесных составов сложных гетерогенных систем типа «насыщенный водный раствор – природный минерал» возникает необходимость учета твердых фаз при записи уравнений МБ и закона действующих масс (ЗДМ). Получаются таким образом системы нелинейных алгебраических уравнений, процесс решения которых представляет определенные математические трудности.

Для полной количественной характеристики изучаемых систем нами введены дополнительные переменные и дополнительные уравнения МБ, учитывающие вклад и стехиометрический состав твердых фаз. Дополнительные переменные представляют собой количества осажденных i ионов-компонентов минерала в 1 л раствора, ΔC_i, моль/л либо количество молей твердой фазы P в 1 л раствора. Показано, что эти величины взаимосвязаны с растворимостью твердой фазы S. Предложенная запись учета МБ позволяет свести систему N нелинейных уравнений МБ для известного исходного состава гетерогенной смеси (т.е. известных исходных (общих, аналитических) концентраций компонентов C_i^0) с N+1 переменными к системе N нелинейных уравнений с N неизвестными (равновесными концентрациями), которое легко решается численными методами. Остальные неизвестные равновесные концентрации компонентов гетерогенной смеси, входящие в систему нелинейных уравнений, легко выражаются через эту переменную. Одна из особенностей предложенной записи МБ состоит в том, что полученные на их основе результаты расчета равновесного состава могут быть непосредственно быть использованы для построения диаграмм гетерогенных химических равновесий (ДГХР), которые в явном виде отображают распределение химических форм данного компонента в водной и твердой фазах.

В гетерогенных равновесиях мольные доли α_i зависят также от исходного состава смеси и, следовательно, являются функциями дополнительных переменных: $\alpha_i = f(C_i^0, C_j^0, \ldots, pH)$. Такие диаграммы удобно строить в координатах pH - α_i, или C_i^0 - α_i при фиксированных значениях других переменных. Процедура построения диаграмм гетерогенных химических равновесий включает в себя следующие этапы: (а) термодинамический расчет области устойчивости твердой фазы (природного минерала). Твердая фаза устойчива при $\Delta G_{tot} > 0$. Условие $\Delta G_{tot} = 0$ соответствует началу его растворения (осаждения); (б) расчет мольных долей α_i всех химических форм содержащих данный компонент в твердой фазе; (в) для полноты описания картины вне области устойчивости твердой фазы, т.е. для гомогенного

водного раствора мольные доли рассчитываются при помощи обычных уравнений для построения диаграмм распределения. В этом случае значения α_i не будут зависеть от исходных концентраций взятых компонентов в условиях образования только моноядерных комплексных частиц.

Рисунок 1. Диаграмма гетерогенных химических равновесий в зависимости от pH в системе насыщенный водный раствор– гиббсит. Концентрации (моль/дм^3): $C^0_{Org}, C^0_{PO_4}$, $C^0_{SO_4}=1\cdot10^{-4}, C^0_F=5\cdot10^{-6}, C^0_{Al}=\cdot10^{-5}$

На рисунке 1 приведена ДГХР для заданного состава гетерогенной системы насыщенный водный раствор – гиббсит $Al(OH)_{3(S)}$. Такая диаграмма наглядно отражает распределение различных химических форм алюминия как в твердой фазе, так и в насыщенном растворе. Отметим, что при значении pH растворения-образования твердой фазы мольные доли растворимых и нерастворимых форм алюминия резко изменяются.

Для $C^0_{Al}=\cdot10^{-5}$ М в кислой и нейтральной средах равновесные концентрации моноядерных и полиядерных гидроксокомплексов алюминия малы. Для $C_{Al}^0<1\cdot10^{-3}$ М в кислых и слабокислых средах из растворимых форм преобладают комплексные частицы AlOrg и $AlHOrg^+$. При концентрации $C_{Al}^0 = 1\cdot10^{-5}$ М ощутимый вклад вносят фторидные комплексы алюминия AlF^{2+} и AlF_2^+. На основе разработанного подхода возможно изучить, кроме исходного состава смеси, влияние других факторов влияющих на распределение и концентрации растворимых и нерастворимых частиц алюминия в водных системах, как например температура и корректный выбор используемых констант равновесия.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПРОСТРАНСТВЕННО ОДНОРОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ (N-P-Z-D) ПЛАНКТОННОЙ ПИЩЕВОЙ ЦЕПИ

Подгорный К.А.

Учреждение Российской Академии наук ИБВВ им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок, Россия
kap@ibiw.yaroslavl.ru

Аннотация: рассматриваются наиболее важные свойства четырехкомпонентной N-P-Z-D-модели планктонной пищевой цепи, в которой используется нелинейная зависимость при описании процесса минерализации детрита, а также учтено отрицательное влияние метаболитов фитопланктона на развитие зоопланктона. В модели учтено также, что существуют определенные пищевые предпочтения в питании зоопланктона: он может питаться не только фитопланктоном, но и детритом.

Цель данной работы состояла в аналитическом и численном 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). Наше исследование, прежде всего, будет касаться изучения наиболее важных свойств модели в зависимости от изменений порядка ферментативной реакции, которая описывает разложение детрита, а также скорости выделения метаболитов клетками фитопланктона. Ранее в работе (Подгорный, 2009) исследовался более простой вариант модели, в котором предполагалось, что зоопланктон может потреблять только фитопланктон. В данной работе будет рассматриваться более реалистичный вариант модели, который учитывает то, что зоопланктон на самом деле может питаться не только фитопланктоном, но и детритом. 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 и этого фактора на характер динамики модельной системы.

Модель представляет собой систему четырех обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dN}{dt} = -\dfrac{N}{e+N}\cdot\dfrac{aP}{b+cP} + \beta\lambda\dfrac{(P+\omega D)}{\mu+P+\omega D}Z + \gamma qZ + \varphi D^{\delta} + k(N_0 - N), \\ \dfrac{dP}{dt} = \dfrac{N}{e+N}\cdot\dfrac{aP}{b+cP} - rP - \lambda\dfrac{P}{\mu+P+\omega D}Z - (s+k)P, \\ \dfrac{dZ}{dt} = \alpha\lambda\dfrac{(P+\omega D)}{\mu+P+\omega D}Z - qZ - \theta PZ, \\ \dfrac{dD}{dt} = rP + \lambda\dfrac{((1-\alpha-\beta)P - (\alpha+\beta)\omega D)}{\mu+P+\omega D}Z - \varphi D^{\delta} - (\psi+k)D, \end{cases} \tag{1}$$

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. Параметры модели неотрицательны, причем $\alpha + \beta \le 1$, $\gamma \le 1$ и $r + s + k < a/b$. Последнее условие означает, что фитопланктон не вымирает полностью при очень низкой концентрации биогенных элементов. Пищевые предпочтения зоопланктона учитываются в новом варианте модели с помощью параметра $\omega = p_2/p_1$, где p_1 и p_2 - коэффициенты предпочтения зоопланктоном фитопланктона и детрита соответственно. Включение в модель дополнительного источника питания для зоопланктона добавляет в модель всего один новый параметр ω - коэффициент предпочтения детрита зоопланктоном. Если $\omega = 0$, то это означает, что $p_2 = 0$, $p_1 \ne 0$, то есть зоопланктон не питается детритом, а источником пищи для него является только фитопланктон. В этом случае мы получаем модель, рассмотренную ранее в работе (Подгорный, 2009). В природных экосистемах значение параметра ω, по всей видимости, близко к 0,5. В модельных исследованиях используют значения $\omega \in [0;2]$ (Popova et al., 1997).

Численные эксперименты с моделью (1) проводились методом Рунге-Кутта-4. Значения параметров модели выбраны на основе литературных данных (Долгоносов, 2009; Edwards, 2001; Popova et al., 1997) Нами были приняты следующие значения параметров: $e = 0{,}03$ гС/м^3; $a = 0{,}2$ (м сут)$^{-1}$; $b = 0{,}2$ м$^{-1}$; $c = 0{,}4$ м^2/гС; $r = 0{,}15$ сут$^{-1}$; $\beta = 0{,}33$; $\lambda = 0{,}6$ сут$^{-1}$; $\mu = 0{,}035$ гС/м^3; $\gamma = 0{,}5$; $q = 0{,}1$ сут$^{-1}$; $k = 0{,}05$ сут$^{-1}$; $N_0 = 0{,}4$ гС/м^3; $s = 0{,}04$ сут$^{-1}$; $\alpha = 0{,}25$; $\theta \in [0{,}0;0{,}3]$ м^3/(гС сут); $\varphi = 0{,}1$ сут$^{-1}$; $\delta \in [0{,}5;1{,}2]$; $\psi = 0{,}08$ сут$^{-1}$, $\omega \in [0;2]$.

Для системы уравнений (1), возможны следующие стационарные состояния: $E_0 = (N_0, 0, 0, 0)$, $E_1 = (N_1, P_1, 0, D_1)$, $E_2 = (N_2, P_2, Z_2, D_2)$. Аналитическое исследование модели показало, что каждое них является единственными. Для обеспечения их устойчивости необходимо соблюдение определенных условий.

Путем численных экспериментов было показано, что все возможные типы динамического поведения модели (1) происходят в определенных пределах изменения параметра θ - от нулевого его значения до некоторой критической величины $\theta^* = f(\omega, \delta)$. При $\theta \ge \theta^*$ во всех случаях происходит вымирание зоопланктона. Если возрастает пищевое предпочтение детрита зоопланктоном, то при снижении скорости минерализации детрита может снижаться и скорость пополнения пула биогенных элементов. А это, в свою очередь, приводит к снижению концентрации фитопланктона. В этом случае он может получить преимущества для своего развития путем увеличения скорости выделения метаболитов и подавления развития зоопланктонных организмов. Установлено также, что при изменении параметра θ имеет место определенная последовательность перестройки фазовых портретов системы (1). Показано, что существует такая область изменения параметра θ, в пределах которой наблюдаются сменяющие друг друга периодические и хаотические колебания. Выявлена сложная нелинейная зависимость ширины этой зоны от коэффициента предпочтения детрита зоопланктоном ω и порядка ферментативной реакции δ. Это свидетельствуют о том, что существуют такие области изменения параметров, для которых имеет место высокая чувствительность планктонной системы к разнообразным по своей природе внешним воздействиям и внутренним флуктуациям компонентов модели.

Литература

Долгоносов Б.М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов / Отв. редактор М.Г. Хубларян. Предисловие Г.Г. Малинецкого. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 440 с.

Подгорный К.А. Четырехкомпонентная (N-P-Z-D) модель планктонной пищевой цепи // Материалы Национальной конференции с международным участием «Математическое моделирование в экологии» (1 – 5 июня 2009 г., г. Пущино). – Пущино, ИФХ и БПП РАН, 2009, с. 209 – 210.

Edwards A.M. Adding detritus to a nutrient - phytoplankton - zooplankton model: a dynamical-systems approach // J. Plankton Res., 2001, V. 23, N. 4, P. 389 - 413.
Popova E.E., Fasham M.J.R., Osipov A.V., Ryabchenko V.A. Chaotic behaviour of an ocean ecosystem model under seasonal external forcing // J. Plankton Res., 1997, v.19, p. 1495 – 1515.

ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНЕМНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ БАЛАНСОВ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ЭКОСИСТЕМЕ НЕВСКОЙ ГУБЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА (ПО ДАННЫМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

Подгорный К.А.

Учреждение Российской Академии наук ИБВВ им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок, Россия
kap@ibiw.yaroslavl.ru

Аннотация: с помощью имитационной математической модели проведено исследование среднемноголетней динамики балансов БВ, определены наиболее характерные особенности формирования запасов форм азота и фосфора в Невской губе Финского залива за счет естественного круговорота, а также за счет антропогенной нагрузки.

Цель данной работы состояла в том, чтобы путем проведения численных экспериментов исследовать наиболее важные закономерности формирования запасов и среднемноголетней динамики форм азота и фосфора в Невской губе Финского залива за счет естественного круговорота, а также за счет антропогенной нагрузки. Биохимический блок имитационной модели включает в себя описание совместной трансформации форм N и P (важнейших для экосистемы Невской губы биогенных элементов), поступающих в эту акваторию со сточными водами и речным стоком (Подгорный, 2003, 2009; Подгорный, Леонов, 2011). Модель включает в себя весь известный спектр БВ указанных элементов, а также основных представителей сообщества микроорганизмов, обитающих в водной среде и участвующих в трансформации форм N и P в естественных условиях. В модели рассматривается 17 переменных состояния водной среды: концентрации растворенных фракций органического N (DON) и P (DOP); минеральных форм P (DIP) и N – аммония $\left(NH_4^+\right)$, нитритов $\left(NO_2^-\right)$ и нитратов $\left(NO_3^-\right)$; взвешенных форм N и P – в составе детрита (ND и PD); биомасс гидробионтов – гетеротрофного бактериопланктона (BN и BP), фитопланктона (FN и FP), простейших (PRN и PRP) и зоопланктона (ZN и ZP), а также концентрация растворенного в воде O_2. Структура взаимодействия этих переменных показана схематично на рисунке 1. Оно осуществляется в естественных условиях под совместным влиянием как природных, так и антропогенных факторов.

В результате обработки данных моделирования было показано, что среднемноголетний внешний приток BN с мая по октябрь изменялся в пределах 220-245 т/мес, PhN – 59-294 т/мес, PrN – 13,6-73,2 т/мес, ZoN – 2,4-12,7 т/мес, ND – 920-1035 т/мес, DON – 1181-2539 т/мес, NH_4^+ – 441-627 т/мес, NO_3^- – 972-1510 т/мес, NO_2^- – 22-37 т/мес. Таким образом, установлено, что во внешнем притоке в Невскую губу основной вклад в структуре баланса азота вносят DON, ND и NO_3^-. На долю этих трех составляющих баланса приходится в среднем 80 % внешнего притока всех азотсодержащих биогенных веществ.

Среднемноголетний вынос BN из экосистемы Невской губы в восточную часть Финского залива с мая по октябрь изменялся в пределах 135-198 т/мес, PhN – 83-429 т/мес, PrN – 7,2-94,4 т/мес, ZoN – 4,5-21 т/мес, ND – 1131-1358 т/мес, DON – 1221-2510 т/мес, NH_4^+ – 471-579 т/мес, NO_3^- – 957-1524 т/мес, NO_2^- – 39,4-56,4 т/мес. Таким образом, показано, что основной вклад в структуре баланса азота во внешнем притоке в восточную часть Финского залива по-прежнему вносят DON, ND и NO_3^-. На долю этих трех составляющих баланса

приходится в среднем 82 % выноса всех азотсодержащих биогенных веществ за пределы акватории Невской губы.

а б

Рисунок. 1. Структура циклов N (а) и P (б) биогидрохимического блока имитационной модели Невской губы Финского залива

Установлено, что содержание DON и NO_3^- в Невской губе определяется, главным образом, внешним притоком DON и NO_3^- в экосистему губы и выносом данных биогенных веществ в восточную часть Финского залива. Содержание ND в Невской губе формируется, в основном, за счет внешнего притока ND в экосистему Невской губы и его выноса в восточную часть Финского залива, в результате процессов трансформации ND в DON, смертности бактерий и фитопланктона. Роль всех остальных потоков значительно меньше.

Показано, что среднемноголетний внешний приток BP с мая по октябрь изменялся в пределах 22,3-24,3 т/мес, PhP – 5,9-29,4 т/мес, PrP – 1,4-7,3 т/мес, ZoP – 0,24-1,27 т/мес, PD – 92-103,5 т/мес, DOP – 22,8-36,0 т/мес, DIP – 12,1-35,1 т/мес. Таким образом, установлено, что основной вклад в структуре баланса фосфора во внешнем притоке в Невскую губу вносят PD, DOP и DIP. На долю этих трех составляющих фосфорного баланса приходится в среднем от 74 до 81 % внешнего притока всех фосфорсодержащих биогенных веществ.

Среднемноголетний вынос из экосистемы Невской губы в восточную часть Финского залива BP с мая по октябрь изменялся в пределах 14,4-27,5 т/мес, PhP – 8,3-40,5 т/мес, PrP – 0,69-9,4 т/мес, ZoP – 0,42-2,07 т/мес, PD – 104,8-126,1 т/мес, DOP – 17,8-42,3 т/мес, DIP – 28,4-53,1 т/мес, Таким образом, основной вклад в структуре баланса фосфора во внешнем притоке в восточную часть Финского залива по-прежнему вносят PD, DOP и DIP. На долю этих трех составляющих фосфорного баланса приходится в среднем от 74 до 86 % общего выноса в Финский залив фосфорсодержащих биогенных веществ.

Структура баланса DOP в экосистеме Невской губы формируется, в основном, за счет внешнего притока DOP в экосистему и выноса его в восточную часть Финского залива, процесса трансформации PD в DOP, потребления DOP бактериями. Основа баланса DIP в экосистеме Невской губы формируется, в основном, за счет внешнего притока DIP в экосистему и выноса его в восточную часть Финского залива, а также за счет метаболических выделений бактерий. Структура баланса PD в экосистеме Невской губы определяется, в основном, внешним притоком PD в экосистему и выносом его в восточную часть Финского залива, процессом трансформации PD в DOP, увеличением PD за счет смертности бактерий и потреблением PD бактериями. Вклад всех остальных потоков существенно меньше, особенно в мае и сентябре-октябре.

Литература

Подгорный К.А. Математическое моделирование пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов (алгоритмы и численные методы).- Рыбинск: Изд-во ОАО “Рыбинский Дом печати”, 2003.- 328 с.

Подгорный К.А. Пространственно- неоднородная имитационная модель экосистемы Невской губы Финского залива // Известия Самарского научного центра РАН.- 2009.- Т.- 11.- № 1 (7).- С. 1554–1558.

Подгорный К.А., Леонов А.В. Использование пространственно-неоднородной имитационной модели для изучения процессов трансформации соединений азота, фосфора и динамики кислорода в экосистеме Невской губы Финского залива. Водные ресурсы. 2011 (в печати).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ: А.А.ЛЯПУНОВ И СОВРЕМЕННОСТЬ[3]

Полуэктов Р.А.

Агрофизический Институт, Санкт-Петербург, Россия
r_poluektov@mail.ru

Аннотация: современный этап развития математической биологии насчитывает более, чем сорокалетнюю историю, хотя ее корни уходят к 1202 году. Понятие математической биологии принято соотносить к тем ее разделам, который занимается развитием динамической теории надорганизменных структур – популяций и биоценозов. В докладе выделяются основные этапы формирования теории, начиная с основополагающих работ А.А.Ляпунова до наших дней.

В книге Liber abacci, написанной в 1202 г., итальянский математик Фибоначчи, сформулировал задачу нахождения потомства от пары кроликов. Это первая известная нам динамическая модель популяции, обладающей возрастной структурой, в которой особи никогда не умирают и ежемесячно приносят постоянное потомство, начиная со второго месяца после своего рождения. Остается только удивляться тому, что следующий шаг в направлении развития модели возрастной структуры популяции – учет смертности особей – был сделан лишь в 1945 г.(Lesli P.H). И все же до второй половины 20-го века имелись лишь разрозненные попытки постановки и решения отдельных задач, относящихся к области моделирования популяций и биоценозов (Malthus, 1820; Ferhulst, 1838; Fisher, 1930; Volterra, 1931, Kostizin 1937). В конце 60-х годов выходят первые отечественные работы по математической теории популяций и биоценозов (Свирежев; Корзухин, Жаботинский; Базыкин, Гинзбург, Ратнер, Гильдерман, Кудрина, Полетаев). Их появление во многом стимулировалось распространением идей и методов новой тогда науки – кибернетики, а толчком послужила публикация монографии И.А.Полетаева «Сигнал». Однако главным событием, которое стимулировало взрыв исследований по математической биологии, явились летние молодежные школы, проводившиеся в течение ряда лет в Подмосковье под руководством знаменитого биолога Николая Владимировича Тимофеева-Ресовского и чл.-корр. АН СССР кибернетика и математика Алексея Андреевич Ляпунова. Первые две школы (1967 и 1968 гг.) проводились в Можайском и Аксакове (под Москвой), а затем несколько раз в Звенигороде и далее они плавно переехали в Пущино-на-Оке. Влияние этих выдающихся ученых на развитие математической биологии невозможно переоценить. Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский, будучи ученым-энциклопедистом, так формулировал биологическую проблему, что она оказывалась совершенно готовой к математической алгоритмизации. А Алексей Андреевич Ляпунов в момент становления кибернетики как науки внес решающий вклад в такие ее разделы как теория программирования, математическая лингвистика и математическая биология. Издававшийся А.А.Ляпуновым журнал «Проблемы кибернетики» был единственным изданием, в котором тогда публиковались работы по этим направлениям.

[3] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 04-05-00415

Определенную роль в формировании математической биологии как науки сыграла и специальная школа, получившая название «Математические методы в теории популяций и ценозов» (Р.А.Полуэктов, Ю.М.Свирежев, В.А.Ратнер). Заседания школы приходили поочередно в Ленинграде и его окрестностях, и в Новосибирском Академгородке. В результате оперативного обмена информацией и обсуждения новых результатов была сформулирована концепция и, в последующие годы, развита современная динамическая теория биологических популяций и сообществ, которая к концу 80-х гг. оформилась в самостоятельную дисциплину. Отдельно следует сказать о популяционно-генетических моделях. В периодических встречах автора с А.А.Ляпуновым последний обращал внимание на то, что все разрабатываемые модели носят детерминированный характер. Вместе с тем гаметогенез, скрещивание и образование зигот, выживаемость и тех и других, несомненно, носят случайный характер. Это ставило под сомнение все полученные результаты. Замечания А.А.Ляпунова стимулировали постановку специального исследования, посвященного изучению влияния случайных событий на все этапы генетического оператора. Блестящую работу в этом направлении выполнил сотрудник Агрофизического института И.А.Вол (Вол, 1974). Это исследование явилось предметом его кандидатской диссертации и, к сожалению, до сих пор является недоступным большинству исследователей.

Помимо теории ставились и решались прикладные задачи – управление искусственным культивированием клеточных и микробных популяций, демографические проблемы роста народонаселения, распространение эпидемий, динамика вредителей сельского и лесного хозяйства, динамика лесных насаждений и сельскохозяйственных посевов. Следует сделать несколько замечаний о задачах управления популяциями и сообществами. Проблема заключается в том, что управления в данном случае (так же как и фазовые переменные) носят односторонний характер, что совершенно не свойственно классическим постановкам задач управления. Действительно, собирая урожай (укосы), мы можем только изымать биомассу и особей из популяции, но не добавлять их. Внося удобрения или поливая растения, мы только добавляем агент управления в систему, но не можем извлечь его обратно. Сами переменные (численность особей, их биомасса) также неотрицательны. Это вносит определенные трудности в решение задачи. Даже в линейном случае классические условия управляемости и наблюдаемости Р.Калмана являются только необходимыми, но недостаточными. Не с этим ли связаны все неудачи в создании эффективного метода борьбы с раковыми заболеваниями? Ряд необходимых и достаточных условий управляемости и наблюдаемости при культивировании популяций в хемостатах получил Б.Г.Заславский (Заславский и др., 1988). Однако, они не получили своего дальнейшего развития.

На западе формирование математической биологии во многом повторяло тот путь, который она прошла в нашей стране, иногда с опережением, а иногда с отставанием. В частности, результаты, опубликованные в нашей монографии «Динамическая теория биологических популяций» в 1976 году до сих пор известны только выходцам из нашей страны. Развитие исследований пошло несколько по иному пути. Была сформулирована концепция т.н. «метапопуляций». И хотя она появилась еще в 1970 году как “population of populations” (R. Levins), ее фактическое становление стало возможным лишь недавно. Последнее обусловлено появлением возможности оперировать с пространственно распределенными данными, используя ГИС-технологи (L.Ginsburg). И еще одно направление современного этапа математической биологии - обоснование фундаментальных законов экологии на основе ее параллелей с классической ньютоновской механикой. Это направление, начатое Л.Р. Гинзбургом еще в годы его работы в АФИ в 70-е годы 20-го века, нашло в последнее время свою законченную формулировку (Ginzburg, 2004).

Литература

Вол И.А. Стохастическая устойчивость и надежность биологических популяций: Дис. канд. техн. наук.– Л.: АФИ, 1974.- 131с.
Заславский Б.Г., Полуэктов Р.А. Управление экологическими системами.– М.: Наука, 1988.– 295 с.
Ginzburg L., Colvan M. Ecological Orbits: How Planets Move and Populations Grow.– Oxford Univ. Press, 2004.- 166 p.

ПРОБЛЕМЫ СЕМАНТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ "УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ" И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Пузаченко Ю.Г.

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН, Москва
puzak@orc.ru, jpuzak@mail.ru

Аннотация: формирование концепции «устойчивого развития» рассматривается с позиции максимума производства энтропии. Постулируется необходимость формирования нового метаязыка, обобщающего представления современной термодинамики и синергетики.

Само по себе возникновение, становление и развитие концепции «устойчивого развития» (Sustainable Development) можно рассматривать как пример сложного адаптивного поведения социума, ставящего перед собой естественную цель самосохранения на неопределенно большом интервале времени. Исторически ее возникновение было определено осознанием через слушания в разных странах комиссией Brundtland, начавшей работать в рамках мировой стратегии сохранения среды 1972-1980 г, неразрывности социума, экономики и среды. Широкая поддержка этой идеи международными институтами определила мощный поток как общих работ, направленных на разработку оснований концепции, так и частных, ориентированных на разработку методов достижения желаемой цели. Уровень шума в этом потоке информации, как и во всех сферах международной активности, очень высок и в подавляющем большинстве случаев поиск решений носит стохастический характер. Из этого потока можно выделить фактически одно конструктивное представление о капитале и его емкости и/или пропускной способности (carrying capacity). Это понятие было распространено из финансовой сферы на промышленность, инфраструктуру, человека, природу. Устойчивое развитие должно строиться на основе приращения того, что необходимо для роста благосостояния, без деградации основного капитала. Понятие удобно, так как на основе простой логистической модели обеспечивает принципиальную измеримость емкости капитала и его приращения как показателя роста благосостояния. С другой стороны «емкость» должна подчиняться закону пропускной способности канала связи Шеннона и закону необходимого разнообразия Эшби. Если первый подход фрагментарно использовался в некоторых моделях новой экономики, то второй, информационный, в явном виде вообще не нашел какого-либо применения. При этом Cobb–Douglas функция, определяющая в частности мультипликативную форму вклада капиталов в конечную продукцию производственной деятельности, как и любые подобные аллометрические соотношения, есть прямой аналог пропускной способности канала связи. Можно утверждать, что все остальное сотворенное в процессе разработки темы и в том числе многочисленные индексы, носят чисто эмпирический характер и мало связаны с общей теорией систем. Широко разрекламированный экосистемный подход в силу его всеобъемлющего характера просто не реализуем. Несколько более конструктивна, заменяющая его концепция экосистемных услуг, но и она весьма неопределенна и сталкивается с традиционной проблемой соизмеримости. Не менее неопределенно и не измеримо «благосостояние (well-being)», которое, по крайней мере, не является

пространственно-временной константой и не может определять цель развития. В соответствие с модой времени, конечно, все принимают, что речь идет о диссипативных, открытых нелинейных синергетических системах, но вытекающие из этих представлений следствия рассматриваются в основном на уровне частных моделей конкретных систем.

Так обращение ко второму закону термодинамики в его классической форме в принципе исключает «устойчивое развитие» на неограниченном интервале времени. Оно возможно на некотором интервале времени только при минимизации производства энтропии. Солнечная система по условию излучает в единицу времени конечное количество энергии, что формально должно определять предел роста разнообразия не только человека, но и биосферы.

Вместе с тем биосфера и человек как биологический вид существуют и устойчиво развиваются на достаточно больших интервалах времени и де-факто, несмотря на периодические кризисы, реализуют устойчивое развитие с гипергеометрическим увеличением разнообразия. (Пузаченко, 2004). При этом в ходе саморазвития уменьшается собственное время, но ограничения роста разнообразия не просматривается. Таким образом, эмпирическим фактом является автохтонное устойчивое развитие биосферы и популяции человека, не лимитируемое какими-либо ресурсами. Циклы автоколебания на фоне этой общей тенденции по смыслу напоминают циклы Холлинга. Формально же второе начало термодинамики определяет «свалку» растущей энтропии в среду и исключает гипергеометрический рост в результате ожидаемого самоингибирования.

Создается впечатление, что необходимо преобразовать аксиоматическую систему и перейти на более высокий уровень метаязыка, способного охватить физические, биологические, социально-экономические и познавательные формы действий, переходы глобальной системы и ее отдельных частей в различные фазовые состояния на общем тренде саморазвития. Очевидно, что это направление широко представлено в современной литературе. Общей его чертой является введение для макроскопического описания в термодинамическую модель информации, в ее соотношении с энтропией. Наиболее общую систему представлений энтропии-информации, по-видимому, дал А.М. Хазен (1998-2000). В его модели принцип максимума производства энтропии перестает быть ограничением для эволюции системы и, напротив, становится ее необходимым условием. Исходные положения можно свести к утверждению «все что наблюдаемо – то устойчиво в смысле Ляпунова на некотором интервале длительности». Естественной «целью», а точнее естественным поведением будет максимизация длительности – локальной стационарности с минимум производства энтропии.

Следствием теории является принципиальная возможность устойчивого развития, но основе синтеза новой информации, то есть новых знаний, синтеза семантической информации и тем самым увеличения потока свободной энергии. Принципиальная возможность, конечно, не определяет необходимость и модель предсказывает некоторые источники проблем, представление о которых снижает риск перехода в область вырожденного равновесия.

Сама концепция «устойчивого развития» эволюционирует в соответствие с моделью: возникновение новых понятий, максимум производства энтропии (или шума) в форме огромного количества статей, популярных очерков, монографий, рабочих и руководящих документов от бесчисленных воркшопов и симпозиумов, появление локально стационарных конструкций призванных уменьшить производство энтропии (индексы OECD, моделей потепления климата в результате антропогенной деятельности и т.п.), верификация их на основе новой независимой системы измерения и в результате, потеря их локальной устойчивости и т.д. Объем информации-энтропии, производимой в каждой сфере человеческой деятельности теоретически исключает прямую и сколь-либо полную аккумуляцию ее в памяти любого субъекта. «Сухой остаток» выделяется из этого шума, переходит в систему управления как локально устойчивая часть дискурса, и через некоторое

время исчезает или преобразуется в свой более продвинутый аналог. Те же процессы протекает во всех сферах человеческой деятельности и в ее отношении с природой. Регулирование сверху на основе директивных действий, опирающихся на модели прошлой стабильности не только теоретически невозможно, но и опасно. Остановить производство энтропии невозможно. Локальная стабильность может достигаться только на основе новых конструкций, приспособленных к интенсивным потокам энтропии-информации. Содействовать этому должно становление метаязыка, обеспечивающего развитие алгоритмов локальной минимизации производства энтропии как выбора относительно устойчивых траекторий движения в многомерном расширяющемся фазовом пространстве. Выработать это язык, сделать его дериваты адекватными для некоторого временного интервала эволюции - традиционная задача науки. Как и на протяжении всей сознательной истории человечества, этот язык должен содержать и формальные логико-математические формы и категории мировоззрения.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ БИОСФЕРЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СО СПУТНИКА MODIS

Пузаченко Ю.Г.[1], Сандлерский Р.Б.[2]

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия
[1]jpuzak@mail.ru, [2]srobert_landy@mail.ru

Аннотация: демонстрируются оценки термодинамических переменных, включая эксергию и приращение информации на основе спутника Modis Terra. Показана ведущая роль лесной растительности в функционировании биосферы.

Рассматриваются результаты анализа мультиспектральных измерений сезонного варьирования (два измерения за месяц) отраженной солнечной радиации спутником Modis Terra 2002 г. с разрешением 0.5^o. Оценивается поглощенная радиация (R), информация Кульбака (I), энтропия (S), эксергия (Ex), по схеме предложенной Ергенсоном и Свирежевым (2004) и тепловой поток (T) от земной поверхности по данным проекта Land Surfase Temperature/Emissivity Modis Terra за тот же год. Внутренняя энергия оценивается через замыкание уравнения баланса.

Каналы спутника захватывают 16.58% энергии солнечной постоянной. В среднем для биосферы эффективность поглощения энергии η_R = 0.654, эксергии η_{Ex} = 0.437, S = 1.74 nit, I = 0.176 nit. Результаты измерений позволяют выделить четыре фазовых состояния биосферы: три равновесных состояния с информацией Кульбака меньше 0.14 nit и одно неравновесное. Равновесные состояния: поверхность, покрытая снегом: I = 0.041 nit, минимум S = 1.07 nit, минимальные Ex = 6.10 вт/м^2 и T = -9.77^{o}C; аридные земли: I = 0.131 nit, S = 2.05 nit, Ex на среднем уровне – 90.52 вт/м^2, максимальная T = 38.66^{o}C; леса умеренных широт зимой: I = 0.038 nit, S = 2.10 nit, Ex = 18.57 вт/м^2, T = -2.033^{0}C. Тропические леса в течение всего года и леса умеренных широт в летний период неравновесны и имеют максимальные I = 0.498 nit и Ex = 137.11 вт/м^2, низкую S = 1.54 nit и T = 31.986^{o}C. Области вечных снегов, пустыни и тропические леса в течении всего года находятся в одном фазовом состоянии. Сезонные изменения термодинамических переменных здесь незначительны и их изменения во времени равновесны. В первой области они связаны с перекристаллизацией снега, во второй с сезонным изменением увлажнения: чем больше увлажнение, тем больше эксергия и ниже энтропия. В лесах умеренных широт фазовый переход резкий. Таким образом, основную полезную работу в биосфере, выражающуюся в интенсификации круговорота влаги и биогенных элементов, осуществляют леса. Область их наибольшей активности совпадает с максимумом приращения информации – рисунок 1.

Из рисунков следует, что зимой северного полушария широтный градиент между полушариями очень велик. Следовательно, из южного полушария в северное должен осуществляться интенсивный транспорт скрытого тепла (циркуляция Бревера-Добсона), что в частности может приводить к очень высокой энтропии зимой в лесах северного полушария. Летом градиент между полушариями существенно меньше и реализуется циркуляция Хэдли-Феррела. Через долю эксергии в каждой ячейке в каждый момент времени от ее суммы за год можно оценить параметры системы, ответственные за горизонтальные переносы. Соответствующее приращение информации для всего массива данных составляет I = 0.083 nit и эффективности эксергии для пространственно-временного транспорта воздушных масс η_{Ex}= 0.315. Приращение информации для декабря I = 0.104 nit при η_{Ex} = 0.427 и для июля I = 0.439 nit при η_{Ex}= 0.631. Таким образом, в целом за год система почти равновесна и существенно неравновесна летом северного полушария, что определяется диспропорцией в площади суши и большим вкладом в полезную работу лесных экосистем умеренных широт.

Рисунок. 1. Приращение информации (светлые тона – максимум приращения информации)

Эксергия нелинейно связана с солнечной постоянной (Eint): $Ex/dEin_t$ = 0.0318exp(0.0036Eint) и в тропических широтах приращение эксергии на 1 вт/м^2 солнечной постоянной составляет 4.358 вт/м^2. Можно полагать, что увеличение солнечной постоянной будет увеличивать поток скрытого тепла из южного в северное полушарие и приводить к более теплым зимам с более ранней весной и общим потеплением климата. При этом тепловой поток в интенсивно испаряющих дождевых лесах может даже снижаться.

Рисунок 2. Соотношение альбедо и энтропии (а) – по Modis, (б) – по модели на основе данных ERBE (Stephens, O'Brien, 1993)

Сопоставление результатов оценки потока энтропии по модели «тепловой машины» с оценками, полученными по спутнику, показывает их полное несоответствие. При этом уравнение баланса, построенное на основе спутниковых данных, при независимом измерении энтропии, эксергии и теплового потока статистически достоверно замыкается. Более сходные результаты дают измерения длинноволновой и коротковолновой радиации

осуществленные со спутников по проекту Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) 1986 – 1990 (Stephens, O'Brien, 1993). На рисунке 2 приведено соотношение теоретической модели потока энтропии (б), полученной на основе данных ERBE, с результатами измерения по Modis (а). Если исключить влияние работающей растительности с резким увеличением информации, то соотношение между альбедо и энтропией в этих оценках подобно. Полезная работа лесной растительности, увеличивая неравновесность, снижает производство энтропии. Формально это указывает на то, что лесная растительность неравновесна и стационарна. В этом отношении особый интерес представляет лесная растительность умеренных широт, испытывающая резкий фазовый переход от равновесия с очень большим производством энтропии к стационарному состоянию с минимум энтропии. В приведенные результаты демонстрируют большие возможности мультиспектральной дистанционной информации для анализа термодинамики поверхности земли.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 09-05-00292-а.

Литература

Jorgensen S.E., Svirezhev Y.M. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems.- Langford Lane Kidlington. Oxford. Elsevier, 2004.- 369 p.

Stephens G.L., O'Brien D.M. Entropy and climate. I: ERBE observations of the entropy production of the earth // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society .-Vol. 119, Issue 509, 1993.- P. 121–152.

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОЛОВОЙ СТРУКТУРЫ НА ДИНАМИКУ ЧИСЛЕННОСТИ ПОПУЛЯЦИИ

Ревуцкая О.Л., Фрисман Е.Я.

ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан, Россия
oksana-rev@mail.ru, frisman@mail.ru

Аннотация: исследуется многокомпонентная модель динамики численности популяции, состоящей из новорожденных особей, неполовозрелых особей обоего пола, также самок и самцов, участвующих в размножении. В модели учитываются плотностно зависимые эффекты, действующие на выживаемость младшего возрастного класса. Проведено исследование структуры популяции в равновесном состоянии. Изучаются сценарии перехода к нелинейным режимам динамики.

Описание модели

Рассматривается динамика численности популяции, которая может быть представлена совокупностью пять групп: новорожденные особи (количество самок и самцов равны между собой), неполовозрелые особи обоего пола и половозрелые самки и самцы, участвующие в размножении. Обозначим n – номер сезона размножения; p – численность новорожденных особей в младшем возрастном классе; f, m - численности неполовозрелых самок и самцов; F, M - численности самок и самцов, участвующих в размножении. Предлагаемая модель может быть записана системой рекуррентных уравнений

$$\begin{cases} p_{n+1} = r \cdot F_n \\ f_{n+1} = \delta w_1 p_n + s_1 f_n \\ m_{n+1} = (1-\delta) w_2 p_n + v_1 m_n \\ F_{n+1} = g_1 f_n + s_2 F_n \\ M_{n+1} = g_2 m_n + v_2 M_n \end{cases} \qquad (1)$$

где r – коэффициент рождаемости, δ – доля самок среди новорожденных, w_1 и w_2 - выживаемости неполовозрелых особей, пополнивших часть годовалых и старше самок и самцов, s_1 и v_1 - выживаемости неполовозрелых самок и самцов, g_1 и g_2 - выживаемости

самок и самцов, перешедших в репродуктивную группу, s_2 и v_2 - выживаемости половозрелых самок и самцов, соответственно.

Предполагается, что количество новорожденных особей зависит от соотношения численностей половозрелых самок и самцов в популяции в год n, поэтому рождаемость r выбирается в виде функции

$$r_n = \frac{aM_n}{hF_n + M_n},$$

где a - произведение максимально возможного числа потомков, приходящихся на одну оплодотворенную самку, и доли рожающих самок от общего числа оплодотворенных, h- это такое соотношение самцов и самок в популяции, при котором оплодотворенными оказываются ровно половина самок. Предполагается, что выживаемости самок и самцов на первом году жизни линейно зависят от численности младшего возрастного класса

$$w_1=1-\beta_1 p,\ w_2=1-\beta_2 p,$$

где β_1 и β_2 - коэффициенты, описывающие интенсивность внутрипопуляционной конкуренции. Будем считать, что рождается равное количество самок и самцов (δ = 0,5), выживаемости самок и самцов, ежегодно пополняющих часть неполовозрелых особей, равны ($w_1 = w_2$, $\beta_1 = \beta_2$).

Замена переменных позволяет избавиться от параметра β_2, и с учетом сделанных предположений записать модель (1) в новых переменных - «относительных» численностях

$$\begin{cases} p_{n+1} = F_n \dfrac{aM_n}{hF_n + M_n} \\ f_{n+1} = 0.5(1-p_n)p_n + s_1 f_n \\ m_{n+1} = 0.5(1-p_n)p_n + v_1 m_n \\ F_{n+1} = g_1 f_n + s_2 F_n \\ M_{n+1} = g_2 m_n + v_2 M_n \end{cases} \qquad (2)$$

Результаты исследования модели

Было проведено исследование структуры популяции в стационарном состоянии. Определены равновесные решения модели (2) и условия их существования.

Исследованы сценарии переходов динамических режимов при изменении параметров системы. Установлено, что потеря устойчивости может произойти только при комплексно-сопряженных корнях характеристического уравнения, модуль которых проходит через 1. В результате возникают квазипериодические колебания, которые при изменении параметров системы приобретают хаотический характер.

Показано, что увеличение репродуктивного потенциала a приводит к потере устойчивости равновесного решения системы и появлению квазипериодических колебаний.

Более детально бифуркационные переходы можно проследить по портретам аттракторов в фазовом пространстве системы (рисунок 1). Так, например, при переходе параметра a через бифуркационное значение в системе начинаются колебания, а в фазовом пространстве возникает предельная замкнутая инвариантная кривая, которая при дальнейшем увеличении репродуктивного потенциала деформируется (рисунок 1 *а*), «удваивает период» (рисунок 1 *б*), а потом разрушается с образованием сложно структурированного аттрактора (рисунок 1 *в*).

а) a = 13.4 *б)* a = 13.5 *в)* a = 14.23

Рисунок 1. Предельные траектории системы (2) в пространстве (p, f, F) при s_1 = 0.3, v_1= 0.5, g_1 = 0.3, g_2 = 0.2, s_2 = 0.3, v_2 =0,6, h = 0.01

Исследуется качественное изменение динамического поведения популяции в зависимости от уровня различий характеристик полов, определяющих процессы выживания и воспроизводства. Показано, что увеличение коэффициентов плодовитости и выживаемости в экологически лимитированных популяциях может приводить к потере устойчивости и возникновению сложных аттракторов. Выявлена возможность появления хаотических режимов динамики численности при росте половых потенций самцов (например, при переходе к полигамному характеру размножения) и при уменьшении доли самцов, необходимой для успешного воспроизводства.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 09-04-00146-а, № 11-01-98512-р_восток_а) и ДВО РАН (проект № 11-III-B-01M-002).

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АГРОЛЕСОЛАНДШАФТОВ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЕ

Рулев А.С., Юферев В.Г., Юферев М.В.

ГНУ ВНИАЛМИ Россельхозакадемии, г. Волгоград, Россия
vnialmi_olp@vlpost.ru

Аннотация: в статье рассмотрены вопросы моделирования в среде агролесомелиоративной геоинформационной системы (ГИС), которое обеспечивает решение научных и прикладных задач, связанных с инвентаризацией, анализом, прогнозированием деградационных процессов, а также территориальную организацию и управление ландшафтами.

В последнее время определилась задача моделирования ландшафтов с использованием ГИС, состав и структура которой определяются как объектами (агролесоландшафтами и их компонентами), так и процессами, происходящими в них (смыв почв, дефляция, деградация растительности и т. д.). Применение космоснимков в агролесомелиоративных исследованиях обусловлено совокупностью информации об исследуемом ландшафте.

Использование в исследованиях таких программных продуктов, как ENVI, MapInfo, Surfer, "Талка", OzExplorer и др. позволяет решать задачи, связанные с обработкой и анализом космоснимков, построением цифровых моделей рельефа (ЦМР) и ландшафта (ЦМЛ).

В совокупном объеме данных, определяемых как цифровая модель ландшафта, следует различать три составные части: топологическую, геометрическую и атрибутивную. Большое внимание при моделировании в среде ГИС отводится геокодированию – привязке

объектов к цифровой карте территории, расположение которых в пространстве задается сведениями из таблиц баз данных. Эта информация может быть представлена координатами объектов, которые получены приемниками GPS или ГЛОНАСС, цифровыми адресами объектов и др.

Одной из функций большинства ГИС является создание трехмерных моделей поверхностей, под которой принято понимать средство цифрового представления трехмерных пространственных объектов. Источниками формирования таких моделей являются данные геодезической и топографической съемок местности, стереофотограмметрической обработки аэро- и космических снимков, действующих ГИС, радарного исследования рельефа SRTM, ASTER GDEM и систем глобального позиционирования.

При моделировании ландшафта особое внимание уделяется картам и аэрокосмическим материалам, как источникам достоверной информации о его компонентах, на момент их фиксации. К картографическим источникам относят аналоговые и цифровые топографические карты и планы.

Типовая технология создания цифровой модели рельефа, основанная на цифровании горизонталей, а также высотных отметок и других картографических элементов, используемых для отображения рельефа, устарела и требует больших затрат времени. Создание же современных ЦМР базируется на использовании матриц высот, которые доступны в геоинформационной среде в виде набора данных (GeoTIFF) радарного обследования поверхности земли зондом "ASTER, установленным на спутнике TERRA", и зондами "SIR-C" и "X-SAR", установленными на борту "Space Shuttle Endeavour".

Использование ЦМР обеспечивает расчет характеристик рельефа: значений углов склона, экспозиций и формы склонов, а также структурных элементов рельефа (линии тальвегов и водоразделов, килевые и гребневые, базисные и вершинные), что дает возможность моделирования линий поверхностного стока.

Использование современных компьютерных технологий в совокупности с космическими снимками исследуемой поверхности дает возможность на базе цифровой модели рельефа осуществить моделирование таких компонентов ландшафта как почва и растительный покров, а применение математических моделей ландшафтов, позволяет оценить динамику проходящих в них процессов. На рисунке 1 представлена цифровая модель эрозионного ландшафта с совмещением ЦМР и космического снимка.

Рисунок 1. Цифровая 3D модель эрозионного ландшафта ключевого участка

"Каменный", Волгоградская область

Моделирование в среде ГИС может применяться для решения различных задач агролесомелиоративного обустройства ландшафтов. Объектом информационного моделирования при этом является аграрный ландшафт с защитными лесными насаждениями.

Для решения задачи создания устойчивых агроландшафтов, особенно в жестких климатических условиях Юга России, модели создаются на основе достоверной информации о месте, времени и характере процессов деградации, полученных и статистически подтвержденных математических зависимостей с целью их прогнозирования и осуществления мониторинга состояния агролесоландшафтов. Применение ГИС дает возможность оценить взаимосвязи объектов, их взаиморасположение и взаимодействие, понять ситуацию в данном регионе, сделать правильный выбор прогнозной модели и, соответственно, оптимизировать принимаемые решения.

Подводя итог, следует отметить, агролесомелиоративное моделирование в среде ГИС, обеспечивает эффективное использование полученных моделей при решении научных и прикладных задач, связанных с инвентаризацией, анализом, прогнозированием и управлением агролесомелиоративной средой и территориальной организацией ландшафта.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 10-05-97000)

Литература

Рулев А. С. Ландшафтно-географический подход в агролесомелиорации.– Волгоград: ВНИАЛМИ, 2007.– 160 с.

Кулик К.Н., Юферев В.Г. Компьютерное математико-картографическое моделирование агролесоландшафтов на основе аэрокосмической информации. // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук.– 2010.- №1.– С. 52-54.

Рулев А. С., Юферев В. Г. Картографо-геоинформационное моделирование в агролесомелиорации / А.С. Рулев, В..Г. Юферев / Материалы Всероссийской конференции (с международным участием) «Математические модели и информационные технологии в сельскохозяйственной биологии: итоги и перспективы». 14–15 октября 2010 г., Санкт-Петербург. – СПб.: АФИ, 2010.- С. 68-71 (288) с.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Рулева О.В.

ГОУ ВПО Волгоградский филиал РГТЭУ, Волгоград, РФ
bifu@mail.ru

Дается оценка биологической продуктивности агрофитоценозов как интегрального показателя деятельности полезащитных лесных насаждений. Предлагается методологический подход на основе, которого сформулирован закон о роли лесной полосы как экологического фактора, определяющий развитие агроценозов по экспоненциальной зависимости. Практическая значимость работы — прогноз динамики биопродуктивности на экосистемном уровне.

В системе лесных полос межполосная клетка рассматривается нами как экосистема растительного сообщества с четко выраженными границами, хотя проведение границ между экосистемами до некоторой степени условно, так как между ними обязательно существует обмен веществом, энергией. Фактор, постоянно воздействующий на фитоценоз на протяжении всего периода вегетации (помимо климатических) — лесные полосы, которые способствуют формированию сообщества, отличного от растений открытого пространства, хотя в обоих случаях накладывается фактор орошения, создающий оптимальные условия для развития агроценозов.

На основе анализа собственных 20-летних исследований по данной проблеме, а также обобщении данных других исследователей в орошаемых агролесоландшафтах был предложен новый метод оценки динамики биопродуктивности агроценозов. (Рулева, 2006).

К растительному сообществу и агроценозам, как частному случаю фитоценозов при всей своей сложности, динамичности развития самого сообщества и его составляющих могут быть «приложимы» подходы и методы оптики мутных сред (Рачкулик, Ситникова, 1981). В статистическом смысле это означает переход к средним величинам, то есть замене истинных флуктуирующих величин статистически средними (Налимов, 1971). Принципиальным моментом использования теории поля для теоретического формализованного описания любых агроэкосистем является, прежде всего, выделение ряда системных параметров, отражающих доступность ресурсов, таких как влага, свет, элементы минерального питания и т.д. (все это присутствует при орошении и соблюдении культуры агротехники). Возникновение потоков вещества и энергии является важнейшим свойством реальных агроценозов. Вектор движения вещества и энергии направлен таким образом, что вся система носителей поля переходит в результате этого движения в более вероятное в термодинамическом смысле и соответственно в более устойчивое состояние. При приближении к максимально достижимому в данных условиях устойчивому состоянию поле перестает быть источником движения, поток затухает. Поток не ослабевает со временем лишь в том случае, если существует некоторый внешний для данного поля вещества и энергии механизм, непрерывно возобновляющий разность потенциалов (в нашем случае это влияние лесной полосы), причем ближе к ней благоприятные условия развития растений максимальны, а по мере отдаления – ослабевают. Затухание происходит по экспоненциальному закону. Возникновение потоков вещества и энергии в некотором реальном экосистемном пространстве межполосной клетки с участием лесных полос стремится к максимально устойчивому состоянию в термодинамическом смысле.

На основе проведенных исследований агроценозов, сформулировано следующее положение: независимо от географического положения района исследований, структуры агроценоза, рядности (их может быть 2-3-8 рядов), породного состава лесных полос, почвы, на которой возделываются культуры (красноземы, черноземы и др.) продуктивность сельскохозяйственных культур (зерновых, кормовых, овощных, масличных, технических и т.д.) при орошении изменяется по экспоненциальному закону (Таблица 1). Лесные полосы являются экологическим фактором, который способствует появлению адаптаций у растений агроценоза на межполосной клетке изменяться строго закономерно от расстояния до лесных полос, по одной зависимости — экспоненциальной: $y = a\ e^{-bx}$, где y—изменение биопродуктивности сельскохозяйственных культур; x—расстояние до лесных полос, a и b коэффициенты, определяющие наклон и изгиб экспоненциальной кривой.

Таблица 1 — Изменение биопродуктивности сельскохозяйственных культур (y) от расстояния до лесных полос (x) по экспоненциальной зависимости $y = a\ e^{-bx}$

Название культуры	Параметры уравнения		Коэффициент детерминации R^2
	a	b	
озимая пшеница	1,02	0,20	0,97
яровая пшеница	1,03	0,17	0,96
кукуруза	1,02	0,32	0,86
ячмень	1,10	0,63	0,88
подсолнечник	1,02	0,37	0,88
рис	1,09	0,36	0,96
нут	0,80	0,71	0,66
свекла	0,98	0,16	0,65
картофель	1,0	0,50	0,97
люцерна	1,0	0,88	0,93
хлопок	1,02	0,36	0,93
чайные кусты	1,0	0,28	0,82

Коэффициенты детерминации R^2, применяемой функции, свидетельствуют об удовлетворительной аппроксимации, то есть экспоненциальная модель развития перечисленных культур под защитным влиянием полос при орошении в целом адекватна описываемому явлению.

Для подтверждения достоверности обобщенных экспоненциальных зависимостей по сельскохозяйственным культурам был проведен сравнительный анализ по параметрам a и b вышеперечисленных культур. Стандартное отклонение во всех случаях, кроме случая с картофелем, ячменем (0,06), и подсолнечником (0,07), не превышает 0,5% уровень вероятности, что подтверждает высокую достоверность полученных зависимостей и применимость данного метода к описываемому явлению.

Практическая значимость разработки заключается в том, что позволяет прогнозировать динамику биопродуктивности сельскохозяйственных культур на экосистемном пространстве межполосной клетки в системе лесных полос.

Литература

Налимов В.В. Теория эксперимента.- М.: Наука, 1971.- 207 с.

Рачкулик В.И., Ситникова М.В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова.– Л.: Гидрометеоиздат, 1981.– 248 с.

Рулева О.В. Теоретическо-методологическая оценка влияния лесных полос на биологическую продуктивность сельскохозяйственных культур в орошаемых агролесоландшафтах // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова.- 2006 г. № 3.-С.62-67.

РЕАКЦИЯ ЭКОСИСТЕМ БОЛЬШИХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ОЗЕР НА СНИЖЕНИЕ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ*

Руховец Л.А.[1], Петрова Н.А.[2], Меншуткин В.В.[1], Астраханцев Г.П.[1], Минина Т.Р.[1], Полосков В.Н.[1]

[1]*Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН, Санкт-Петербург, Россия*
emi@emi.nw.ru

[2]*Учреждение Российской академии наук Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*
lake@spb.org.ru

Аннотация: для Ладожского озера лимнологи установили, что снижение фосфорной нагрузки в период 1996-2005 гг. не привело к ожидаемому снижению продуктивности фитопланктона. С помощью математического моделирования в данной работе объяснен механизм этого явления. Этот пример ставит под сомнение распространенное представление о том, что снижение антропогенной нагрузки обеспечивает возврат экосистем озер, подвергшихся антропогенному эвтрофированию, к состоянию, имевшему место до начала процесса антропогенного эвтрофирования.

Введение

Ладожское озеро, как и американские Великие озера, подверглось процессу антропогенного эвтрофирования, причиной которого стал рост, начиная с 1962 года, фосфорной нагрузки. К 1982 году нагрузка выросла в три с половиной раза, достигнув величины 8110 т $P_{общ}$/год. При этом озеро перешло из олиготрофного в развитое мезотрофное состояние. Принятые после 1982 года меры и разразившийся в 90-х годах экономический кризис привели к снижению фосфорной нагрузки. В результате процесс деградации озера замедлился. В работах (Петрова и др., 2005; Румянцев и Драбкова, 2006) весь процесс трансформации экосистемы Ладожского озера представлен как

*Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-06-00380а).

последовательность этапов, в течение которых трансформация протекала по-разному. В Таблице из работы (Руховец и др., 2010) представлены в агрегированном виде характеристики этапов, основанные на данных, опубликованных сотрудниками Института озероведения РАН. Согласно данным наблюдений различия этапов связаны, прежде всего, с изменениями фосфорной нагрузки. Этап 1996-2005 гг. отличается тем, что среднегодовая нагрузка существенно ниже среднегодовой нагрузки в период 1975-1995 гг. (Таблица). В период 1996-2005 гг. такие показатели, как концентрации минерального и общего фосфора в воде озера приблизились к показателям, имевшим место в олиготрофный период развития озера до 1962 года. Однако состояние биоты, прежде всего, фитопланктона, во-первых, существенно отличается от ее состояния до 1962 года и, во-вторых, практически не отличается от состояния биоты в период 1984-1995 гг., когда фосфорная нагрузка была существенно выше.

Таблица 1. Средние за периоды фосфорная нагрузка (т $P_{общ}$/год), концентрации общего /минерального фосфора (мкг Р/л), биомасса суммарного фитопланктона (мг/л) (данные Института озероведения РАН из работ (Петрова и др., 2005; Румянцев и Драбкова, 2006))

Периоды	1959-1962	1975-1983	1984-1995	1996-2005
Фосфорная нагрузка (т $P_{общ}$/год)	2430	7100	6040	3580
Концентрации общего и минерального фосфора в воде озера (мкг Р/л)	<10 3	25 11	20 8	16 4.5
Сырая биомасса суммарного фитопланктона (мг/л) средняя за летний период в приповерхностном слое 0-2 м	0.8	2.0 - 3.1	1.6	1.5

Одной из основных причин отмеченного явления в работе (Петрова и др., 2005) называется увеличение скорости внутриводоемного круговорота фосфора вследствие увеличения численности бактериопланктона и водных грибов. Подобное явление имеет место не только в Ладожском озере, но и в других великих озерах, например, в озере Эри (Conroy et al., 2005).

Следует отметить, что основанные на данных наблюдений количественные оценки для такого огромного озера как Ладожское, по многим причинам весьма приблизительные. Поэтому авторы данной работы с помощью математической модели экосистемы Ладожского озера воспроизвели механизм ускорения внутриводоемного круговорота фосфора и получили результаты, объясняющие фактический ход трансформации экосистемы Ладожского озера в период 1996-2005 гг. Часть результатов данной работы уже опубликована (Руховец и др., 2010).

Модель сукцессии фитопланктона Ладожского озера

Для воспроизведения функционирования экосистемы Ладожского озера использовалась модель сукцессии фитопланктона. В модели состояние экосистемы описывается трехмерными полями концентраций 14 субстанций: девяти комплексов фитопланктона (Ph1, …, Ph9), зоопланктона (Z), детритного фосфора (DP), растворенного в воде органического вещества (DOP), растворенного в воде кислорода (OX) (Rukhovets et al., 2003). Модель построена с использованием только одного биогена – фосфора, который в Ладожском озере является основным регулятором продуктивности экосистемы. Модель верифицирована и откалибрована на основе данных наблюдений, относящихся, в основном, к периоду 1984-1990 гг. (Петрова и др., 2005; Румянцев и Драбкова, 2006).

Применение модели

Вычислительные эксперименты по воспроизведение круглогодичного функционирования экосистемы Ладожского озера с 1962 по 2005 г показали, что для периода 1962-1995гг. модель адекватно воспроизводит трансформацию его экосистемы. Однако, для периода 1996-2005гг. среднелетние значения биомассы суммарного фитопланктона, полученные с помощью модели, не соответствуют данным в Таблице.

Для того, чтобы проверить гипотезу лимнологов об ускорении круговорота фосфора в экосистеме Ладожского озера, авторы изменили в модели блок деструкции детрита и растворенного в воде органического вещества. Затем были выполнены основные вычислительные эксперименты по модели со «старым» и «новым» блоками деструкции при двух фиксированных нагрузках 2430 т Р/год и 4000 т Р/год. Счет проводился до получения периодических решений. Первая из нагрузок соответствует периоду олиготрофного статуса озера, вторая – это нагрузка, при которой в рамках модели со «старым» блоком деструкции Ладожское озеро остается в слабо мезотрофном состоянии.

Результаты экспериментов показали, что в расчетах с «новым» блоком деструкции суммарная биомасса фитопланктона при обеих нагрузках выше, чем при расчетах со «старым» блоком деструкции, тогда как концентрации детрита и растворенного органического вещества в эпилимнионе уменьшились. Таким образом, происходит перераспределение потоков фосфора внутри экосистемы: дополнительное количество минерального фосфора для развития фитопланктона высвобождается за счет DOP и DP.

Результаты проведенного исследования показывают, что снижение антропогенной нагрузки может не дать положительных результатов.

Литература

Петрова Н.А., Иофина И.В., Капустина Л.Л., Кулиш Т.П., Петрова Т.Н., Расплетина Г.Ф. Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера (этапы трансформации экосистемы, 1975-2004 гг.) // Экологическая химия, 2005, т. 14, вып.4.- С. 209-234.

Румянцев В.А., Драбкова В.Г. Экологическая диагностика состояния Ладожского озера // Водные ресурсы Европейского Севера России. Петрозаводск: КарНЦ РАН.- 2006.- С. 110-126.

Руховец Л.А., Петрова Н.А., Меншуткин В.В., Астраханцев Г.П., Минина Т.Р., Полосков В.Н. Моделирование трансформации экосистемы Ладожского озера при снижении фосфорной нагрузки // Доклады академии наук, 2010. Т. 434, № 5.- С. 684-687.

Conroy J.D., D.K Douglas, D.M. Dolan, W.J. Edwards, M.N. Charlton, D.A. Culver. Temporal trends in Lake Erie plankton biomass: roles of external phosphorus loading and dreissenid mussels.// J. Great Lakes Res.- 2005.- 31 (Suppl. 2): P. 89-110. Tables 4 -6.

Rukhovets L.A., Astrakhantsev G.P., Menshutkin V.V., Minina T.R., Petrova N.A., Poloskov V.N. Development of Lake Ladoga Ecosystem Models: Modelling of the Phytoplankton Succession in the Eutrophication Process. I. // Ecol. Modelling.- 2003.- V. 165. № 1.- P. 49-77.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ФАКТОРОВ СРЕДЫ ПО ВИДОВОМУ СОСТАВУ РАСТИТЕЛЬНОГО СООБЩЕСТВА

Савельев А.А. [1], Мухарамова С.С.[2]

[1] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*
saa@ksu.ru

[2] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*
mss@ksu.ru

Аннотация: на примере сосудистых растений развит вероятностный подход к формализованному описанию условий экотопа как вероятностного распределения значений экологических шкал, базирующийся на положениях теоретической экологии. Метод реализован на основе данных геоботанических описаний, выполненных на территории Республики Татарстан, и экологических шкал Цыганова.

Изучение условий местообитаний растений требует не только сбора, накопления и осмысления фактического материала, но и построения моделей, которые можно использовать для получения статистически достоверных оценок и прогнозов пространственного распределения экологических условий, что, в свою очередь, является актуальным для оценки современного и потенциального биоразнообразия. В данной работе описывается вероятностный подход, который в рамках закона толерантности и гипотезы об экологической индивидуальности видов позволяет формализовать оценку условий экотопа в терминах экологических шкал и выполнять ее с использованием информации флористических баз данных (БД).

Рассмотрим некоторый фактор среды G как дискретную случайную величину, возможные значения которой даны баллами экологической шкалы диапазонного типа: $\{ G_j \}$, $j = 1,...,L$. Обозначим $P_{(i)}(G_j) = P(G = G_j \mid i)$ вероятность того, что в некоторой «точке» i географического пространства (на i-ой площадке описаний), где известен видовой состав растительного сообщества, этот фактор принял j-ое значение, равное G_j. И будем предполагать справедливость индивидуалистической гипотезы Раменского-Глизона. Оценить распределение вероятностей значений фактора предлагается путем взвешенного усреднения условных вероятностей значений фактора для отдельных видов:

$$P^*_{(i)}\left(G_j\right) = \frac{\sum_{m=1}^{M} P\left(G_j \mid S_m\right) w_{m,i}}{\sum_{m=1}^{M} w_{m,i}}. \qquad (1)$$

Здесь $P\left(G_j \mid S_m\right) = P\left(G = G_j \mid S_m\right)$ - вероятность того, что фактор примет j-ое значение при условии присутствия m-ого вида флоры, $w_{m,i}$ - весовой коэффициент m-ого вида для экотопа i, M - общее число видов в региональном пуле видов (или общее число видов, зафиксированных в флористических описаниях исследуемой территории). Оценка по формуле (1) содержит для каждого значения шкалы ошибку относительно истинного значения вероятности. Однако, учитывая, что такие ошибки для разных видов независимы, и делая стандартное для статистики предположение о нулевом матожидании ошибки (взаимной компенсации ошибок при суммировании по всем видам), можно рассматривать $P^*_{(i)}\left(G_j\right)$ как несмещенную состоятельную оценку для распределения вероятностей значений факторов среды (Рогова и др., 2005).

Формула Байеса позволяет получить каждую из условных вероятностей $P\left(G_j \mid S_m\right)$ из модели отклика отдельных видов на фактор, даваемую экологической шкалой. Пусть $P\left(S_m \mid G_j\right)$ есть вероятность присутствия m-ого вида в условиях G_j. Если учесть, что $P\left(S_m\right)$ для данного вида – константа, и считать, что априорные вероятности $P\left(G_j\right)$ одинаковы для всех G_j из диапазона толерантности m-ого вида (обозначим этот диапазон T_m), тогда:

$$P\left(G_j \mid S_m\right) = P\left(S_m \mid G_j\right) \cdot \frac{P\left(G_j\right)}{P\left(S_m\right)} = \begin{cases} P\left(S_m \mid G_j\right) \cdot C, & \text{если } G_j \in T_m \\ 0, & \text{если } G_j \notin T_m \end{cases}, \text{ где } C = \frac{1}{\sum_{G_j \in T_m} P\left(S_m \mid G_j\right)}.$$

Если считать, что величины $P\left(S_m \mid G_j\right)$ пропорциональны значениям функции отклика m-го вида на фактор среды $f_m\left(G_j\right)$, то с учетом нормировки получаем:

$$P\left(G_j \mid S_m\right) = f_m(G_j)\cdot C, \quad \text{где } C = \frac{1}{\sum_j f_m\left(G_j\right)}. \qquad (2)$$

Форма кривой $f_m\left(G_j\right)$ моделируется с использованием Гауссовой кривой с 5% квантилями, соответствующими границам диапазона толерантности *m*-го вида по шкале *G*, за пределами которых $f_m\left(G_j\right)$ равна нулю.

Заметим, что равенство априорных вероятностей $P\left(G_j\right)$ в диапазоне толерантности каждого вида, входящего в *i*-ое сообщество, является достаточно слабым требованием, которое можно считать выполненным в условиях зонального экотона (т.е. если априорное распределение вероятностей не имеет резких «провалов» и «пиков»).

Вес *m*-ого вида $w_{m,i}$ в формуле (1) задается в зависимости от его свойств и вклада в структуру *i*-ого сообщества (или от того, какой информацией об этом мы обладаем). Например, с учетом только факта присутствия вида, или с учетом степени его доминирования, и т.д. Можно при взвешивании усилить вклад в оценку индикаторной информативности вида, соответствующей степени его стенотопности.

В результате для экотопа *i* получаем набор (оценок) вероятностей разных значений фактора, что позволяет описывать экологические условия даже в случае их неоднородности. При желании можно перейти к оценке одним числом с использованием медианы.

Разработанный подход был применен для оценки экологических условий местообитаний растений в терминах шкал Цыганова по данным ~5000 геоботанических описаний, выполненных на территории Республики Татарстан, представленным в БД «Флора» (Прохоров, 2006). На его основе были разработаны и реализованы два метода оценки пространственного распределения экологических условий в региональном масштабе с использованием геокодированных списков видов растений и общедоступной геоинформации, полученной дистанционным путем (Мухарамова, 2010). Показана адекватность модельных оценок независимым экспертным данным и имеющимся экологическим картам.

Литература

Мухарамова С.С. Моделирование и прогноз пространственного распределения экологических условий местообитаний растений: автореферат дисс… канд. биол. наук.– Казань: Казанский (Приволжский) федеральный ун-т, 2010.– 26 с.

Прохоров В.Е. Редкие виды сосудистых растений флоры Республики Татарстан: эколого-ландшафтные особенности хорологии и динамики: автореферат дисс... канд. биол. наук.– Казань: Казанский гос. ун-т им. В.И. Ульянова-Ленина, 2006.– 24 с.

Т.В. Рогова, А.А. Савельев, С.С. Мухарамова Вероятностная модель формирования флористического состава растительных сообществ // Ботанический журнал.- 2005.- Т.90.- №3.- С.450 460.

ВЛИЯНИЕ ТИПА МЕТАБОЛИЗМА НА УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛЕЙ ЭКОСИСТЕМ

Салтыков М.Ю. [1], Барцев С.И.[2], Ланкин Ю.П.[3]

[1]*ИФБиБТ СФУ, Красноярск, Россия*
saltykoff.mixail@yandex.ru
[2]*ИБФ СО РАН, Красноярск, Россия*

bartsev@yandex.ru
[3]*ИБФ СО РАН, Красноярск, Россия*
lan3@mail.ru

Аннотация: в традиционных моделях экосистем происходит падение устойчивости с ростом числа видов, что противоречит данным наблюдений. В данной работе были исследованы модели

экосистем с различным типом метаболизма видов. Показано, что в случае адаптации метаболизма к изменению распространенности питательных субстратов возможно увеличение устойчивости с ростом числа видов.

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).

Рисунок 1. Увеличение области стационарных состояний системы (2) с увеличением числа видов-продуцентов. Цветами обозначены: зеленый – стационарное сосуществование всех видов; желтый – колебания

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.

Целью данной работы являлось исследование зависимости устойчивости моделей экосистем от числа описываемых видов при использовании различных механизмов адаптации метаболизма к изменению распространенности питательных субстратов. В качестве меры устойчивости был взят размер области устойчивости в пространстве параметров модели. Размер областей устойчивости оценивался путем построения параметрических портретов при помощи разработанного в ИБФ СО РАН программного пакета. Моделировалась замкнутая экосистема, состоящая из двух трофических уровней: продуцентов и консументов. Были рассмотрены случаи лимитирования одним и несколькими биогенными элементами.

Численные эксперименты показали возможность увеличения устойчивости моделей с адаптивным метаболизмом с ростом числа описываемых видов. На рисунке 1 показаны параметрические портреты модели с адаптивным метаболизмом при различном числе видов-продуцентов.

Таким образом, модели с адаптивным метаболизмом более пригодны для описания сложных замкнутых экосистем, чем модели с жестким метаболизмом.

Работа поддержана интеграционным проектом СО РАН №50.

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.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Салугин А.Н., Сидорова Е.А.

Российский государственный университет туризма и сервиса, Волгоградский филиал, Волгоград, Россия
saluginan@mail.ru

Аннотация: рассмотрены вопросы устойчивого функционирования и восстановления почвенно-растительных систем в зонах с повышенной аридностью. Демонстрируются новые методологические возможности математического моделирования в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений и вычислительного эксперимента. Параметрическая устойчивость решений систем уравнений связывается с динамической устойчивостью экосистемы за счет биоразнообразия и обратных связей сукцессионных переходов.

Органическое разнообразие привлекает внимание ученых при изучении устойчивости экосистем. До настоящего времени информация о разнообразии почвенных растительных сообществ просто накапливалась в виде вербального описания новых видов. Понимание важности биологического разнообразия привело к осознанию необходимости его сохранения для устойчивого развития и выживания природных резерватов. Автор (Пегов, 2004) утверждает, что природная система Земли в настоящее время приближается к точке бифуркации, после которой развитие может протекать по нескольким равновероятным

фазовым траекториям. Траектории развития диссипативных структур весьма различны в смысле устойчивости и их исследование весьма важно для выявления условий устойчивого развития природных систем.

Отвлекаясь от общих и глобальных проблем, для более детального рассмотрения бифуркационных процессов, происходящих сейчас повсеместно на всех уровнях организации биосистем, рассмотрим почвенно-растительные системы (ПРС). В работе (Салугин, 2001) нами была изучена деградация ПРС от пастбищной дегрессии. Вопрос о динамической устойчивости подобных растительных сообществ, в связи с этим, вдвойне актуален, так как выявление причин нарушения самовосстановления пастбищ может служить основой общей теории устойчивости экосистем, а численное определение параметров модели — для практических приложений.

Математический эксперимент ставился на базе моделирования динамических переходов с применением обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Параметрическая устойчивость обсуждалась в контексте теории Ляпунова (Петров, 2004). То обстоятельство, что теория устойчивости часто используется в формальном управлении системами, стимулировало наши дальнейшие исследования в управлении ПРС, а также экосистемами в виде ландшафтов. Метод ОДУ для моделирования экосистем в настоящее время резко продвинулся за счет развития численных алгоритмов и имитационных экспериментов. Исследования устойчивости ПРС осуществлялись традиционными методами по значениям корней характеристического полинома системы уравнений: если все корни многочлена имеют отрицательные вещественные части, то система устойчива. Для общего случая модель записывалась в виде

$$\frac{dS_i}{dt} = -\sum_{j=1}^{n} \alpha_{ij} S_i + \sum_{j=1}^{h} \alpha_{ji} S_j, \qquad (1)$$

где S_i, S_j — объемы соответствующих типов пастбищ, α_{ij} — коэффициенты переходов, полученных из космического мониторинга. В правой части (1) первый член соответствует распаду, а второй восстановление i-го элемента экосистемы.

Система (1) являлась моделью эволюции ПРС с начальными S_i, и α_{ij} , разделенными временными промежутками аэро-космического мониторинга порядка пяти лет. Для анализа подвергались данные 50-летнего периода наблюдений, начиная с 1954 г. Характеристический полином системы для 1954-1958 гг: $\lambda^4 - 25.03\lambda^2 - 0{,}684\lambda + 8{,}742$ имеет корни: 4,98, - 4,95, 0,58, - 0,61. Два корня уравнения положительны, что свидетельствует о нестабильности и пастбищная экосистема за счет сукцессионных переходов разрушается. Отрицательные значения корней, на наш взгляд, указывают на временное динамическое равновесие между промежуточными продуктами сукцессий, в то время как исходные необратимо разрушаются.

Анализ полученных для всех периодов наблюдений результаты приводит к мысли о том, что такие системы полезно исследовать на предмет параметрической устойчивости — когда изучается их чувствительность к изменению коэффициентов сукцессий a_{ij}. Физически это означает: насколько чувствительна пастбищная система к изменению интенсивностей переходов между ее биологическими составляющими. Свойство системы сохранять устойчивость при вариациях коэффициентов (параметров) называется параметрической устойчивостью (Петров, 2004). При варьировании матрицы коэффициентов, на величину $|\delta| << 1$ можно получить абсолютное значение δ , определяющее диапазон изменения параметров, выводящий экосистему из динамического равновесия. Целью управления пастбищной экосистемой является определение этого диапазона для регулирование нагружения с учетом текущей динамики сукцессионных переходов, которые отражают способность экосистемы к самовосстановлению.

На примере ПРС можно получать достаточно априорную информацию об устойчивости экосистем с целью предсказания их будущего. Эта глобальная проблема принадлежит разделу экологии, изучающему условия динамически регулирования внутри открытых экосистем – биотической составляющей литосферы. Особенно это важно для зон с повышенной аридностью, где проблема сохранения растительного разнообразия весьма важна в свете общих задач сохранения биосистем. Аридные экосистемы особо чувствительны к сукцесионным процессам. Их самовосстановление основано именно на этом, сохраняя достаточное разнообразие и суммарный баланс биопродукции. По своей сути, в терминах физики и синергетики — это открытые диссипативные структуры, обладающие нелинейностью, приводящей к повышенной чувствительности к малым возмущениям в точках бифуркаций и последующей необратимости.

Авторы (Князева, 2002) утверждают, что системная самоорганизация возникает независимо от функционального предназначения систем. Исследование динамики ПРС точках бифуркаций, выявление тенденций их эволюции стимулирует дальнейшее развитие данного направления исследований с целью практического использования результатов для практических приложений. Рациональное использование природных ресурсов, несомненно, должно опираться на положения теории управления, учитывающей устойчивость экосистем и параметрическую чувствительность к антропогенным воздействиям.

Литература

1.Пегов С.А. Устойчивое развитие в условиях глобальных изменений природной среды // Вестник РАН.- 2004, том 74, №12.- С. 1082-1089.
2. Салугин А. Н., Кулик К. Н. Моделирование, прогноз и оптимальное управление в экологии почвенно-растительного покрова Калмыкии // Аридные экосистемы.– 2001.– Т.7.- №14–15.–С. 11–21.
3. Петров Ю.П. Новые главы теории управления и компьютерных вычислений.– СПб.: БХВ-Петербург, 2004.– 192 с.
4. Князева Е.Н, Курдюмов С.П. Основания синергетики. Режимы с обострением, самоорганизация, темпомиры -СПб.: Алетейя, 2002.-414 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ОТОБРАЖЕНИИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КОЛЕБАНИЙ ЧИСЛЕННОСТИ ЖИВОТНЫХ

Саранча Д.А.[1], Юрезанская Ю.С.[2]

[1]*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, Москва, Россия*
saran@ccas.ru

[2]*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, Москва, Россия*
july@ccas.ru

Аннотация: проведено исследование одномерных унимодальных отображений (ОУО), полученных при описании динамики численностей животных. Для отображений такого типа существует сценарий изменения выделенного параметра, при котором последовательно возникают зоны стабильности с устойчивыми циклами. Внутри зоны стабильности период циклов постоянный, при переходе от одной зоны к другой период изменяется в последовательности натурального ряда.

Задача глубокого и всестороннего исследования взаимосвязей в экологических сообществах актуальна в связи с увеличением антропогенных нагрузок на естественные экосистемы. При описании динамики численности животных в рамках математических моделей тундровых популяций и сообществ оказалось эффективным использование разностных уравнений (Саранча, 1995).

Рисунок 1

Анализ результатов вычислительных экспериментов с взаимодополняющими моделями сообщества «растительность–лемминги–песцы» и популяции леммингов с учетом возрастной структуры привел к обоснованию упрощенной модели в виде разностного уравнения, графическое представление которого дано на рисунке 1. С помощью разностного уравнения

$$L_{n+1} = f(L_n), n = 1, 2, 3..., \quad (1)$$

связывающего нормированные численности леммингов L_n в двух соседних годах, удалось воспроизвести временную динамику, качественно близкую к динамике численностей реальных популяций. На рисунке 1 P – скорость прироста биомассы леммингов в благоприятный год, A – равновесная численность, d – численность леммингов в оптимальном биотопе.

Рисунок 2

На основе совместного анализа эколого-биологической информации и результатов вычислительных экспериментов удалось сформулировать и решить «обратную имитационную задачу» – обосновать такие дополнительные предположения, которые

позволяют получить расчетные формулы для перехода от исходной модели сообщества к указанному выше разностному уравнению. Такой переход основан на том, что в конкретный временной отрезок (сезон) изменение соответствующих переменных происходит в сравнительно узком диапазоне, что позволяет для этого диапазона осуществить линеаризацию исходных (экспертных) функций. Использование разностных уравнений позволило определить в исходных имитационных моделях области параметров, обеспечивающие динамические режимы изменения численностей популяций, близкие к наблюдаемым в природе, а также сформулировать гипотезы о механизмах, определяющих динамику численностей животных, выделить ведущие безразмерные показатели, ее определяющие.

Характер динамических режимов модели (1) исследовался при изменении параметра d от 1 до 0 с помощью бифуркационной диаграммы, изображённой на рисунке 2 (Недоступов, 2010). Вертикальное сечение графика при выбранном значении d представляет собой точки траектории. С помошью этой диаграммы можно выделить зоны стабильности (светлые полосы) и зоны со сложными режимами (тёмные полосы). Внутри зон стабильности период траекторий постоянный, при переходе от одной зоны стабильности к другой период изменяется в порядке натурального ряда. В каждой из переходных зон существуют периодические траектории с периодом, большим любого наперед заданного натурального числа. При этом ширину переходных зон можно сделать как угодно малой, приближая правую часть кривой на рисунке 1 (исключая горизонтальный участок) к вертикальной линии.

Литература

Недоступов Э.В., Саранча Д.А., Чигерев Е.Н., Юрезанская Ю.С. О некоторых свойствах одномерных унимодальных отображений//Доклады академии наук.- 2010.– Т. 430, № 1.- С. 23–28.

Саранча Д.А. Биомоделирование. Материалы по количественной экологии. Математическое моделирование и биофизические аспекты.- М.: ВЦ РАН, 1995.- 129 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННОЙ ПАРАДИГМЫ

Свентицкий И.И.[1], Мудрик В.А.[2]

[1] *ГНУ Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства РАСХН, Москва, Россия*
[2] *Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино Московской обл. Россия*
vilen_mudrik@rambler.ru

Под парадигмой первоначально понималась система, принимаемая сообществом ученых, на основе которой выявляются научные проблемы и их решения (Кун, 1996). Методологическое значение этого термина возрастало и в (Капра, 1996) под парадигмой уже понимают как совокупность мыслей, восприятий и ценностей, которые создают определенное видение реальности – основы самоорганизации общества. Как видим, понятие парадигмы возрастает до общекультурного уровня, включая, наряду с наукой, искусство и религию.

Большинство работ по моделированию основано на классической (механистической) парадигме, для которой характерен детерминизм и объективность. В них отсутствует учет более высокого уровня парадигмы – неклассической – для которой характерны квантовые представления, дополнительность, индетерминизм. В большинстве моделей продуктивности растений учет притока энергии к растениям осуществлен на основе величины ФАР, которой не учитывают квантовые свойства излучения (Полуэктов, 2010). Началом перехода моделирования первичной продуктивности к неклассической парадигме можно считать

работы, в которых учитывают квантовые свойства излучения (света) для учета эффективности его преобразования в процессе фотосинтеза (Свентицкий, 1984; Sventitskii, Antoninova, 1989).

Современным, более прогрессивным уровнем парадигмы является эволюционный (постнеклассический), который учитывает явление самоорганизации (неравновесной термодинамики, синергетики, динамики нелинейных систем). Для нее характерен учет свойств прогрессивной эволюции (Мудрик и др. 2010; Свентицкий и др. 2010). В эволюционной парадигме учитывается также в снятом виде квантовый и классический детерминизм. В соответствии с этой парадигмой в естествознании и методологии науки все чаще делаются акценты на междисциплинарности, системности, системном единстве, целостности, всеединстве знаний. В политике и социологии общечеловеческие ценности провозглашаются приоритетными перед групповыми, национальными, государственными. Синтезирующую роль обретает культура. Она стремится объединить науку, искусство и религиозные учения в целостностное ноосферное представление. На это обращал внимание А. Эйнштейн в конце своей жизни (Eistein, 1950): «Все религии, искусство и науки являются ветвями одного дерева».

На первый взгляд представляется, что все эти важные положения развивающейся эволюционной парадигмы не имеют прямого отношения к моделированию продуктивности растений, первичной продуктивности экосистем и агроэкосистем. В прямом отношении этой частной отрасли знаний к эволюционной парадигме можно убедиться, исходя из рассмотрения сущности главного устремления основных развитых стран мира к глобализации, которую можно рассматривать как осуществление антигуманной идеи «золотого миллиарда». Надежно доказать несостоятельность этой идеи о том, что комфортное проживание Земля может обеспечить только для одного миллиарда человек, можно прежде всего только на основе методологически корректной модели первичной продуктивности фототрофных растений в условиях Земли. Только такая модель позволит исчерпывающе ответить на вопрос: какое количество людей может прокормить Земля?

Часть важных положений такой модели уже обосновано (Свентицкий, 1984; Sventitskii, Antoninova, 1989; Свентицкий, 2007). Методологически надежно обосновано определение свободной энергии на входе в фотосинтезирующие растения (Sventitskii, Antoninova, 1989) - эксергии оптического излучения для растений (растениеводства). Исходя из принципа подчинения синергетики, была обоснована аналитическая основа простой детерминированной модели потенциально-эффективного типа для установления потенциальной (максимальной) продуктивности растений данного вида (сорта, гибрида) в заданных экологических условиях. Для упрощения анализа слабоформализованной системы зависимости продуктивности растений от многих факторов (переменных, параметров) в соответствии с принципом подчинения синергетики в качестве переменной порядка принята величина эксергии излучения (света). Эта переменная наиболее быстро изменяется и наиболее сильно влияет на функционирование системы. В дальнейшем анализе только энергия излучения рассматривают в качестве переменной, все иные переменные системы рассматривают как параметры управления.

Важное преимущество этой безальтернативной модели продуктивности – возможность неограниченного расширения учитываемых параметров и переменных без изменения самой модели и точности расчетов по ней. Оценка влияния учитываемых факторов в модели проводится на основе коэффициентов их оптимальности для протекания процесса фотосинтеза или формирования продуктивности растений при оптимальном значении всех иных учитываемых параметров (переменных). Это обусловливает простоту модели. Основной операцией является умножение значения величины переменной порядка – эксергии излучения, поступающей к растению - на коэффициент оптимальности параметра управления, значение которого в данный момент времени минимально. Значения коэффициентов оптимальности каждого из учитываемых определяется на основе

экологофизиологических характеристик растений данного вида (сорта, гибрида). Эти характеристики определяют экспериментально в климатических камерах с регулируемыми и контролируемыми значениями учитываемых в модели факторов. При установлении этих зависимостей все иные факторы, кроме изучаемого, поддерживают на близком к оптимальному уровню.

Рассматриваемая модель использована для создания единой методики количественного взаимно согласованного определения агроэкологических величин: климатического (агробиоклиматического) и мелиоративных (по любому из экологических факторов) потенциалов земельного угодия в отношении определенного вида (сорта, гибрида) растений, а также плодородия земельного угодия и потенциальной (максимальной) продуктивности растений в заданных экологических условиях (Свентицкий, 2007).
Для определения этих величин в качестве исходной принята эксергия оптического излучения по фотосинтезу растений. Это позволило выразить все названныеэкологические величины в одинаковых эксергетических единицах, тождественных единице свободной энергии Гиббса.

Аналитические выражения названных величин были использованы для построения основных алгоритмов системы экосовместимой, энерго-, ресурсоэкономной оптимизации выращивания продукции растениеводства. Эта система, разработанная в ГНУ ВИЭСХ, позволяет оптимизировать процесс выращивания заданной продукции растениеводства посредством выбора оптимального сочетания альтернативных элементов трех групп множеств: земельных угодий с различными экологическими условиями; видов (сортов, гибридов) растений с различными экологофизиологическими характеристиками и сортовых, зональных агротехнологий со средствами их осуществления.

Система позволяет проводить расчеты оптимизации по трем эксергетическим критериям: 1- эксергетическому показателю энергетической эффективности использования техногенной энергии в агротехнологиях в соответствии с федеральным законом по энергосбережению (Федеральный закон Российской Федерации, 2009); 2 - эксергетическому КПД по использованию эксергии земельного угодия и 3 - показателю технико-экономическому (эксергетическому) по эффективности использования материальных средств на производство продукции растениеводства.

Подобные компьютерные системы экологосовместимой оптимизации производства можно создать и для оптимизации продукции животноводства – вторичной продуктивности агроэкосистем: молочного скотоводства, птицеводства, свиноводства и др. В этих системах оптимизации главным энергетическим входом должна быть эксергия кормов. В отечественном современном животноводстве энергетическая (питательная) ценность кормов определяется, к сожалению, кормовыми единицами, эквивалентом которой является один кг сухого овса.

Анализ процессов прогрессивной эволюции самоорганизующейся природы на основе закона выживания, второго начала термодинамики и образуемого или в виде зеркальной динамической симметрии принципа энергетической экстремальности самоорганизации (Стребков, Свентицкий, 2009, схема 1) позволил выявить пять идеальных свойств прогрессивной эволюции. В соответствии с законом выживания и принципом энергетической экстремальности прогрессивная эволюция самопроизвольно направлена к экономности: энергетической, вещественной и информационной. Следствием этой направленности является гармония и красота объектов самоорганизующейся природы, а также ускорение процесса эволюции по мере усложнения эволюционирующих систем.

Идеальные свойства прогрессивной эволюции природы прежде всего необходимо учитывать при управлении в АПК и природоохранной деятельности. Идеальные свойства прогрессивной эволюции свидетельствуют о том, что «Природа и Бог в кости не играют». Финансовая элита мира, к сожалению, «играют в кости» на грани самоуничтожения. О необходимости прекращения этой игры убедительно свидетельствуют идеальные свойства прогрессивной эволюции.

Литература

Einstein A. Out of my later years. N.Y., 1950.- 282 p.
Капра Ф. Уроки мудрости. М., 1996.- 318 с.
Кун Т. Структура научных революций. М., 1996.- 318 с.
Мудрик В. А., Свентицкий И. И., Гришин А. П. Синергетическая модель и система многосвязного управления микроклиматом теплиц. Материалы Всероссийской конференции «Математические модели и информационные технологии в сельском хозяйстве: итоги и перспективы». г. Санкт-Петербург, 2010.- С. 285.
Полуэктов Р.А. Развитие математических методов в биологии в СССР и РФ: 1970–2010 (Исторический обзор). Материалы Всероссийской конференции «Математические модели и информационные технологии в сельском хозяйстве: итоги и перспективы». г. Санкт-Петербург, 2010.- С. 9.
Свентицкий И.И. Определение свободной энергии на входе в растения // Wissenschaftliche Zeitschrift der Humbold Universitet zu Berlin. Math.-Nat. R., V. XXXIII, 1984, N 4.- S. 330-331.
Свентицкий И.И., Мудрик В.А., Королев В.А. Самоорганизационная основа оптимального управления в АПК и природопользовании. Материалы всероссийской научной конференции «Биосферные функции почвенного покрова», Пущино, 2010.- С. 276.
Свентицкий И.И. Энергосбережение в АПК и энергетическая экстремальность самоорганизации.- М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007.- 468 с.
Стребков Д.С., Свентицкий И.И. и др. Оборачивание метода в энергетике и физике// От методологии к онтологии.- М.: ИФ РАН, 2009.- С. 98-122.
Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
Чернавский Д.С., Чернавская Н.М. Проблема целеполагания и идеологическое единство России// В кн: Стратегии динамического развития России: единство самоорганизации и управления.- Т. 1.- М.: 2004.- С. 87-112.
Sventitskii I.I., Antoniniva M.V. Photosynhetic model for conceptual combination of plant growth and environment // Photosynthetica, 1989, N 23(4).- P. 617-628.

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ: ПОРЯДОК И ХАОС В ПРИРОДНЫХ СИСТЕМАХ (НА ПРИМЕРЕ ЛОГИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ)

Светлосанов В.А., Кудин В.Н.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва
vsvetlos@mail.ru

Аннотация: на примере уравнения Ферхюльста показана возможность перехода в природных системах от устойчивого развития (порядок) к неустойчивому развитию (хаос).

Понятие устойчивого развития тесно связано с понятием устойчивости, а понятие устойчивости связано с «порядком» и «хаосом» в природных системах. В экологических исследованиях часто используют логистическую кривую, являющуюся решением уравнения Ферхюльста, которое описывает эволюцию системы, определенной совокупностью факторов.

Одним из классических примеров, где используется логистическая кривая, это рост численности популяций.

$$\frac{dN}{dt} = (\alpha - \beta \cdot N) \cdot N = \alpha \cdot N - \beta \cdot N^2$$

при начальных условиях: $t = 0$, $N = N_0$

Хотя данное уравнение нелинейное, но оно интегрируется в квадратурах.

Логистическое уравнение, рассмотренное с точки зрения «порядка» и «хаоса», является репрезентативным представителем «порядка» в природных системах.

В рассмотренном уравнении предполагается, что экологические параметры, входящие в уравнение Ферхюльста, являются постоянными величинами. В реальности эти параметры меняются во времени.

Учет изменения параметров уравнения Ферхюльста приводит к далеко идущим последствиям, более точно отражающим реальную ситуацию. Если в классическом варианте уравнения Ферхюльста мы имеем, в конечном счете, единственно возможный финал - достижение предельного состояния, то при варьировании параметров возможны различные варианты, в том числе и гибель динамической системы, описываемой логистической кривой. Такое поведение системы характеризует «хаос» в природных системах.

Потеря устойчивости, что соответствует «хаосу» в природных системах, может произойти: 1) при воздействии на систему малых случайных возмущений типа белого шума, 2) при варьировании параметров логистического уравнения при численном решении уравнений.

В первом случае будем считать, что система в целом подвержена воздействию малых (по абсолютному значению), но постоянно действующих возмущений. В работе (Фрейдлин, Светлосанов, 1976) проведено исследование устойчивости состояния компоненты природной системы по отношению к малым случайным возмущениям типа «белого шума» и показано, что устойчивость состояния системы, описываемой кривой Ферхюльста, тем выше, чем больше значение α^3/β^2.

Рассмотрим второй случай исследования логистической кривой (Светлосанов, Кудин, Куликов, 2009). Определенной заменой переменных уравнение Ферхюльста можно свести к следующему уравнению с одним параметром *A*:

$$\frac{dx(t)}{dt}=A*x(t)*(1-x(t))$$

Хотя уравнение Ферхюльста, являясь нелинейным дифференциальным уравнением, имеет аналитическое решение, все же в подавляющем большинстве случаев решение нелинейных дифференциальных уравнений находят с помощью численных методов. При исследовании дискретного уравнения Ферхюльста возникает принципиально новая картина, которая фиксирует хаос в природных системах. Этот хаос можно наблюдать на рисунке 1, где даны два варианта расчета для значений a=2.6 и a=3.9 с одинаковыми начальными условиями $x_0=\{x_n\}$ и $t_0=\{n\}$ в интервалах Δt_n.

Рисунок 1. Зависимость решений *x(t)* в интервалах Δt_n и табличных значений $x(n) = x_n$

На рисунке 1 представлена ситуация, когда исследуемая динамическая система выходит из коридора устойчивых значений. Это второй пример появления хаоса в динамической системе, описываемой уравнением Ферхюльста.

Литература

Светлосанов В.А., Кудин В.Н., Куликов А.Н. Логистическая кривая – порядок и хаос в природных системах // Экологические системы и приборы.- 2009.- № 7.

Фрейдлин М.И., Светлосанов В.А. О влиянии малых случайных возмущений на устойчивость на устойчивость состояния экологических систем // Общая биология, 1976, № 5.

ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА РАСЧЁТА МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ ЗАПАСОВ ПРОДУКТИВНОЙ ВЛАГИ И СОСТАВЛЯЮЩИХ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПАХОТНЫХ ПОЧВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ РУССКОЙ РАВНИНЫ

Семендяев А.К.

ГУ “ВНИИСХМ”, Обнинск, Россия
artem.semendyaev@mail.ru

Аннотация: в докладе представлен обзор численной схемы расчёта динамики влагозапасов и запасов органического углерода в пахотном слое почвы для прогнозирования урожайности на территории ЕТ РФ.

Ключевыми параметрами при прогнозировании динамики состояния посевов и ожидаемой продуктивности сельскохозяйственных культур являются запасы продуктивной влаги и составляющие углеродного баланса органического вещества почвы.

Значительная пространственная изменчивость физических полей влагозапасов почвы, зависящая от большого числа разнородных факторов, привела к поиску метода получения информации о влагозапасах почвы на больших площадях – это расчётный метод, основанный на использовании метеорологической информации (Мещерская, Болдырева, Шапаева, 1982).

Расчеты влагозапасов ведутся для пахотного и метрового слоёв почвы, с марта по ноябрь включительно. Итоговые уравнения имеют вид:

$$W_{III}^{i} = W_X^{i-1} + b' Tz W_X^{i-1} / Wz + c' Rz\left(1 - W_X^{i-1} / Wz\right) + d',$$

$$W20_k = a_k W20_{k-1} + b_k T_k + c_k\left(R_{k-1} + R_k\right) + d_k,$$

$$W100_k = b_k W100_{k-1} + c_k \mathrm{W}20_k + d_k,$$

где: $Tz = \left(T_X^{i-1} + T_{XI}^{i-1} + T_{XII}^{i-1} + T_I^i + T_{II}^i + T_{III}^i\right)/6$, $Rz = 0.5\mathrm{R}_X^{i-1} + R_{XI}^{i-1} + R_{XII}^{i-1} + R_I^i + R_{II}^i + R_{III}^i$;

$I, II, ..., XII$ – календарные месяцы, общее обозначение – k; $i, i-1$ – текущий и предшествующий год; W_k^i – средние за март в i-м году запасы продуктивной влаги; $W20_k$ – средние за k-й месяц запасы продуктивной влаги в пахотном слое; $W100_k$ – средние за k-й месяц запасы продуктивной влаги в метровом слое; T_k^i – среднемесячная температура воздуха за k-й месяц в i-м году; R_k^i – сумма осадков за k-й месяц в i-м году; Wz, b', c', d' – индивидуальные для каждого субъекта РФ эмпирические коэффициенты; a_k, b_k, c_k, d_k – индивидуальные для каждого субъекта РФ эмпирические коэффициенты по месяцам.

Значимость влагозапасов почвы, как одного из показателей разрабатываемой системы мониторинга, можно определить по оценкам корреляции, представленным в «таблице 1».

Для мониторинга углеродного режима используется модифицированная версия модели круговорота углерода почвы RothC (Coleman, Jenkinson, 1996). Система разностных уравнений для расчета составляющих углеродного баланса органического вещества имеет вид:

$$C_1^{j+1} = C_1^j \exp\left(-a^{j+1} b^{j+1} c^{j+1} k_1/12\right) + 0{,}59 R^{j+1} + 0{,}49 F^{j+1},$$
$$C_2^{j+1} = C_2^j \exp\left(-a^{j+1} b^{j+1} c^{j+1} k_2/12\right) + 0{,}41 R^{j+1} + 0{,}49 F^{j+1},$$
$$C_3^{j+1} = C_3^j \exp\left(-a^{j+1} b^{j+1} c^{j+1} k_3/12\right) + 0{,}46 V^j P_x,$$
$$C_4^{j+1} = C_4^j \exp\left(-a^{j+1} b^{j+1} c^{j+1} k_4/12\right) + 0{,}54 V^j P_x + 0{,}02 F^{j+1},$$

где a^j – зависимость скорости разложения органического вещества почвы от температуры; b^j – зависимость скорости разложения органического вещества от влажности почвы; c^j – коэффициент, равный 0,6 при наличии растительного покрова, и 1 - при его отсутствии; V^j – суммарные потери органического углерода за данный месяц; P_x – зависящая от механического состава почвы доля потерь V^j.

В «таблице 2» представлены оценки тесноты статистических связей урожайности сельскохозяйственных культур и моделируемых запасов органического углерода в пахотном слое почвы за 1967-1995 гг. C_2 и C_3.

Таблица 1. Осредненные по регионам оценки коэффициентов корреляции для связей «урожайность - влагозапасы почвы»

Месяц, слой почвы		Данные реанализа				Данные наблюдений			
		Озимая пшеница	Озимая рожь	Яровой ячмень	Зернов. и зернобоб	Озимая пшеница	Озимая рожь	Яровой ячмень	Зернов. и зернобоб
Май	0-20	0,41	0,40	0,30	0,40	0,31	0,37	0,31	0,38
	0-100	0,36	0,41	0,31	0,40	0,18	0,26	0,21	0,26
Июнь	0-20	0,53	0,57	0,58	0,64	0,33	0,38	0,45	0,49
	0-100	0,49	0,54	0,51	0,59	0,26	0,31	0,40	0,43

Таблица 2. Оценки коэффициентов корреляции между урожайностью сельскохозяйственных культур и моделируемыми запасами органического углерода в пахотном слое почвы

Сельскохозяйственная культура	С2 (тС/га)				С3 (тС/га)			
	Октябрь	Апрель	Май	Июнь	Октябрь	Апрель	Май	Июнь
	Орловская область							
Озимая пшеница	0,709	0,638	0,642	0,632	0,725	0,695	0,652	0,624
Озимая рожь	0,823	0,723	0,725	0,723	0,804	0,752	0,702	0,668
Яровой ячмень	0,619	0,474	0,476	0,471	0,583	0,531	0,465	0,424
Зерн. и зернобобовые	0,702	0,559	0,562	0,555	0,662	0,605	0,538	0,495
	Республика Марий Эл							
Озимая пшеница	0,497	0,450	0,460	0,451	0,497	0,498	0,477	0,470
Озимая рожь	0,681	0,633	0,639	0,637	0,682	0,676	0,662	0,654
Яровой ячмень	0,204	0,136	0,145	0,133	0,202	0,207	0,174	0,159
Зерн. и зернобобовые	0,437	0,387	0,394	0,384	0,431	0,442	0,418	0,405
	Липецкая область							
Озимая пшеница	0,696	0,622	0,622	0,616	0,712	0,698	0,674	0,657
Озимая рожь	0,695	0,594	0,594	0,593	0,709	0,680	0,647	0,626
Яровой ячмень	0,368	0,225	0,228	0,227	0,382	0,340	0,291	0,266
Зерн. и зернобобовые	0,534	0,402	0,404	0,400	0,549	0,513	0,468	0,443

Результаты, представленные в «таблице 1» и «таблице 2», позволяют сделать вывод, что численный мониторинг запасов продуктивной влаги и составляющих углеродного баланса почвы обеспечивает приемлемый долгосрочный прогноз зерновых культур.

Литература

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. 243 с

K.Coleman, D.S. Jenkinson (Eds D.S. Powlson, P. Smith, J.U.Smith) A model for the turnover of carbon in soil [Text]: Evaluation of Soil Organic Matter Models using Existing Long-Term Datasets//Springer-Verlag, Heidelberg.- 1996.- Vol.37.-P. 237-246

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГУМИФИКАЦИИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

Семенова Н.Н.,Орлова Н.Е.

СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия
agro@bio.pu.ru

Аннотация: рассматриваются три подхода к моделированию динамики органического вещества в почве: на основе линейной модели, нелинейной модели и с использованием дробных производных, что в некотором контексте эквивалентно распределенному запаздыванию по времени. На примере дегумификации дерново-подзолистых почв, различающихся по своему гранулометрическому составу, показаны преимущества и недостатки всех трех подходов.

Введение

В математическом описании динамики органического вещества (ОВ) почв в настоящий момент преобладает аппарат современной теории динамических систем. В моделях динамики органического вещества в почве, основанных на таком математическом аппарате, как правило, выделяется несколько (от 2 и более) фракций, связанных друг с другом балансовыми (для линейных моделей) или более сложными соотношениями, например, включающими эффект насыщения, (для нелинейных моделей). Представление о почве как о гетерогенной среде, обладающей свойствами мультифракталов, позволяет использовать в описании динамики фракций органического вещества почвы интегральную форму связи. Все это приводит к системам обыкновенных дифференциальных уравнений, параметры которых характеризуют структуру и динамические свойства ОВ почвы. Анализ зависимости решений нелинейных систем уравнений от параметров дает возможность дифференцировать изменения в динамике ОВ для почв с различными свойствами. Целью предлагаемой работы являлось выделение наиболее адекватного математического описания с точки зрения интерпретации связей между параметрами модели и реальными процессами дегумификации конкретных почв.

Материалы и методы

Для оценки различий в изменениях гумусового состояния дерново-подзолистых суглинистой и супесчаной агрогенных почв Ленинградской области были разработаны три модели, относящиеся соответственно использованному математическому аппарату к линейным (ЛМ), нелинейным (НЛМ) и моделям с распределенным запаздыванием(. Линейные модели построены на предположении о линейности связей между запасами фракций ОВ и скоростями их трансформации. В нашей модели такие линейные связи являются функциями времени, а их параметризация осуществляется на основе экспериментального материала. В нелинейной модели используется соотношение,

предполагающее S-образную зависимость скорости трансформации некоторых фракций ОВ от поступления в почву свежего органического вещества. В модели, базирующейся на свойстве мультифрактальности почвы, используется уравнении кинетики дробного порядка, при этом интегральный показатель минерализации различных фракций ОВ объединяет эффекты неоднородности почвы как абиотической, так и биотической природы. Уравнение с дробной производной по времени соответствует уравнению с распределенным запаздыванием для случая степенной функции с отрицательным показателем γ и соответствующей нормировкой. Модели, включающие такие уравнения назовем фрактальными (ФМ).

Экспериментальный материал. на котором были апробированы модели составляют наблюдения за гумусовым состоянием дерново-подзолистых суглинистой и супесчаной агрогенных почв Ленинградской области. Наблюдения проводились в течении 25 и 38 лет с периодичностью обследования от 1 года до 5 лет.

Результаты и их обсуждение

Анализ экспериментального материала показал, что в результате уменьшения дозы внесения органических и минеральных удобрений, а затем и полного прекращения их внесения в период экономической перестройки 90-х годов во всех исследуемых почвах начался процесс дегумификации. Супесчаные почвы характеризовались максимальной скоростью этого процесса. При этом наблюдалось изменение состава гумуса и, прежде всего, перераспределение гумусовых веществ между фракциями в сторону снижения устойчивых форм гумуса, как для супесчаной, так и для суглинистой почв.

На рисунке показано соответствие результатов вычислений по линейной модели экспериментальным данным. Линейная модель отражает, следующий из анализа экспериментальных данных факт большей устойчивости системы гумусовых веществ к деградационным процессам для почв более тяжелого гранулометрического состава. Наихудшее совпадение с экспериментальными данными демонстрирует нелинейная модель, однако только эта модель дает возможность исследовать условия при которых процесс дегумификации может завершиться неоднозначно: не просто понижением содержания органического вещества в почве, а практически почти полным его исчезновением. Наиболее адекватно моделирует ситуацию фрактальная модель.

Рисунок 1. Соответствие расчетных и экспериментальных данных для двух типов почв

Выводы

1. Расчеты, проведенные по уравнению с интегральной формой связи и ее линейным и нелинейным аналогом, показали, что длительность процесса перехода от устойчивого состояния с нормальным содержанием органического вещества в почве к другому устойчивому состоянию с пониженным содержанием органического вещества наиболее адекватно отражает фрактальная модель.

2.Условия, при которых возможно крайне негативное развитие сценария дегумификации почв, возможно определить, только с использованием нелинейной модели.
3. Определение параметров линейной модели наименее трудоемко.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПЕСТИЦИДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ.

Семенова Н.Н. , Новожилов К.В., Сухорученко Г.И.
ГНУ ВИЗР РАСХН, Санкт-Петербург, Россия
vizrspb@mailru.com

Аннотация: предложен стандартизированный алгоритм сравнительной оценки экологической опасности локального загрязнения агробиоценозов пестицидами. В разработанный алгоритм включены индексы нагрузки пестицидов на компоненты агробиоценоза, интеграция которых основана на методе мультикритериального анализа. Индексы определяются с использованием динамических моделей взаимодействия пестицидов с компонентами агробиоценоза, что позволяет реализовать преимущества системного подхода в решении проблемы ранжирования пестицидов.

Современная стратегия оптимизации химического метода защиты растений ориентирована не только на повышение его эффективности, но и на сохранение полезных организмов. В связи с этим необходимо разработать алгоритм определения степени локальной экологической опасности пестицидов, применяемых в зональных системах защиты сельскохозяйственных культур от комплекса вредных объектов. Такой алгоритм позволит формировать ассортимент пестицидов, характеризующихся повышенной безопасностью.

С конца 80-х годов во Всероссийском институте защиты растений (ВИЗР) в этом направлении проводятся исследования и на основе системного подхода разрабатываются унифицированные методы сравнительной оценки локального загрязнения агробиоценозов с учетом процессов трансформации и транслокации пестицидов в почве и растительности (Новожилов и др., 2010). Априорная информация о динамике разрушения и длительности сохранения пестицидов в объектах окружающей среды является одной из существенных составляющих определения оптимальных регламентов их использования, так как только в этом случае возможно оценить реальную токсичность применяемых средств для основных компонентов агробиоценозов. Получение такой информации в полевых условиях достаточно трудоемко, что затрудняет ее учет в каждом конкретном случае. Использование имитационных моделей поведения пестицидов в агробиоценозах позволило изменить традиционные подходы к оценке опасности их применения. На основе таких моделей, позволяющих рассчитывать динамику разрушения пестицидов, с учетом локализации в почве и растительности, определен ряд частных критериев их экологической опасности, включающих экотоксикологические показатели, ряд параметров, характеризующих свойства почв и сельскохозяйственных культур, а также показатели, описывающие воздействие пестицидов на полезные организмы агробиоценоза.

Предлагаемый алгоритм оценки степени локальной экологической опасности пестицидов разделяется на две части: получение частных оценок экологической опасности пестицида для соответствующих компонентов агробиоценоза, и на их основе проведение интегральной оценки отклика агробиоценоза на применение того или иного препарата. Структура данного алгоритма представлена на рисунке. Схема получения частных оценок имеет блочную структуру и содержит блоки влияния пестицидов на следующие компоненты агробиоценоза: почву, защищаемое растение и полезную энтомофауну агробиоценоза. Обязательной составляющей этих блоков является соответствующая информационная база, которая включает стандартный набор данных, взятых из справочной литературы (характеристики свойств пестицидов и соответствующих компонент агробиоценоза), экспериментальные материалы по динамике содержания пестицидов в выделенных компонентах агробиоценоза, полученные инструментальными методами, а также данные по

их токсичности для представителей полезной энтомофауны в полевых условиях. Далее на основе созданной информационной базы проводится классификация изучаемых токсикантов по степени их экологической опасности с помощью скрининговых (упрощенных) моделей их поведения в соответствующем компоненте агробиоценоза, а также полученных с использованием указанных моделей индексов. Интегральная оценка формируется на основе метода мультикритериального анализа с применением балльных шкал и алгоритмов МАИ (метода анализа иерархий). Реализация предложенного алгоритма для каждого блока имеет свои особенности, которые учтены в разработанной компьютерной модели PESTLOAD.

Рисунок. Структура алгоритма определения интегрального показателя экологической опасности пестицидов

Предложенный подход к проведению классификации пестицидов по степени их экологической опасности был апробирован применительно к фитосанитарной обстановке в агробиоценозах пшеницы Саратовской области (левобережная часть). Рассчитанная с использованием компьютерной системы PESTLOAD шкала степени опасности применяемых инсектицидов для данного агробиоценоза пшеницы имеет в порядке убывания следующий вид: пиретроиды - фосфорорганические инсектициды – фенилпиразолы - неоникотиноиды. Интегральные оценки групп пестицидов для борьбы с выбранными вредителями при некоторых сочетаниях метеоусловий коррелируют с таким распространенным показателем экологической опасности пестицидов, как общая токсикологическая нагрузка на агробиоценоз.

Интегрированная информационная модель локальной оценки экологической опасности пестицидов в агробиоценозах сельскохозяйственных культур PESTLOAD прошла государственную регистрацию (№ 16038 от 30 июля 2010) и может быть использована для проведения зональной классификации ассортимента пестицидов, а также для оценки экологической безопасности новых пестицидов. Дальнейшее развитие этой модели предусматривает направленное использование МАИ в структуре разработанного алгоритма.

Литература

Новожилов К.В., Сухорученко Г.И., Семенова Н.Н., Волгарев С.А, ПитулькоВ.М. Оценка экологической опасности пестицидов для агробиоценозов// Региональная экология, 2010, № 1-2 (28), с. 73-79

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭВОЛЮЦИИ КЛИМАТА И АГРОСФЕРЫ РОССИИ НА ПРОТЯЖЕНИИ XX И XXI-ГО СТОЛЕТИЙ

Сиротенко О.Д., Павлова В.Н., Семендяев А.К.

Государственное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии», Обнинск, Россия
vnp2003@bk.ru

Аннотация: предлагается система численного мониторинга изменений климата, углеродного режима почв и продуктивности агросферы. Рассматриваются прогностические возможности этой системы. Обсуждается стратегия адаптации сельского хозяйства России к предстоящим изменениям климата.

Согласно Климатической доктрине, упреждающая адаптация к последствиям глобальных изменений климата относится к числу приоритетных направлений политики России. Для решения этой проблемы достаточно эффективной представляется концепция коэволюции, предложенная Н.Н. Моисеевым для описания взаимодействия общества и биосферы. Для исследования коэволюции климата и агросферы разработана имитационная система, включающая:

- модели продуктивности агроэкосистем;
- модели водно-теплового режима и увлажненности агросферы;
- модели углеродного цикла пахотных почв;
- модели климатических рисков для сельского хозяйства;
- модели оптимизации размещения сельскохозяйственных культур.

На этом основании реализована система непрерывного мониторинга агроклиматических показателей, составляющих углеродного баланса и урожайности зерновых культур, работающая с месячным шагом на протяжении XX и XXI-го столетий (до 2011 г. в ретроспективном, а затем до 2100 г. – в прогностическом режиме).

Численная схема мониторинга влагозапасов почвы воспроизводит порядка 55-60 % межгодовой дисперсии влагозапасов почвы в течение теплого периода года на территории Европейской части России. Влагозапасы почвы являются ключевым параметром, определяющим динамику органического вещества и продуктивность агросферы. Доля объясненной дисперсии урожайности – интегрального показателя системы мониторинга – составляет в среднем 70 %, что позволяет говорить о достаточной адекватности имитационной системы.

Представим результаты моделирования агросферы и климата в ретроспективном режиме. В таблице 1 приведены последние оценки трендов важнейших агроклиматических показателей в результате современного глобального потепления (T- температура воздуха, R – сумма осадков). Сопоставление этих оценок с аналогичными величинами за 1976-2004 гг. показывает, что тренды температуры воздуха за летний и осенний периоды растут, а тренды температуры воздуха зимнего периода падают. За последнее десятилетие почти по всей территории РФ тренды январской температуры стали отрицательными. Прекратился наблюдаемый ранее рост зимних и весенних осадков. В таблице 2 представлена реакция сельского хозяйства на современные климатические изменения.

Положительные тренды урожайности, особенно значимые для озимых зерновых, сохраняются. Однако, на территории Центрального ФО и некоторых других регионов в

результате усиления аридизации климата отрицательные тренды климатообусловленной урожайности становятся преобладающими.

Для прогнозирования продуктивности агросферы при изменении климата необходимы сценарии изменений климата, рассчитанные с помощью глобальных климатических моделей, которые более или менее удовлетворительно воспроизводят структуру полей средних значений, сезонные изменения и тренды метеорологических полей. Рассматривается также возможность прогноза изменений климата на основании регрессии с глобальной концентрацией CO_2 в качестве предиктора. Предел предсказуемости Лоренца является, по-видимому, причиной невозможности точного воспроизведения межгодовой изменчивости метеорологических полей, что ограничивает значимость климатических прогнозов.

Таблица 1. Обновленные оценки трендов агроклиматических показателей за период современного глобального потепления с 1976 по 2010 гг.

Федеральный округ	Изменения показателей тепло- и влагообеспеченности (показатель/ 10 лет)											
	зима		весна		лето		осень		ГТК Селянинова	Индекс сухости Будыко	Число дней с темпера-турой >10°С	Суммы температур > 10° С
	Т, °С	R, мм	Т, °С	R, мм	Т, °С	R, мм	Т, °С	R, мм				
Центральный	0,74	-3	0,47	-1	0,73	-14	0,57	0	-0,115	0,064	3	131
Северо-Западный	0,90	6	0,36	6	0,57	-1	0,47	-3	-0,032	0,026	3	106
Приволжский	0,53	0	0,47	6	0,57	-12	0,65	-5	-0,081	0,056	2	93
Южный	0,34	1	0,27	9	0,64	-4	0,53	12	-0,019	-0,015	4	134
Уральский	0,27	1	0,45	8	0,25	-4	0,65	0	-0,023	0,015	2	62
Сибирский	0,06	2	0,64	3	0,25	7	0,23	2	0,011	-0,003	3	55
Дальневосточный	0,46	5	0,3	8	0,26	6	0,44	-4	0,022	0,011	3	68
Россия	**0,41**	**2**	**0,45**	**5**	**0,42**	**-2**	**0,46**	**0**	**-0,033**	**0,021**	**3**	**84**

Таблица 2. Уточненные оценки изменений климатообусловленной урожайности зерновых культур по регионам России за период с 1975 по 2009 гг.

Федеральный округ	Зерновые и зернобобовые в целом	Озимая пшеница	Яровой ячмень	Зерновые и зернобобовые в целом	Озимая пшеница	Яровой ячмень
	ц/га за 10 лет			% за 10 лет		
Приволжский	0,33	1,28	0,41	2,3	7,1	3,1
Южный	0,27	0,99	0,09	1,2	3,7	0,5
Центральный	-0,09	0,38	-0,03	-0,5	1,9	-0,2

Таблица 3. Оценки возможных изменений урожайности к 2020 г. и 2040 г. при реализации ансамблевого климатического сценария на территории Воронежской области с учетом (2) и без учета (1) изменений содержания лабильного органического вещества

Сельскохозяйственная культура	Изменение урожайности							
	2011-2030 гг.				2041-2060 гг.			
	ц/га		%		ц/га		%	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Зерновые	-0,8	-1,0	-4,7	-5,9	-1,9	-2,5	-11,2	-14.7
Озимая пшеница	-0,2	-0,6	-1,0	-2,9	-0,7	-1,5	-3,4	-7,3
Яровой ячмень	-1,3	-1,4	-7,5	-8,0	-3,0	-3,4	-17,2	-19,5
Подсолнечник	+0,2	+0,2	+1,9	+1,9	+0,6	+0,5	+5,8	+4,8
Сахарная свекла	-4,6	-5,0	-2,9	-3,2	-7,8	-8,9	-4,9	-5,7

В таблице 3 представлены ожидаемые изменения урожайности при реализации многомодельного (ансамблевого) сценария. Связанный с потеплением рост аридности

климата ведет к снижению урожайности многих культур, за исключением наиболее теплолюбивых и засухоустойчивых. Снижение содержания лабильного органического вещества усиливает отрицательный эффект потепления.

Важнейшим направлением использования предлагаемой системы мониторинга является прогноз урожайности сельскохозяйственных культур: краткосрочный, долгосрочный и стратегический с заблаговременностью порядка полугода, года и 3-5 лет соответственно. Показано, что привлечение данных о динамике содержания и скорости разложения четырех моделируемых фракций органического вещества почвы в качестве предикторов позволяет существенно повысить заблаговременность и точность прогнозов урожайности. Приводятся результаты проверки точности численных схем прогнозов урожайности зерновых культур для территории Центрального, Приволжского и Южного ФО.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИК АЗОТА И ВЛАГИ В АГРОЦЕНОЗЕ

Сорокин О.Д.[1], Сорокина О.Л.[2]

[1]*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия*
magnum46@ngs.ru
[2]*Сибирский научно-исследовательский институт земледелия и химизации сельского хозяйства СО РАСХН, Краснообск, Россия*
olga_sorokina@ngs.ru

Аннотация: модель агроценоза представляет собой программу для персональной ЭВМ, с помощью которой ведётся база данных, необходимых для подготовки различных сценариев почвенных и погодных условий с последующим запуском цикла имитационного моделирования процессов в агроценозе: динамики форм азота, запасов почвенной влаги, формирования биомассы зерновой культуры.

Общая информация

Модель представляет из себя компьютерную программу с простым интерфейсом, ориентированную на исследователей в области сельского хозяйства, почвоведов, биологов. Программа функционирует на персональных компьютерах под управлением операционной системы Windows.

Основная идея моделирования – отслеживание ежедневного прироста биомассы выбранной культуры (пшеница, ячмень и т.п.) в зависимости от динамик двух важнейших, по крайней мере для региона Западной Сибири, факторов продуктивности агроценоза – содержания в почве влаги и минерального азота. Ежедневное изменение этих параметров отражается на дисплее в виде чередующихся метровых почвенных разрезов, предоставляя дополнительную информацию о процессах перераспределения влаги и азота.

Другие важные факторы – температура пахотного слоя почвы, осадки (полив), Фотосинтетически Активная Радиация – могут задаваться в виде массивов ежедневных значений перед началом цикла моделирования.

По ходу программной имитации продукционного процесса возможно воздействие на агроценоз в виде "подкормок" азотными удобрениями.

Совокупность входных параметров модели можно разбить на три группы:

а/ константы, отражающие относительно стабильные свойства почвы, культуры, физико-химических процессов (например, перенос влаги ниже метрового слоя почвы);

б/ параметры, значения которых можно установить перед началом нового цикла моделирования (конкретизация задачи, привязка к реальным условиям):

– норма высева зерна яровой культуры, кг/га,

– начальное содержание нитратного азота в слое 1-100 см, кг/га

– содержание подвижного азота органического вещества почвы в слое 40 см,
– полевая влагоемкость почвы,
– начальное содержание влаги в слое 1-100 см, мм,
– минимальная скорость испарения влаги с поверхности почвы, мм/сутки
– влажность разрыва капилляров, мм/см профиля,
– потенциальная продуктивность ценоза, ц сухой биомассы/га,
– дата начала процесса моделирования;

в/ модельные или реальные функциональные зависимости, задаваемые либо в виде массивов значений:

– удельный вес почвы для каждого сантиметра профиля,
– среднесуточная температура пахотного слоя,
– распределение начального содержания нитратного азота для каждого сантиметра метрового слоя почвы,
– начальное распределение влаги по профилю в метровом слое,
– активная радиация для каждого дня вегетационного периода;

либо в виде математических зависимостей.

На выходе программы – сводная таблица всех интересующих исследователя показателей для каждого дня вегетации: температуры почвы слоя 1-20 см; содержания влаги в слоях 1-20, 1-100 см; содержания нитратного азота в слое 1-20 см; уровня аммонификации и денитрификации; накопления общего азота биомассы; динамики надземной биомассы.

По завершении прогона модели вычисляются балансы для влаги и азота.

Для наглядного представления динамик основных параметров в программе имеется возможность выдачи графиков изменения содержания влаги и нитратного азота в 20- и 100-сантиметровом слоях почвы, а также прироста биомассы по ходу продукционного процесса.

Некоторые теоретические предпосылки модели агроценоза.

1. Накопление биомассы – функция количества перехода нитратного азота из почвы в растения. Это, безусловно, упрощающее предположение относительно реального продукционного процесса, но, по экспертным оценкам, отражающее 70-80% общей суммы факторов продуктивности агроценоза:

$Bm = F(C_w,C_d,N_b)$; прирост биомассы в i-й день

C_w – влага, модельная функция влажности почвы слоя 1-20 см; C_d – обобщенный фактор внешней среды (ФАР, температура почвы), модельная функция с пиком на 45-й день вегетации; N_b – содержание нитратного азота в надземной биомассе.

2. Количественный переход нитратного азота из почвы в растения – функция дня вегетации, влажности почвы, содержания нитратного азота почвы:

$Nb(i) = F(Ze,N_{20},W_{20},Fd)$; прирост нитратного азота в надземной биомассе, кг/га;

Ze – норма высева зерна, кг/га; N_{20} – содержание нитратного азота в слое 1-20 см, кг/га; W_{20} – содержание влаги в почве слоя 1-20 см, мм; Fd – обобщенный фактор внешней среды (ФАР, температура почвы),

Текущая влажность почвы определяется по балансу испарения с поверхности почвы, стока ниже 100-сантиметровой границы и возможного поступления влаги в виде осадков (полива).

Испарение и транспирация влаги, функция параметров:

$Isp = F(T,W_{20},Far,Li)$; испарение, мм/сутки, Max=3 мм; T – средняя температура почвы; W_{20} – влажность почвы слоя 1..20 см, Far – лучистая энергия, Li – площадь листьев;

В случае осадков (полива) определяется промачивание верхних горизонтов до полной полевой влагоемкости, затем моделируются процессы перераспределения влаги (гравитация, диффузия) в нижние горизонты.

Ежедневно вычисляются уровни процессов азотного обмена почвы: перехода нитратного азота в органические соединения почвы, (иммобилизация азота, аммонификация), нитрификации (переход азота почвенной органики в нитратную форму), денитрификации (разложение нитратного азота до молекулярного и окислов).

$Im = F(W_{20},N_{20},T)$ иммобилизация, кг/га/сутки;

$Nf = F(W_{20},H_{40},T)$ нитрификация, кг/га/сутки;

$Dn = F(N_{20},T,W_{20})$ денитрификация, кг/га/сутки;

W_{20} – влага в слое 1-20 см, N_{20} – нитратный азот в слое 1-20 см, H_{40} – общий азот органического вещества почвы, T – температура почвы, °C.

Температура почвы задается для каждого дня либо реальной зависимостью, взятой из конкретного опыта, либо массивом модельных значений функциональной зависимости по гауссовой кривой с пиком на середину вегетационного периода, зашумленной генератором случайных чисел.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА НАБУХАНИЯ ТЯЖЕЛОГЛИНИСТЫХ ЗАСОЛЕННЫХ ПОЧВ

Сулейманов Н.Р.

Институт почвоведения и агрохимии НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан
terrasoil@rambler.ru

Аннотация: набухание является полифункциональным процессом, сильно зависящее от катионного потенциала поверхности почвы, концентрации порового раствора и насыщенностью почвы органическими и минеральными коллоидами. Предлагается математическая модель расчета набухания глинистых засоленных почв, включающие параметры, учитывающие специфику кинетики обменных и обратимых процессов происходящие дисперсной среде при набухании.

Введение

Исследование кинетики процесса набухания глинистых засоленных почв, дает возможность определит главные составляющие процесса, среди которых дисперсность почвенной среды и минералогический состав, обогащенность органическими и минеральными коллоидами, концентрация почвенного раствора и наличие щелочных катионов в составе поглощающего комплекса (Овчаренко, 1961, Злочевская, 1969, Сулейманов, 2002, 2005, 2007, Suleymanov, Abbasova, 2007, Аббасова, 2009). Обстоятельство обуславливает разработку параметров включающие показатели почв, прямо или косвенно выражающие элементарные процессы, происходящие при увлажнении почв в виде сводных парадигм, в составе математических формул расчета объема набухания тяжелоглинистых почв.

Объекты и методы

Исследовались тяжелогинистые, набухающие, засоленные почвы низменных районов Азербайджана. География исследований охватывает степи Кура-Аразинской низменности и северо-западные прибрежные полосы Каспийского моря. Набухание почв исследовалась в лабораторных условиях на образцах с нарушенной структурой, с помощью прибора В.С. Василева, при восходящим капиллярном насыщении.

Результаты

Разработанная математическая модель в целом учитывает доминирующие элементарные почвенные процессы, возникающие при капиллярном насыщении тонкодисперсной среды. Формула имеет следующий вид:

$$V_s = M^{0,25} \exp\left(1 - ax^{-1}\right) \ln RK_{sk}^{-1} \quad (1)$$

где, V_s – ёмкость набухания почвы, %; M – расчетная концентрация почвенного раствора, определяется по соотношению степени засоления к полной влагоёмкости (ПВ) почвы, г $л^{-1}$; x–содержание гумуса почвы, %; a – коэффициент, учитывающий содержание грубого гумуса; R– параметр, характеризующий соотношения потенциалов щелочных и нейтральных обменных катионов почвенного раствора и почвенно-поглощающего комплекса (ППК) почвы. Формула расчета имеет следующий вид:

$$R = 2\left(R_m - R_u\right) = 2\left(Na_m / Ca_m^{0,5} - Na_u / Ca_u^{0,5} \right) \quad (2)$$

где, R_m , R_u –параметры характеризующие потенциал почвеного раствора и емкости поглощения почвы; Na_m, Ca_m , Na_u ,Ca_u – соответственно содержание натрия и кальция в составе почвенного раствора и в ППК, *мэкв*.

K_{sk} – параметр характеризующий плотность катионов поверхности почвенных частиц. Расчитывается следующей формулой:

$$K_{sk} = \sum K / A \quad (3)$$

где, K – содержание поглощенных катионов, *мэкв*; A – площадь поверхности почвенных частиц, кв.м.

Структура формулы 1 состоит из трех блоков параметров, которые учитывают процессы формирующие набухание. Концептуальный анализ структуры формулы показывает, что достигнута оптимальная согласованность обеспечения комплексности подхода исследования, который является необходимым условием при изучении природных явлений.

Сравнительный анализ результатов экспериментальных и расчетных показателей набухания почв потверждает сказанное (таблица 1).

Таблица 1. Расчетные и експериментальные данные набухание почв Азербайджана

Наименование низменности	Засоленность почв, %	Тип засоления	R, Na $Ca^{-0,5}$	Сумма катионов, mekв	K_{ck} , x 10^{-3}	Емкость набухания, %		Погрешность, %
						экспери-ментальный	расчетный	
Сиязянь-Сумгаитский массив	1,974	хс	1,008	58,57	2,7693	16,67	16,01	3,95
Ширваньская степь	3,311	хс	0,299	60,53	3,2740	11,80	12,57	6,50
Карабахская степь	0,235	сс	9,017	18,83	1,1632	23,30	22,12	5,00
Муганьская степь	1,694	хс	0,358	48,18	2,6061	17,24	15,17	12,0
Мильская степь	1,526	хс	0,301	48,58	2,8325	12,35	13,30	7,70

* хс, сс – соответственно хлоридно-сульфатный, сульфатно-содовый тип засоления почв

Из таблицы видно, что погрешность между расчетными и экспериментальными данными не велики, она находится в пределах 3,95-7,7 %, за исключением показателей почв Муганьской степи. По мнению автора, это связано с повышенным содержанием катиона магния в составе емкости поглощения почв названной степи, отличающегося от остальных территорий низменных районов.

Выводы

Разработанная математическая модель в целом учитывает доминирующие элементарные почвенные процессы, стимулирующие набухание: расчетная концентрация

почвенного раствора, содержание гумуса, потенциалов щелочных и нейтральных обменных катионов почвенного раствора и почвенно-поглощающего комплекса. Адапдативность модели, относительно экспериментальных данных составляет 3,95-7,7 процентов.

Литература

Аббасова Р.Я. Методы обеспечивающие обратимость процесса засоления в естественных солончаках Сиязань-Сумгаитского массива: Дис. ... док. фил. сельхоз. наук.- Баку, 2009.- 115 с.

Злочевская Р.И. Связанная вода в глинистых грунтах.- М.: МГУ, 1969.- 174 с.

Овчаренко Ф.Д. Гидрофильность глин и глинистых минералов.- Киев: Изд. АН Украинской ССР.- 1961. -291 с.

Сулейманов Н.Р. Критерии оценки физического состояния набухающих почв со смешанной структурой. Тез. док. Всерос. Конф. «Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям », М.: 2002.- С. 44-45.

Сулейманов Н.Р. Понятие реальной пористости и оценка ее в набухающей почвенной среде со смешанной структурой. Тез. док. Всерос. Конф. «Устойчивость почв к естественным и антропогенным воздействиям», М.: 2002.- С.115.

Сулейманов Н.Р. Объяснение движения влаги в почве из позиции изменчивости дисперсной среды и обратимости процессов // Труды II Съезда Общества Почвоведов Азербайджана, т. XVI, ч. II, Баку. - 2005.- С.344-350, (на азерб. языке).

Сулейманов Н.Р., Аббасова Р.Я. Связь между кинетикой набухания и гидрологическими константами почвы // Матер. Всерос. конф. «Почвы Сибири: генезис, география, экология и рациональное использование» посвященное 100-летию Р.В.Ковалева, Новосибирск: 2007.- С.168-171.

Suleymanov N.R., Abbasova R.Y. Relation between kinetics of swelling and hydrolytic constants of soil // Ninth Inter national Congress. Baku: 2007.- P.452-455.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНЫЕ РЕШЕНИЯ

Суховольский В.Г.

Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия
soukhovolsky@yandex.ru

Аннотация: анализируются современные методы экологического моделирования, рассмотрены проблемы, возникающие при попытках моделирования с помощью балансовых дифференциальных уравнений. Рассматриваются возможности использования в качестве инструментов экологического моделирования альтернативных подходов, в частности, моделей - аналогов моделей температурных фазовых переходов в физических системах.

В настоящее время можно говорить о диссонансе между простотой базовых экологических моделей (уравнения Мальтуса и Ферхюльста, различные варианты системы уравнений Лотки-Вольтерра, система уравнений Колмогорова), излагаемых в учебниках по математической экологии, и сложностью согласования этих модельных представлений с реальным поведением сложных экологических сообществ и систем. Возникают как две дисциплины - «бумажное» экологическое моделирование на основе положений из учебников, где все поставленные проблемы легко решаются, и реальное моделирование, для которого быстро выясняется, что применить учебники к конкретным экологическим ситуациям часто (всегда?) не получается.

Перечислим лишь некоторые из проблем, возникающих при использовании для моделирования реальных процессов, происходящие в сообществах и экосистемах, методов, излагаемых в учебниках по математической экологии:

- неясен статус балансовых уравнений, используемых в математической экологии – это точные уравнения или некоторые приближения? Если это точные уравнения, почему они так часто (не хочу говорить – всегда) не согласуются с наблюдениями? Если это приближение, то какова ее точность и в каком учебнике можно об этом почитать?

- если задачу моделирования сообществ и экосистем со взаимодействующими компонентами можно представить как некоторый вариант задачи многих тел, то как представить с помощью системы балансовых уравнений точные решения для произвольного числа n взаимодействующих тел (считая, что, во всяком случае, n > 3)?
- если используемые уравнения неточны или не решаются точно, то каким может быть формализм теории возмущений?
- как учесть воздействия внешних модифицирующих факторов на поведение компонентов экосистемы? В балансовых уравнениях прямо влияние модифицирующих факторов не учитывается, возможно, поэтому так много проблем возникает при попытках описать эффекты, связанные с климатическими изменениями.
- как учесть некоммутативность внешних воздействий на популяции? Если на популяцию с численностью X действуют регулирующих или модифицирующих фактора, приводящих к гибели части популяции и характеризуемых нелинейными операторами $\boldsymbol{F(X)}$ и $\mathbf{G(X)}$ ($\boldsymbol{X_{out} = F(X_{in})X_{in}}$, $\boldsymbol{X_{in}}$ – начальное значение численности популяции до воздействия фактора $\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{F(X) < 1}$) то в общем случае воздействие этих операторов – некоммутирующее, то есть $\mathbf{[G(X)(F(X)X_{in}) - F(X)(G(X)X_{in})] \neq 0}$. Конечно, если последовательность действия факторов известна, то их суммарное воздействие можно попытаться вычислить. Но если эта последовательность не известна или факторы действуют одновременно (что бывает сплошь и рядом), то как вычислить результирующее воздействие для некоммутирующих операторов воздействия?
- по классификации взаимодействий, основанной на сочетании знаков коэффициентов в членах, описывающих взаимодействия между популяциями в системе уравнений Лотки-Вольтерра, взаимодействия между хищником и жертвой и между паразитом и хозяином эквивалентны. Однако ни один полевой эколог с таким определением не согласится. Взаимодействие хищник – жертва обязательно ведет к гибели жертв, взаимодействие «паразит – хозяин» более вариабельно и не всегда кончается смертью или даже уменьшением численности популяции хозяина. Таким образом, необходимо как-то уточнить или заменить классификацию, основанную на форме балансовых уравнений;
- имея в уравнении Ферхюльста два свободных параметра, нетрудно post factum подогнать под эту кривую данных экспериментов или наблюдений. Но можно ли получить значения параметров уравнения Ферхюльста из некоторых «первых принципов», еще до того, как будет проводиться эксперимент или наблюдение изучаемого экологического объекта?
- в физике для описания объектов используется большое число показателей (масса, энергия, скорость, ускорение, спин, изоспин, странность, цвет и т.д.). В математической экологии в качестве базовых характеристик используются существенно меньшее число показателей – масса, численность (плотность), соотношение полов. Этого достаточно? Но массы особей в уравнениях Лотки-Вольтерра нет – или она не нужна для описания, например, плодовитости самок у насекомых (зависящей от массы особей)? И необходимы ли дополнительные показатели и уравнения для описания, например, фазовой изменчивости особей в популяции по Б. Уварову?

Перечисление недостатков классической математической экологии можно продолжить. В целом по сравнению с «соседними» науками, такими, как математическая экономика и математическая физика, математическая экология во многом представляется дисциплиной архаичной, «застрявшей» где-то между 1838 (выход работы П.Ферхюльста) и 1936 (публикация статьи А.Н.Колмогорова) годами. В этой ситуации естественно поставить вопрос о расширении методов и аппарата математической экологии с тем, чтобы было возможно ставить и решать описанные выше проблемы.

Безусловно, мало надежды на то, что удастся быстро создать всеобъемлющую теорию описания и моделирования экологических систем. Более реально рассмотреть возможности построения новых подходов к описанию частных экологических ситуаций.

В настоящей работе предлагаются подходы к моделированию критических явлений в лесных экосистемах (вспышек массового размножения насекомых, лесных пожаров) и сукцессионных процессов в лесу (смена пород и изменение функции распределения деревьев в насаждении по возрасту) с учетом как взаимодействий компонентов экосистемы, так и воздействия внешних экологических факторов (например, климатических).

Критические явления в экосистемах (вспышки массового размножения насекомых, лесные сукцессии, лесные пожары, ветровалы) предлагается моделировать как фазовые переходы второго рода с использованием математического формализма, предложенного Л.Д.Ландау (1937). В рамках этого подхода климатические и другие модифицирующие факторы рассматриваются как внешние экологические поля.

Для описания воздействия некоммутирующих факторов на популяцию предлагается рассмотреть формализм интегралов по экологическим траекториям – аналог интегралов Фейнмана (Фейнман, Хибс, 1968).

Более детально описание всех этих подходов для конкретных сообществ и экосистем представлено отдельно (Суховольский и др., 2011; Тарасова, Суховольский, 2011; Овчинникова, Суховольский, 2011; Ковалев, 2011).

Работа поддержана РФФИ (гранты №№ 09-04-00412 и 10-04- 00256).

МОДЕЛИ ВСПЫШЕК МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛОГ МОДЕЛЕЙ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ВТОРОГОРОДА

Суховольский В.Г. [1], Пальникова Е.Н. [2], Тарасова О.В. [3]

[1]*Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия*
soukhovolsky@yandex.ru

[2]*Сибирский государственный технологический университет, Красноярск, Россия*
e-palnikova@mail.ru

[3]*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*
olvitarasova2010@yandex.ru

Аннотация: вспышки массового размножения лесных насекомых рассматриваются как фазовые переходы второго рода. Исходя из этих представлений, определяются основные переменные, характеризующие такой фазовый переход, описывается процедура верификации модели с использованием данных полевых измерений.

Вспышки массового размножения лесных насекомых характеризуются резким – за один – два сезона возрастанием плотности популяции насекомых от величин порядка 0.01 – 0.1 особи на учетную единицу (дерева, площадку и т.п.) до 10^4 – 10^5 штук на учетную единицу. Кроме того, резко увеличивается площадь очага массового размножения – территории, в пределах которой плотность популяции резко возрастает. Развитие вспышки массового размножения насекомых приводит к значительным повреждениям лесных ценозов. Так, в ходе вспышек сибирского шелкопряда Dendrolimus superans sibiricus Tschetv. возможно повреждение насаждений на территории в сотни тысяч гектаров.

Феноменологическая теория популяционной динамики дает качественное описание причин, приводящих к возникновению вспышек массового размножения насекомых (Исаев, Хлебопрос, 1973; Исаев и др, 2001). Однако этот подход не позволяет оценить количественные параметры популяционной динамики, определяющие риск возникновения вспышки, и оценить характер влияния модифицирующих факторов (прежде всего, погодных) на возникновение вспышек.

Ранее для описания вспышек массового размножения лесных насекомых была предложена модель вспышек как фазовых переходов второго рода (Суховольский и др, 2005). Согласно этому подходу, взаимодействие насекомых с насаждением характеризуются

следующими переменными: параметром порядка $\boldsymbol{q}$ – долей деревьев в насаждении, на которых встречались насекомые (измеряемая переменная), плотностью $\boldsymbol{X}$ популяции и переменной $\boldsymbol{G}$ – функцией экологического риска. Вообще говоря, $\boldsymbol{G}$ – неизмеримая в полевых условиях величина, но предполагается, что в стабильном или метастабильном состоянии $\boldsymbol{G \Rightarrow min}$.

Для описания связи между функцией экологического риска $\boldsymbol{G}$, параметром порядка $\boldsymbol{q}$ и плотностью **X** популяции используется аналог уравнения Ландау (Ландау, 1937; Ландау, Лифшиц, 1964):

$$G = G_0 + a(X - X_r)q^2 + bq^4 \qquad (1),$$

где $\boldsymbol{G_0}$, $\boldsymbol{a}$, $\boldsymbol{b}$ – константы, $\boldsymbol{X_r}$ – критическая плотность популяции (в феноменологической модели Исаева-Хлебопроса она соответствует переходу популяции из стабильно разреженного состояния в фазу вспышки).

Из условия минимума величины $\boldsymbol{G}$ в стабильном или метастабильном состоянии находится связь между $\boldsymbol{q}$ и $\boldsymbol{X}$:

$$q^2 = \begin{cases} 0, \; X > X_r \\ \dfrac{a}{2b}(X_r - X) \end{cases} \qquad (2)$$

Переменные q и X, использованные в модели, измеримы в полевых наблюдениях, и в связи с этим можно верифицировать модель фазовых переходов и вытекающее из нее уравнение (2). На рисунке 1 отражена связь между переменными уравнения (2) для популяции соснового шелкопряда в сосновых борах юга Сибири, полученная по данным ежегодных полевых наблюдений авторов в течение 1979 – 2009 гг.

Рисунок 1. Фазовые переходы в популяции соснового шелкопряда *Dendroloimus pini* L. в сосняках Краснотуранского бора (юг Красноярского края)

В модели с одним параметром порядка существует две фазы, в которых может находиться популяция: стабильно-разреженная фаза и фаза вспышки. В более сложной модели рассматриваются два параметра порядка: дополнительно к величине $\boldsymbol{q}$ водится параметр порядка $\boldsymbol{w}$, характеризующий соотношение особей с разным фенотипом в популяции. Тогда получим:

$$G = G_0 + a_q(X - X_r)\cdot(q^2 + w^2) + b(q^2 + w^2)^2 \qquad (3)$$

Для модели с двумя параметрами порядка можно выделить четыре фазы, в которых может находиться система «лес - насекомые» (Суховольский, 2009).

Кроме показателей плотности популяции и параметров порядка, для описания вспышки массового размножения вводятся такие характеристики, как интенсивность $\boldsymbol{h}$ внешнего экологического поля (так учитывается влияние внешних модифицирующих факторов, таких как климатические), восприимчивость $\left(\frac{\partial q}{\partial h}\right)^{-1}$ (описывает изменение параметра порядка при изменении внешнего поля), заселяемость $\tilde{C} = -X\frac{\partial^2 G}{\partial X^2}$ (характеризует освоение деревьев насекомыми с увеличением плотности X популяции).

Литература

Исаев А.С., Хлебопрос Р.Г. Принцип стабильности в динамике численности лесных насекомых // ДАН.– 1973.– т.208, № 1.– С.225 – 228.

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.

Ландау Л.Д. К теории фазовых переходов // ЖЭТФ, 1937, т.7, вып.1.- С.19 – 32.

Ландау Л.Д., Лифшиц Статистическая физика.- М.: Наука, 1964.– 567 с.

Суховольский В.Г., Пальникова Е.Н., Тарасова О.В., Карлюк А.Ю. Модель вспышки массового размножения лесных насекомых как фазового перехода второго рода// ДАН.– 2005.- Т. 403, № 4.- С.551 – 553.

МОДЕЛИ ИНВАЗИЙ И РИСКОВ ВСПЫШЕК МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ НА НОВЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Тарасова О.В.[1], Суховольский В.Г. [2]

[1]*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*
olvitarasova2010l@yandex.ru
[2]*Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия*
soukhovolsky@yandex.ru

Аннотация: рассмотрены модели инвазии лесных насекомых на новые территории, описан подход к оценке рисков вспышек массового размножения инвазийных видов.

В связи с ростом товарооборота, перемещением по планете людей, транспортных средств (автомашин, морских и речных судов, поездов, самолетов и т.п.) и грузов возрос риск переноса на новые территории различных видов растений и животных, и, в частности, лесных насекомых.

Обычно при анализе рисков инвазии лесных и сельскохозяйственных насекомых основное внимание обращается на оценки вероятности заноса особей инвазийных видов на новые территории и оценке в связи с этим эффективности мер карантинной защиты. В настоящей работе этот этап инвазии не рассматривается. Считается, что тем или иным способом особи некоторого вида попали на новую территорию и анализируются процессы, которые могут происходить после попадания особей инвазийного вида на новую территорию (Tarasova, 2009; Soukhovolsky, 2009).

Возможны различные сценарии дальнейших событий:

- гибель особей инвазийного вида сразу же или через некоторое время после их проникновения на новую территорию;
- внедрение вида на эту территорию и поддержание в течение длительного или даже неограниченного времени после внедрения некоторой стационарной плотности популяции этого вида; при этом существенных воздействий на компоненты экосистемы инвазийный вид не оказывает;
- инвазия, сопровождающаяся вытеснением из экосистемы некоторых аборигенных видов насекомых и (или растений);

- инвазия, приводящая к синергическим эффектам в экосистеме и росту численности некоторых аборигенных видов насекомых и растений;
- возникновение регулярных вспышек массового размножения этого вида, приводящих к повреждениям и гибели лесных насаждений.

В работе рассмотрены принципы моделирования инвазий лесных насекомых на новые территории и создания моделей, предназначенных для оценки потенциальных рисков вспышек массового размножения инвазийных видов лесных насекомых на новых территориях.

В рамках предлагаемого подхода к описанию инвазий лесных насекомых в качестве инструментов моделирования рассматриваются:
- фазовые портреты инвазийных популяций и вводится операция трансформации двумерных фазовых портретов в одномерные «потенциальные ямы», характеризующие риск выхода популяции инвазийного вида за пределы зоны устойчивости;
- модели эффективного потребления корма насекомыми, позволяющие оценить энергетическую пригодность корма на новой территории для питания особей инвазийного вида;
- модели вспышек как фазовые переходов второго рода, с помощью которых предлагается оценивать критические плотности популяций инвазийных видов.

МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА В БИОСФЕРЕ С УЧЕТОМ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ

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. Модель описывает внутригодичную динамику параметров продукционного процесса наземных растений, газо-, водообмена и вегетационных характеристик растительного покрова в системе атмосфера-растительность-почва на сетке 4°×5°, временной шаг 1 сутки. Подтверждена гипотеза, что главной причиной сезонных колебаний CO_2 в атмосфере является фотосинтезирующая деятельность растений суши, причем движение воздушных масс приводит к «затягиванию» CO_2 из районов с меньшими значениями фотосинтеза, находящимися за сотни километров. Модель может применяться для оценок взаимовлияния быстрых аномальных биосферных явлений (аномальная жара, засухи т.п.).

Представлена новая пространственно распределенная модель цикла углерода, описывающая продукционный процесс наземных экосистем, с учётом сезонного хода биосферных параметров. Модель имеет пространственное разрешение 4°×5°, временной шаг 1 сутки. Каждая ячейка суши считается занятой типом экосистемы согласно классификации (Базилевич, Родин 1967). В задачи моделирования входит компьютерное исследование взаимовлияния экосистем и изменения климатических характеристик.

Для лучшего понимания процессов транспорта CO_2 в атмосфере, необходимого для моделирования, были собраны и проанализированы данные временной и пространственной динамики двуокиси углерода в атмосфере. Отдаленная цель данной работы также заключается в последующем использовании результатов анализа для построения более адекватных моделей исследуемых циклов расширения множества процессов, взаимосвязанных с циклом CO_2. Объектами сбора и анализа были регистрируемые и получаемые из статистики величины выбросов CO_2 антропогенного и биологического происхождения, концентрации парникового газа на станциях мониторинга в мире (более 50),

в морских круизах и регистрируемые методами дистанционного зондирования со спутников и самолетов. Выявлены важные динамические свойства динамики CO_2, в том числе и спектрально-частотные характеристики. Так, обнаружено снижение темпов выбросов CO_2 и его роста в атмосфере последние годы. Определен характер корреляции глобальной динамики CO_2 и температуры атмосферы. Показано существование колебаний концентрации CO_2 с периодом 1 год, 1/2 и 1/4 года, а также колебания с периодом 11 лет, которые коррелированны с колебаниями солнечной активности.

Наибольшее изменение концентрации CO_2 в течение года наблюдается в высоких и средних широтах Северного полушария – 15.0 1/млн (ppm). При этом минимум концентрации CO_2 приходится на август. Это связано с тем, что летом на этих широтах идет интенсивный фотосинтез растительности суши и поглощение CO_2. Чем ближе к экватору, тем амплитуда колебаний становится меньше, что объясняется уменьшением выраженности летнего изменения фотосинтеза при движении к экватору. Колебания доходят до экватора и несколько "заходят" в Южное полушарие. Это можно интерпретировать как "затягивание" в летний период двуокиси углерода в сторону наибольших падений в концентрации CO_2 (зону 50-60 градусов с.ш.) с широт вплоть до от экватора и далее. При этом минимум концентрации сдвигается от июля-августа в зоне средних широт до сентября на экваторе. В Южном полушарии в целом вплоть до Южного полюса минимум концентрации CO_2 приходится на январь-февраль (размах колебаний здесь меньше, составляет лишь 1.2 1/млн (ppm)). Меньшая величина амплитуды колебаний определяется тем, что в Южном полушарии меньше площадь суши, соответственно меньше и фотосинтез, приводящий к уменьшению концентрации атмосферной CO_2.

Анализ показал, что межгодовая изменчивость концентрации CO_2 определяется, главным образом, вариациями температуры атмосферы и явлениями Эль-Ниньо.

Другим фактором межгодовой изменчивости концентрации CO_2 в атмосфере являются индустриальные выбросы CO_2. Так, величины индустриальных выбросов коррелирует с ростом CO_2 в атмосфере, они постоянно росли со спадами, связанными с I и II мировыми войнами (интересно, что каждый раз спад выбросов происходил после окончания войны), великой депрессией 30-х, годов, энергетическим кризисом 70-х годов и др. Судя по пятилетним скользящим средним, сильный спад темпа роста был после 1967 г. с резким подъемом после 1983 г. Следующий спад был после 1987 г. Последний сильный спад темпа роста выбросов происходил после 1997 г. Он связан с началом перехода развитых стран на энергосбережение и с подготовкой к выполнению Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН о стабилизации климата.

Модель содержит расчётные блоки продукционного процесса растительного покрова и почвенного дыхания, почвенной влаги и температурного режима верхнего слоя почвы, переноса CO_2 в атмосфере (Тарко, 2005). Процессы распределения углерода в каждой ячейке описываются системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений; при учёте переноса CO_2 в атмосфере решается задача адвективно-диффузионного переноса примеси. Климат в каждой ячейке характеризуется суточными значениями температуры и влажности приземного слоя воздуха, количеством осадков, скоростью ветра, концентрацией CO_2 в воздухе, облачностью, длительностью светового дня, интенсивностью света на поверхности земли.

Блок продукционного процесса описывает динамику углерода и воды в наземных экосистемах и почве. Каждая экосистема характеризуется количеством углерода на единицу площади в биомассе листьев, стволов, корней, ассимилятов, гумусе, количеством воды в корнеобитаемом слое почвы. Модель описывает динамику углерода и воды в каждой ячейке – наземной экосистеме принятого разбиения. Баланс углерода в каждой ячейке описывается системой нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений для указанных переменных. Рассматриваются фотосинтез и накопление ассимилятов, дыхание, рост и отмирание органов, приток углерода в почву и почвенное дыхание, эвапотранспирация. При

расчёте фотосинтеза учитывается зависимость от индекса листовой поверхности, интенсивности ФАР, концентрации CO_2 в атмосфере, температуры воздуха, доступности почвенной влаги. Расчёт водного цикла в модели включает баланс почвенной влаги в каждой ячейке суши. Эвапотранспирация в растительном покрове рассчитывается по формуле Пенмана-Монтейта.

Идентификация модели выполнялась в два этапа. На первом этапе настройки выполнялось моделирование внутригодичного хода роста фракций фитомассы и сравнения результатов моделирования с натурными данными из работы (Цельникер и др. 1993), подбор формы ростовых функций и ряда коэффициентов. Полученные результаты использовались на втором этапе в качестве начальных приближений при настройке всех ячеек распределённой модели в целом по всем ячейкам (рис. 1), для чего использовались глобальные карты продуктивности и запасов фитомассы. При этом выдвигались следующие ограничения: моделируемые продуктивность и запасы фитомассы в каждой ячейке должны соответствовать данным из работ (Базилевич, Родин 1967) и (Базилевич и др. 1968). При настройке модели учитывался принцип адаптации растений, который выражался в виде изменения параметров фотосинтеза для каждого типа растительности с изменением обусловленного местоположением светового режима данного участка.

Рис. 1. Динамика усредненных по широте значений фотосинтеза в течение года (кг С/(м^2 год). Положительные значения на вертикальной оси соответствуют Северному полушарию

Блок почвенного дыхания представляет систему уравнений, в которой с помощью простых уравнений диффузионного типа описывается уход в результате почвенных процессов двуокиси углерода из почвы. Интенсивность выделения CO_2 из почвы зависит от климатических факторов – температуры и влажности почвы.

Последний блок модели описывает перенос CO_2 в атмосфере с воздушными массами. Для этого использовались поля скоростей движения воздуха в атмосфере, рассчитанные с помощью модели общей циркуляции атмосферы и океана (Пархоменко 1988). Предполагалось, что CO_2 перемещается с общим ходом воздушных масс по планете. Во внимание принималось принятое в модели климата двухуровневое разбиение атмосферы по вертикали.

Моделирование подтвердило гипотезу, что главными причинами сезонных колебаний CO_2 является фотосинтезирующая деятельность растений суши, причем движение воздушных масс приводит к «затягиванию» CO_2 из районов с меньшими значениями фотосинтеза, находящимися за сотни километров. Так, на экваторе и на несколько градусов к югу, где практически фотосинтез не подвержен сезонным колебаниям, воспроизводится ход CO_2, свойственный Северному полушарию. А вблизи Северного и Южного полюсов ход CO_2 соответствует его ходу в менее низких широтах (при значительно меньшей амплитуде колебаний) (рис. 2).

Рис. 2. Сезонная динамика расчетных и измеренных значений хода CO_2 на нескольких станциях мониторинга, расположенных на разных широтах. Концентрация CO_2 выражена в объемных частях на миллион. На горизонтальной оси указаны номера месяцев, начиная с января

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 08-01-00607)

Литература

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.общей биологии.- 1968.- Т. 29.- N 3.- С. 261-271.

Цельникер Ю.Л., Малкина И.С., Ковалев С.Н., Чмора С.Н., Мамаев В.В., Молчанов А.Г. Рост и газообмен СО-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.

ОПЫТ РЕГИОНАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ CO2FIX НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ЗАПАДНОЙ БОГЕМИИ

Татаринов Ф.А. [1,2], Ченчала Э. (Cienciala E.)[2]

[1]*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*
pedro2005@rambler.ru

[2]*IFER - Institute of Forest Ecosystem Research, Jílové u Prahy, Czech Republic*
Emil.Cienciala@ifer.cz

Введение

Рассмотрен пример экстраполяции модели локального уровня (однородное насаждение) на уровень региона путем выделения относительно однородных классов растительности и моделирования каждого класса.

Материал и методика

CO2FIX (Masera et al., 2003) – это эмпирическая модель углеродного цикла в лесных экосистемах, учитывающая запасы и потоки углерода в различных фракциях древостоя, почве, а также в продукции и топливе из древесины. Модель точечная, т.е. все переменные рассчитаны на $м^2$ однородного насаждения. Кривые хода роста, аллометрические зависимости, а также лесохозяйственные мероприятия и использование древесины непосредственно закладываются в модель в качестве входных данных.

Лесистость тестового региона, Юго-Западной Богемии (Чешская республика), составляет 30.4%. Подавляющая часть лесов – одновидовые одновозрастные насаждения с интенсивным лесным хозяйством. Основные лесообразующие породы, сосна, ель, дуб и бук составляют соответственно 50.2, 40.3, 5.0 и 4.5% всей покрытой лесом площади.

Моделирование проводилось для классов одновидовых одновозрастных насаждений с регулярными рубками ухода и сплошной рубкой в 100 лет для хвойных и в 120 лет для лиственных пород. Регионализация модели проводилась в несколько этапов. (1) На основе таблиц хода роста (Černý et al., 1996) и других литературных данных была проведена параметризация для среднего бонитета ели, сосны, дуба и бука. (2) На основе таксационных данных были выделены однородные классы насаждений по двум параметрам: тип лесохозяйственной единицы (ЛХЕ, определяемый лесорастительными условиями) и преобладающая порода. Классы были упорядочены по занимаемой ими площади, и редкие классы были отброшены. Для каждого из оставшихся 30 классов, занимавших в сумме более 95% покрытой лесом площади, был подготовлен отдельный файл параметров. Файлы параметров для разных ЛХЕ и одной породы различались текущим приростом, который рассчитывался эмпирической моделью роста SILVISIM (Černý, 2005), остальные параметры были общими в рамках одной породы. (3) В качестве начальных данных бралось распределение элементарных классов, заданных ЛХЕ, породой и классом возраста, по площадям в 2000 г. Поскольку модель не учитывает метеоусловий конкретного года и климатических изменений, не было необходимости проводить отдельных модельных расчетов для каждого класса возраста в начальный момент. Т.о. было проведено всего 30 различных модельных расчетов и получено 30 временных рядов выходных переменных. В дальнейшем, при обработке результатов моделирования на уровне региона для каждого элементарного класса «ЛХЕ × порода × класс возраста» брались значения из временного ряда «ЛХЕ × порода» в соответствующем возрасте, домножались на соответствующую площадь и суммировались.

Результаты и обсуждение

При моделировании на уровне насаждения наибольший рост запаса (объема) древесины наблюдался у ели, в то время как наибольший прирост биомассы наблюдался у бука, что объясняется более высокой плотностью его древесины. Наименьший прирост и по объему, и по биомассе был у сосны. Запас углерода в почве и подстилке на протяжении одного поколения достигал максимума сразу после сплошной рубки, потом снижался, к 20-30 годам достигал минимума, и далее постепенно рос. Запас углерода в продуктах из древесины также достигал максимума в год сплошной вырубки и далее на протяжении

одного поколения снижался, при этом от поколения к поколению он постепенно накапливался. Биоэнергия, т.е. накопленное количество топлива из древесины, величина по определению неубывающая, на протяжении одного поколения росла довольно равномерно за счет рубок ухода.

Рисунок 1. Динамика средних по региону запасов углерода в лесной экосистеме – все пулы (слева) и в древостое по породам (справа)

На уровне региона запас углерода в почве и древостое колебался вблизи среднего значения 82 т/га, общий запас рос главным образом за счет биоэнергии (Рисунок 1). При этом запас в древостое по породам менялся – снижался у ели и рос у остальных пород, особенно у бука. Это обусловлено возрастной структурой в начальный момент: начальный средний возраст был 51.2, 54.7, 70.5 и 65.9 лет соответственно для бука, дуба, сосны и ели.

Литература

Černý, M. Růstové modely hlavních dřevin České republiky a způsoby jejich využití v kombinaci s daty Národní inventarizace lesů v České republice. In: P. Neuhoverová (ed.), Růstové funkce v lesnictví (Ростовые функции в лесоводстве), Kostelec nad Černými Lesy, 2005, p. 47-56

Černý, M., Pařez, J., Malík, Z. Růstové a taxační tabulky hlavních dřevin České republiky (Ростовые и таксационные таблицы основных древесных пород Чешской республики). IFER, Jílové u Prahy, 1996. - 245 p.

Masera, O., Garza-Caligaris, J.F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G.J., Pussinen, A., de Jong, B.J. Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: the CO2FIX V.2 approach. Ecological Modelling – 2003, v.164, p 177-199.

БЫСТРЫЕ ЦИКЛЫ В КРУГОВОРОТЕ УГЛЕРОДА И АЗОТА

Титлянова А.А.

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия
argenta@issa.nsc.ru

Аннотация: рассматриваются быстрые циклы азота, инициируемые почвенной мезофауной. Выделение экссудатов корнями растений снимают у бактерий лимит по ОВ и они бурно развиваются с выделением CO_2 являющимся аттрактантом для амеб. Амебы выбрасывают излишек азота в форме иона NH_4, который немедленно поглощается корнем. За сезон быстрый цикл повторяется 8-10 раз и поставляет в почву до 25 кг N/га.

Главным достижением за последние двадцать лет в теории круговорота явилось описание и количественная оценка быстрых циклов C, N, P, связанных с деятельностью микробиоты почв и входящих в сетевую структуру полного круговорота.

Существуют малые пулы питательных элементов, которые представлены легкоминерализуемыми фракциями органического вещества (ОВ) и большие пулы

трудноминерализуемых веществ, куда входит ПОВ (почвенное органическое вещество). Элементы малых пулов быстро протекают по пищевым цепям и могут оборачиваться 8-10 раз в год, в то время как большие пулы в медленных циклах делают один оборот в 10, 100 и 1000 лет.

Большинство активных организмов оперируют в малых быстрых циклах и именно эти циклы являются поставщиками питательных элементов в растение. Примером быстрого цикла является взаимодействие «корень растения – бактерии – амебы», которое ведет к локальной минерализации ПОВ и выделению N вблизи корня растения.

Описание взаимодействия (рисунок).

a) Почвенная частица, содержащая N. На поверхности частицы – бактерии с низким метаболизмом, так как нет источников ОВ – корешок растения еще не подошел к частице почвы.

b) Корешок подошел к частице, свежие экссудаты из корешка снимают у бактерий лимит по ОВ. Начинается выделение ферментов, минерализация ПОВ, выделение N.

c) Бактериям требуется много N, так как у них C:N ≈ 5. Как только лимит по N снят, происходит бурный рост бактерий и выделение ими CO_2, который служит аттрактантом для амеб. Амебы немедленно скапливаются у корешка и начинают поедать бактерий.

d) Амебы переваривает бактерий, но потребляют лишь одну треть N, находящегося в бактериальных клетках. Одна треть N остается в клетках амеб, другая треть выбрасывается с непереваривaемыми стенками клеток и остаток N (1/3) выделяется в виде NH_4.

e) Корень потребляет ионы NH_4 и быстро растет, количество выделяемых экссудатов снижается (max экссудатов у кончика корня). Бактерии опять лимитированы по ОВ, их рост тормозится.

Таким образом, путь N описывается не привычной последовательностью: ОВ → бактерии → фермент → NH_4 → почва. Путь сложнее и эффективнее: ОВ → бактерии → амебы → NH_4 → корень. Очень быстрый цикл N связан с быстрым оборотом биомассы. За

один год на 1 м^2 5 г амеб съедают 150-900 г бактерий, что через малый цикл приводит к выделении 15-25 кг N/га.

Круговорот N состоит из быстрых и медленных циклов, которые связывают компоненты различной природы и включают различные фонды N – минеральный, структурный, метаболитный. Микробиота (грибы + бактерии + протозоо) на 1 га получает за год из структурного и минерального фондов 162, а из метаболитного – 136 кг N и перекачивает в минеральный фонд 126 и в метаболитный + структурный фонды 185 кг N.
Итак, азотный цикл – это паутина маленьких и больших циклов – сверхбыстрых, быстрых и медленных, осуществляемых бактериями, грибами, протозоо, почвенной фауной. Его эффективность основана на сетевых процессах, каждый из которых многократно повторяется в течение сезона.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЭКОЛОГИИ: PRO & CONTRA

Топаж А.Г.

ГНУ Агрофизический НИИ Россельхозакадемии, Санкт-Петербург, Россия
topaj@hotmail.ru

Аннотация: в докладе рассматривается вопрос применимости подхода, основанного на использовании принципа оптимальности, к построению математических моделей экологических систем. Рассматриваются традиционные аргументы, направленные против данного метода, и контраргументы в его защиту.

Введение

Из всех биологических дисциплин математическая экология по формальным признакам, пожалуй, наиболее близка к точным наукам. Действительно, ее метод исследования основывается на мощном математическом аппарате, а большинство заключений логически выводится из ограниченного числа базовых аксиом. Предположение о существовании основополагающих законов в экологии позволяет провести аналогию между биологическими и механическими системами. Так, в книге «Ecological Orbits» (Ginzburg, Collivan, 2005) показывается глубокая внутренняя схожесть математических моделей, служащих для описания динамики движения механических объектов (например, планет) согласно законам ньютоновской механики и роста биологических популяций согласно законам развития и самовоспроизведения составляющих их индивидуальных организмов.

Но закономерности движения и взаимодействия физических тел можно описать не только в рамках классической механики Ньютона, но и с помощью аналитической механики Гамильтона и Лагранжа. При этом принципиально меняется терминология описания. Если классическая механика оперирует понятиями *причин и следствий* (то есть сил и ускорений), то аналитическая механика вводит в рассмотрение *цели и возможности* (действие, энергия и связи). При этом базовой моделью описания динамики оказывается не система векторных дифференциальных уравнений, а скалярная вариационная задача, в которой истинная траектория движения ищется как доставляющая оптимум некому функционалу цели. Этот основанный на принципе оптимальности подход исключительно плодотворен в механике, и естественно возникает желание применить его и для построения моделей динамики биологических систем в математической экологии.

Представление о том, что законы поведения и форма живых систем могут быть выведены из рассмотрения неких экстремальных принципов, то есть тезис о том, что в живой природе все устроено так, а не иначе, просто потому, что «по-другому будет хуже», может показаться «ненаучным». Наверное, поэтому использование оптимального подхода в математической биологии достаточно часто подвергается критике. Ниже перечислены и

кратко проанализированы некоторые часто выдвигаемые аргументы против использования экстремальных подходов в математической экологии.

Аргументы «против»

1) Для обоснования гипотезы об оптимальности существующих видов и популяций привлекается теория естественного отбора Дарвина. Но эволюция не приводит к созданию оптимальных в том или ином смысле биосистем.

2) Биологическим системам не нужна оптимальность. Нахождение строгого оптимума и поддержание своего состояния на найденном уровне требует серьезных информационных ресурсов. В то же время, выгода от точного следования гипотетической оптимальной траектории в смысле выбранного функционала цели, как правило, незначительна (пик оптимума достаточно пологий). Поэтому в природе всегда реализуется не принцип оптимальности, а принцип «разумной достаточности» (Новосельцев, 1978).

3) В рамках теории оптимальности не объяснить разнообразие. Если каждый организм в рамках популяции или биологического вида развивается согласно одним и тем же законам, вытекающим из принципа оптимальности, то откуда в такой популяции при одинаковости внешних условий возникает разнообразие генотипов и, соответственно, фенотипов составляющих ее особей?

4) Концепция оптимального управления неприменима к биологическим системам по формальным признакам. Как писал А. А. Ляпунов (Ляпунов, 1970): «Понятие оптимальности к живой природе во многих случаях просто неприложимо. Дело в том, что об оптимальности можно говорить в условиях, когда высказаны четкие ограничения на то, что может меняться, когда ясно, что должно оставаться неизменным, и когда имеется четко очерченная целевая функция. В живой природе в общем случае эти обстоятельства не имеют места».

5) Гипотеза об оптимальности биосистем не удовлетворяет принципу фальсифицируемости Поппера. Любые наблюдаемые в природе закономерности поведения живых организмов можно подогнать под задачу оптимизации той или иной функции.

Контраргументы «за»

1) Интерпретация уравнения Прайса для динамики изменения произвольного признака в процессе естественного отбора позволяет очертить границы применимости фундаментальной теоремы Фишера и показывает, что причинно-следственная связь между эволюцией и оптимальностью существует, но «оптимизацию» следует понимать шире, нежели неизменное стремление к максимуму приспособленности.

2) Принцип «разумной достаточности» в общем случае не противоречит гипотезе оптимальности и может быть получен как решение вариационной проблемы при соответствующем выборе функционала цели, отражающем неполноту информации, доступной для наблюдения в системе.

3) Биоразнообразие может быть вполне объяснимо в рамках экстремальных подходов при условии учета генетической изменчивости и/или вероятностного характера динамики внешних условий существования живых организмов.

4) Во многих случаях удается построить логически и физически непротиворечивую модель динамики биологической системы в терминах стандартной проблемы оптимального управления. В качестве ограничений и уравнений динамики системы при этом выступают заданные и неизменные законы роста. А целевая функция естественным образом определяется в зависимости от уровня организации рассматриваемой биосистемы. Более того, альтернативные формулировки целевой функции часто оказываются эквивалентными в силу двойственности получаемых задач оптимизации.

5) Гипотезу оптимальности биосистем действительно практически невозможно фальсифицировать. Но она позволяет строить модели, в которых сложное и нетривиальное поведение объекта исследования, соответствующее наблюдаемому в реальности, вытекает из минимального количества простых и легко интерпретируемых допущений (Полуэктов и др., 2005). А это может служить дополнительным «эстетическим» доводом в пользу использования принципа оптимальности при построении математических моделей в экологии.

Литература

Ляпунов А.А. О рассмотрении биологии с позиций изучения живой природы как большой системы // В сб. «Проблемы методологии системного исследования», М.: «Мысль», 1970.
Новосельцев В.Н. Теория управления и биосистемы.– М.: «Наука», 1978.- 320 с.
Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб: СПбГУ, 2005.- 396 с.
Ginzburg L, Collivan M. Ecological Orbits. How planets move and populations grow. Oxf. Univ. Pr., NY, 2004, 166 p.

АЛГОРИТМ МЕТАЗНАНИЙ ГЕОЭКОЛОГИИ

Турков С.Л.

Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия
turkov@khn.ru

Аннотация: с позиций геосистемного подхода, теории синергетики и новой теории энтропии рассматриваются проблемы разработки алгоритма метазнаний геоэкологии. В работе используются математический аппарат теории игр и стратегического распознавания образов. Практические направления использования результатов – геоэкологические аспекты теории устойчивого развития регионов (Sustainable Development), геоинформационные системы и технологии принятия сложных управляющих решений.

Во всем многообразии знаний каждой конкретной науки современная философия (гносеология) выделяет особую информационную область, которую она определяет как ее «метазнания». В другой интерпретации и классификации – это фундаментальные знания данной науки, посредством прямого использования которых теоретически возможно достижение полной формализации всей ее проблемной области. Методически метазнания представляют собой теоретически и технологически (по алгоритму) связанные знания высшего уровня об объектной, предметной подобластях и методах ее исследования. Их выделение и ограничение осуществляется на основе принципа единства ее общей целевой функции; в естествознании она сводится к управлению биосферными (ноосферными) процессами. Прямое практическое направление использования метазнаний – разработка высокоинтеллектуальных (человеко-машинных) систем принятия управляющих решений.

В настоящее время геоэкология определяется как область знаний о формах существования и пределах взаимодействия геосферных оболочек (или систем высшего уровня организации; А.Д. Арманд, 1988) планеты: космо-, лито-, педо-, гидро-, атмо-, био- и антропо- сферы. Предметом ее исследования являются процессы природопользования глобального, регионального и локального уровней; общая целевая функция – принятие эффективных управляющих решений в процессе «коэволюции» (Н.Н. Моисеев, 1982) природы и общества. На Рисунке 1 представлена структура алгоритма метазнаний геоэкологии; все необходимые пояснения к нему подробно рассматриваются в работах (Турков, 2009).

Рисунок 1 - Структура алгоритма метазнаний

Методологию разработки алгоритма метазнаний определяют: 1) новая парадигма системного представления мира (биосферное (ноосферное) мышление, переход от объектов к отношениям между ними; Ф. Капра, 1991); 2) новая теория энтропии (энтропия постоянна – $H_f = H_q \mid H_p$ = const; все процессы во Вселенной – преобразования одной энтропии в другую); (Панченков, 1999); 3) геосистемный подход (синтез дескриптивного, конструктивного и нормативного аспектов геоэкологии; изучение полной энтропии системы по схеме: H_q – мера совершенства структуры системы <=> H_p – мера количества ее ресурсов). Объект, процессы

и основные методы исследования: активные (диссипативные) сложно организованные системы класса «природа-общество»; управление процессами взаимодействия геосфер планеты (природопользование в условиях конфликта и неопределенности); методы теории игр и стратегического распознавания образов (Operation's Research, game against nature).

Рекомендуемые направления практического использования алгоритма: проблемная область управления системами класса «природа-общество» на государственном и региональном уровнях; системы планирования (поддержки) принятия управляющих решений в сфере регионального природопользования (в виде резидентных надстроек над ГИСами); классы задач управления природопользованием (задачи интерпретации, диагностики и мониторинга, планирования и реконструкции, прогноза, управления).

Литература

Панченков А.Н. Энтропия.- Н. Новгород: Изд-во об-ва «Интелсервис», 1999.- 592 с.

Турков С.Л. Алгоритм метазнаний геоэкологии // Матер. междун. конф. «Интеркарто/ИнтерГИС-15».- Пермь: ПГУ, 2009. Т. II.- С. 468-479.

Турков С.Л. Моделирование процессов устойчивого развития территорий // Матер. научн. конф. «ЭкоМатМод-2009».- Пущино: ИФХиБПП РАН, 2009. http:/lem/edu.mhost/ru/doc/Proceedings_EcoMatMod/pdf. - С. 284-285.

СОВМЕЩЕНИЕ БАЗ ДАННЫХ ЛЕСОИНВЕНТАРИЗАЦИИ И ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И КАРТИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Усольцев В.А. , Воронов М.П.., Кох Е.В., Бергман И.Е., Уразова А.Ф., Борников А.В., Жанабаева А.С., Мезенцев А.Т., Крудышев В.В.

Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, РФ
Usoltsev50@mail.ru

Аннотация: на основе базы данных о фитомассе и первичной продукции лесов для уральского региона разработана рекурсивная система регрессионных уравнений названных показателей, совмещенная со структурированной базой данных Государственного учета лесного фонда (ГУЛФ). Составлены карты-схемы распределения углерода и его годичного депонирования.

Оценка углерододепонирующей способности лесного покрова в связи с обязательствами по Киотскому протоколу сегодня является одной из насущных проблем. Наши расчеты выполнены с использованием эмпирических моделей зависимости запасов фитомассы и годичной чистой первичной продукции (ЧПП), полученных на пробных площадях, от основных массоопределяющих факторов – возраста и запаса стволовой древесины - путем совмещения полученных моделей с данными ГУЛФ уральского региона по 305 лесничествам (бывшим лесхозам, по состоянию на 2007 г.) на лесопокрытой площади 106 млн. га (10 территориальных образований, составляющих 16% территории РФ). Использованы сводные данные ГУЛФ на уровне лесничеств, предварительно структурированные с целью их совмещения с моделями.

Расчеты выполнены в два этапа: вначале рассчитываются регрессионные уравнения фитомассы, совмещаемые с данными ГУЛФ, а затем - регрессионные модели ЧПП по рекурсивному принципу, включающие в качестве независимых переменных не только показатели ГУЛФ, но и показатели массы листвы (хвои). Затем модели ЧПП совмещаются как с данными ГУЛФ, так и с результатами первого совмещения – фитомассы и ГУЛФ, и в этом состоит особенность примененного нами метода расчета ЧПП лесного покрова. Общая фитомасса лесов уральского региона составила 9,1 млрд. т, а годичная ЧПП – 542 млн. т. Средний запас фитомассы лесов возрастает от 20 т/га в лесотундре до 104 т/га в

южнотаежной подзоне и затем снижается до 78 т/га в лесостепи. ЧПП соответственно возрастает с 1,0 до 7,4 т/га и затем снижается до 5,8 т/га в год.

Рисунок 1. Отображение значений ЧПП по фракциям для каждой породы и по каждому лесничеству отдельно (Воронов и др., 2010)

Оценки ЧПП лесов уральского региона, выполненные по трем совершенно разным методикам (Воронин и др., 2004; Швиденко и др., 2008; Усольцев, 2007), показали довольно близкие результаты: по А.З. Швиденко с соавторами (2008), они выше на 8% по сравнению с нашими данными и на 5% - по сравнению с результатами П.Ю. Воронина с соавторами (2004). А.З. Швиденко с соавторами использовали исходные данные не ЧПП, а фитомассы, которые они преобразовали в систему моделей роста насаждений, совмещаемых с таблицами хода роста полной продуктивности (с учетом отпада), и по их разности за последовательные возрастные периоды получали величины ЧПП. П.Ю. Воронин с соавторами не использовали в качестве исходных ни данные фитомассы, ни данные ЧПП пробных площадей, а рассчитывали ЧПП территориального комплекса по хлорофилловому индексу.

В то же время результаты ЧПП для уральского региона, полученные по трем разным методикам, более чем в 2 раза ниже по сравнению с данными, полученными по методу конверсионных коэффициентов (Замолодчиков, Уткин, 2000). Однако сопоставление наших данных ЧПП по Коми с результатами К.С. Бобковой с соавторами (2003), использующими тот же метод конверсионных коэффициентов, показало различие всего на 12%. Такое несоответствие пока не поддается какому-либо объяснению, и необходимо дальнейшее уточнение и совершенствование методической основы расчетов ЧПП лесного покрова.

Алгоритмы расчета и картирования пулов углерода и его годичного депонирования на лесопокрытых площадях очень сложны и трудоемки, а результаты расчетов вследствие периодических изменений в данных ГУЛФ и непрерывного пополнения данных фитомассы и ЧПП новыми определениями на пробных площадях нуждаются в постоянной актуализации. Поэтому описанный алгоритм расчетов автоматизирован на основе последних достижений в

области информационных технологий, в частности СУБД ADABAS с редактором приложений Natural, которая до сих пор не была задействована в решении не только проблем оценки биопродуктивности лесов, но и любых задач лесного комплекса. Разработанная информационная система (рисунок) дает возможность полной автоматизации расчетов и актуализации результатов.

Литература

Бобкова К.С., Тужилкина В.В., Галенко Э.П. Годичный сток углерода в лесные фитоценозы Европейского севера России // Эмиссия и сток парниковых газов на территории Северной Евразии. Тезисы докл. 2-й международной конф.- Пущино, 2003.- С. 34-35.

Воронин П.Ю., Коновалов П.В., Блондинский В.К., Кайбияйнен Л.К. Хлорофильный индекс и фотосинтетический сток углерода в лесах Северной Евразии // Физиология растений.- 2004.- № 51.- С. 390-395.

Воронов М.П., Усольцев В.А., Часовских В.П. Исследование методов и разработка информационной системы определения и картирования депонируемого лесами углерода в среде Natural.- Екатеринбург: УГЛТУ, 2010.- 160 с.

Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Система конверсионных отношений для расчета чистой первичной продукции лесных экосистем по запасам насаждений // Лесоведение.- 2000.- № 6.- С. 54-63.

Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. - Екатеринбург: УрО РАН, 2007.- 636 с.

Швиденко А.З., Щепащенко Д.Г., Ваганов Е.А., Нильссон С. Чистая первичная продукция лесных экосистем России: новая оценка // Доклады РАН.- 2008.- Т. 421.- № 6.- С. 822-825.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЧИСЛЕННОСТИ РИККЕРОВСКИХ ПОПУЛЯЦИЙ

Фишман Б.Е.[1], Шлюфман К.В.[2]

[1] *ГОУВПО ДВГСГА, Биробиджан, Россия*
bef942@mail.ru

[2] *Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия*
Shlufman@mail.ru

Аннотация: введено понятие обобщенной периодической динамики рекуррентных систем, обобщающее периодическую и квазипериодическую динамики. Для исследования динамического режима одномерных рекуррентных систем предложено использовать фазовые портреты в псевдофазовых пространств с большим лагом. Построен алгоритм обнаружения обобщенной периодической динамики. Определено расположение областей обобщенных периодических динамик в пространстве параметров модели Риккера.

В популяционной биологии для моделирования динамики численности популяции и описания действия плотностно-лимитированных факторов очень часто используется рекуррентные системы. Среди них наиболее известной является, например, модель Риккера

$$x_{i+1} = x_i \cdot a \cdot \exp(-x_i) \qquad (1)$$

и её различные одномерные и двумерные модификации.

В исследовании рекуррентных систем наибольшее внимание уделяется изучению точек бифуркаций и определению областей значений параметров устойчивых циклов. При этом области значений параметров, при которых исследуемая система, не имеет устойчивых циклов, относятся к областям апериодической динамики и, как правило, не рассматриваются. Такие области, на наш взгляд, представляют наибольший интерес.

Было предположено, что рекуррентные системы могут иметь разные по характеру апериодические динамические режимы, причем эти различия можно однозначно определить по особенностям статистических характеристик. Справедливость этой гипотезы проверена на

модели (1), для которой, при различных значениях параметра a, были рассмотрены такие характеристики, как гистограмма, фазовые портреты и автокорреляционные функции.

Гистограммы, построенные по фрагменту последовательности состояний системы (1), указали на два возможных типа распределения. Распределения первого типа характеризуются несколькими диапазонами принимаемых системой состояний, разделенные областями, в которые система не переходит. Распределения второго типа имеют только один диапазон состояний, практически полностью покрывающий интервал возможных состояний $(0, a/e]$. Диапазоны принимаемых системой состояний в дальнейшем именуются кластерами состояний.

Для более детального исследования апериодической динамики одномерных рекуррентных систем мы воспользовались фазовыми портретами в псевдофазовых пространствах, представляемые парами состояний системы, отстоящих друг от друга с большим лагом (100 и более моментов времени). Фазовые портреты в таких псевдофазовых пространствах также разделяются на два типа. В первом типе портретов пары состояний системы объединяются в несколько четко разделяющиеся кластеры пар состояний. Во втором пары состояний образуют только один кластер.

При численном моделировании обратило на себя внимание следующее свойство фазовых портретов одномерных систем. При дальнейшем увеличении значения лага, качественных изменений в портретах не происходит. Количество выделенных кластеров не изменяется. Используемое для построения фазового портрета значение лага определяет соответствие диапазонов состояний, и как следствие, меняет положения выделенных кластеров в псевдофазовом пространстве.

С помощью имитационного моделирования установлено, что автокорреляционные функции, вычисленные по последовательностям состояний системы (1), разделяются по своему характеру на два вида: затухающие и незатухающие. Причем незатухающие автокорреляционные функции наблюдаются в тех случаях, когда состояния системы образуют несколько кластеров состояний и система, изменяя свое состояние, переходит из кластера в кластер, сохраняя порядок перехода. Затухающие автокорреляционные функции имеют место, когда состояния системы образуют только один кластер. Такое различие в поведении автокорреляционных функций указывает на качественно различные динамические режимы системы.

Таким образом, можно заключить, что апериодические режимы системы (1) можно разделить на два типа. Первый тип динамического режима представляет собой циклы конечной длины (больше единицы), элементы которых, флуктуируя в ограниченных диапазонах, образуют кластеры состояний системы, и имеющий незатухающие автокорреляционные функции. Предложено такую динамику называть обобщенной периодической. Второй тип динамического режима характеризуется единственным выделяемым кластером состояний системы и затухающей автокорреляционной функцией.

Введено формальное определение обобщенной периодической динамики системы. Будем говорить, что динамика системы характеризуется обобщенными периодическими изменениями состояния, если существует такое $\varepsilon > 0$ и $T > 1$, что для любых $i, k \in N$ выполняется неравенство

$$\rho(x_i, x_{i+k\cdot T}) \le \varepsilon, \qquad (2)$$

где $\rho(x, y)$-метрика, определенная в пространстве состояний системы, величина ε определяет пороговое значение, ограничивающие сверху максимальное расстояние между любыми двумя состояниями из одного кластера. Наименьшее значение T, для которого выполняется условие (2) называется периодом обобщенной динамики.

В такой формулировке легко увидеть, что понятие обобщенной периодической динамики обобщает не только периодическую, но квазипериодическую динамику.

Разработан алгоритм, позволяющий по фрагменту последовательности состояний системы обнаруживать обобщенную периодическую динамику, а также определять ее период T и выделять кластеры состояний системы.

С помощью разработанного алгоритма в пространстве параметров модели Риккера были выделены области, в которых наблюдаются обобщенные периодические динамики. По результатам сравнения областей существования периодической динамики с выделенным областями обобщенных периодических сделаны следующие выводы.

Разработанный алгоритм обнаружения обобщенной периодической динамики позволяет надежно обнаруживать периодические динамики.

Области существования обобщенных периодических динамик, не являющихся одновременно и периодическими, продолжают каждую серию бифуркаций периодических режимов в сторону увеличения значения параметра модели a. Причем с увеличением значения параметра a происходит уменьшение периода T.

Область значений параметров, при которых в модели (1) возникают хаотические динамики, существенно сократилась за счет выделения областей обобщенной периодичности.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке РФФИ (№ 09-04-00146-а) и ДВО РАН (№ 09-I-П15-01, №09-I-ОБН-12).

ГИПОТЕЗА ДОКУЧАЕВА – ЦЕНТРАЛЬНАЯ ИДЕЯ ЦИФРОВОГО ПРОГНОЗНОГО ПОЧВЕННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

Флоринский И.В.

Институт математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия
iflor@mail.ru

Аннотация: показано, что центральная идея современного прогнозного почвенного картографирования в явном виде сформулирована В.В. Докучаевым в 1886 году.

Введение

В последние двадцать лет в почвоведении получило развитие цифровое прогнозное почвенное картографирование (McBratney et al., 2003; Lagacherie et al., 2007; Hartemink et al., 2008; Boettinger et al., 2010), целью которого является прогноз пространственного распределения 1) почвенных таксономических единиц и 2) физических, химических и биологических количественных свойств почвы на основе анализа пространственно распределенных количественных характеристик факторов почвообразования. Применяемые при этом математические методы включают множественный регрессионный анализ, гибридные геостатистические подходы, аппарат нечетких множеств, дискриминантный анализ, нейронные сети и др.

В качестве теоретической базы для прогнозного почвенного картографирования, McBratney et al. (2003) предложили модель эмпирического количественного описания взаимосвязей между почвой и пространственно распределенными предикторами SCORPAN:

$$S_c = f(s,c,o,r,p,a,n),\ S_a = f(s,c,o,r,p,a,n), \qquad (1)$$

где S_c – почвенные таксономические единицы, S_a – количественная характеристика почвы; s – почва (другие характеристики почвы); c – климат (локальные климатические характеристики); o – организмы, растительность, фауна, человек; r – рельеф (морфометрические величины); p – материнская порода, литология; a – возраст, время; n – пространственное положение. Очевидно, что формулы 1 являются версиями известной формулы Г. Йенни (Jenny, 1941, p. 16). Об этом пишут сами авторы SCORPAN, подчеркивая приоритет и принципиальную важность работы Йенни для возникновения и развития

прогнозного почвенного картографирования (McBratney et al., 2003, p. 6). Ниже мы покажем, что авторы SCORPAN несколько заблуждаются.

Гипотеза Докучаева

В середине 1880-х В.В. Докучаевым была сформулирована следующая гипотеза (Докучаев, 1886, с. 352-353):

«Всякая … почва всегда и всюду является простой *функцией*[4] от следующих почвообразователей: 1) характера (состав и строение) материнской горной породы, 2) климата данной местности, 3) массы и характера растительности, 4) возраста страны и, наконец, 5) рельефа местности. Отсюда прежде всего следует (a), что раз в двух местностях (как бы далеко они ни отстояли бы одна от другой) упомянутые *факторы* равны, – должна быть одинакова и почва, и – наоборот; следовательно (b), если мы вполне изучим эти факторы, то уже *наперед можно предсказать, какова должна быть* и самая почва? Далее (c), как всякому известно, *момент* не должен изменяться, если одна из слагающих его сил будет увеличена или уменьшена на столько, на сколько изменится, в обратном отношении, другая из слагающих; понятно, то же самое соотношение должно существовать, до *известной степени*, и между *характером почвы* и *характером* ее производителей. Отсюда ясно, что с теоретической точки зрения является вполне мыслимыми постановка и решение такого, напр., вопроса: изменилась ли бы данная почва и на сколько именно, если бы, при ее образовании, температура местности увеличилась, положим, на 1–2°, а количество метеорной влаги, за то же время, возросло на 1–2 дюйма? Изменилась бы почва, если бы прирост данной растительности увеличился на 20 пудов (на десятину), а температура понизилась бы на 1–2°?

Повторяю, все это так ясно, так логически законно и даже неизбежно, что, вероятно, спорить против этого *никто* не станет.

К сожалению, *доказать* все эти положения *фактически, с желаемой полнотой*, и – особенно выразить *в детал*ях ответ на последний вопрос (c), представляется *пока* затруднительным. Причины совершенно понятны. Без сомнения, на первом плане стоит здесь крайняя сложность условий, влияющих на почву; во-вторых, эти условия не представляют постоянных величин, а поэтому и трудно поддаются цифровому обозначению; наконец, по одним из упомянутых факторов у нас мало данных, а по другим и вовсе нет. Тем не менее, будем надеяться, что и эти препятствия со временем устранятся и тогда почвоведение сделается действительно точной наукой.»

Обсуждение

Таким образом, центральная идея и постановка проблемы прогнозного почвенного картографирования были в явном виде сформулированы В.В. Докучаевым в 1886 г. В конце 1920-х гг. гипотеза Докучаева становится известной на Западе, так как почти всю приведенную нами цитату воспроизводит (без ссылки) Я.Н. Афанасьев в своей книге на английском языке (Afanasiev, 1927, p. 10). Эта книга является его докладом, представленным на I Международном конгрессе почвоведов в Вашингтоне. С гипотезой Докучаева был знаком Г. Йенни: он цитирует ее по Афанасьеву, но весьма избирательно: только последний (!) из процитированных нами и Афанасьевым абзацев (Jenny, 1941, p. 17).

Очевидно, что гипотеза Докучаева лежит, в той или иной степени, в основе практически всех современных методов почвенного прогнозного картографирования и математических моделей почвообразования, хотя ни в одной соответствующей публикации гипотеза Докучаева не упоминается.

[4] Все выделения курсивом сделаны Докучаевым.

Заключительные замечания

1. Интуиция В.В. Докучаева и его дар научного предвидения вызывает восхищение.
2. Систематические проявления «научной» «политкорректности» западных коллег оставляем без комментариев.
3. Так стало ли почвоведение «действительно точной наукой»?..

Литература

Докучаев В.В. Главные моменты в истории оценок земель Европейской России, с классификацией русских почв // Материалы к оценке земель Нижегородской губернии. Естественноисторическая часть. Отчет Нижегородскому губернскому земству. Вып. 1.- СПб.: Типография Е. Евдокимова, 1886.- 391 с.

Afanasiev J.N. The Classification Problem in Russian Soil Science.- Leningrad: Academy of Sciences of the USSR, 1927.- 51 p. - http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i331_001.pdf

Boettinger J.L., Howell D.W., Moore A.C., Hartemink A.E., Kienast-Brown S. (Eds.). Digital Soil Mapping – Bridging Research, Environmental Application, and Operation.- Dordrecht: Springer, 2010.- 473 p.

Hartemink A.E., McBratney A., Mendonça-Santos M.L. (Eds.). Digital Soil Mapping with Limited Data.- Dordrecht: Springer, 2008.- 445 p.

Jenny H. Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology.- New York: McGraw Hill, 1941.- 281 p.

Lagacherie P., McBratney A.B., Voltz M. (Eds.). Digital Soil Mapping. An Introductory Perspective. - Amsterdam: Elsevier, 2007.- 600 p.

McBratney A.B., Mendonça Santos M.L., Minasny B. On digital soil mapping // Geoderma.- 2003.- Vol. 117.- № 1-2.- P. 3-52.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЕСЕННИХ ФЕНОДАТ У ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ

Фомина В. А., Овчинникова Т. М., Суховольский В. Г.

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН 660036, г. Красноярск, Россия
valentinafomi@gmail.com

Аннотация: проведен анализ фенологических наблюдений деревьев хвойных и лиственных пород на территории заповедника «Столбы», предложена модель расчета весенних фенодат для деревьев различных пород, приведена апробация модели на имеющихся статистических данных

Для лесов бореальной зоны характерна сезонная ритмика, классифицируемая в форме фенофаз, описывающих разные этапы сезонной динамики. Погодные условия сезона считаются одним из важнейших факторов, определяющих фенодинамику. Стандартным показателем, используемым многими исследователями, для определения сроков наступления фенологических событий, является сумма накопленных температур, вычисляемая с момента t_0, когда дневная температура воздуха превысила некоторое минимальное значение T_0 (Hunter, Lechowicz 1992). Предполагается, в частности, что фаза развертывания листьев у деревьев наступает, когда сумма накопленных температур $S(t_0,t_k)=\sum_{t=t_0}^{t_k}(T(t)-T_0)$ превышает некоторое критическое значение S_r. Фактически величину $S(t_0,t_k)$ можно рассматривать как рекурсивный фильтр с равными весами для всех значений температуры воздуха в период от t_0 до t_k (Хемминг, 1987). Для бореальных лесов период времени $\Delta t = t_r - t_0$ составляет полтора – два месяца (Шнелле, 1961), и использование фильтра $S(t_0,t_k)$ неявно предполагает, что у растения существует некоторый механизм «памяти», позволяющий сохранять и суммировать в определенной форме данные о погодных условиях в этот период.

Однако многие авторы указывают на то, что различия значений сумм накопленных температур, при наборе которой реализуется переход в фазу распускания листьев, в разные годы велика, что не согласуется с гипотезой о постоянстве значения критической суммы температур (Chuine, Cour 1999; Lechowicz 2002).

Альтернативная гипотеза, с помощью которой авторы настоящей работы предлагают объяснить наступление фенодаты распускания листьев в отдельном году, предполагает, что у древесных растений существует механизм краткосрочного прогнозирования погоды.

Если рассматривать наступление фенодаты в отдельном году как процесс принятия деревом решения (не касаясь физиологических и биохимических механизмов, способствующих такому процессу), то можно говорить об ошибках принятия решения. Ошибка первого рода (пропуска цели), характеризует ситуацию, когда переход в очередную фазу не происходит, хотя все внешние погодные условия, необходимые для функционирования дерева в новой фазе, уже реализованы. В этом случае растения теряют некоторую часть времени, в течение которого могли бы реализовать физиологические программы следующей фазы развития. Ошибка второго рода (ложная тревога) реализуется, когда переход в новую фазу осуществляется, но сразу же после этого перехода происходят неблагоприятные изменения состояния природной среды (например, весенние заморозки). В этом случае деревья могут даже погибнуть. Для оптимизации задачи принятия решения о переходе в очередную фазу развития необходима схема принятия решения, минимизирующая как ошибки первого рода, так и ошибки второго рода.

В настоящей работе предложена модель воздействия погодных условий на сроки наступления фенофаз, характеризуемая сопряженным выполнением условия минимума экологического риска при переходе в соответствующую фенофазу, связанного ошибками первого и второго рода.

В качестве характеристик, описывающих процесс принятия решения растением в зависимости от погодных факторов, введены следующие функции:

- функция ***G(t)***, характеризующая среднюю температуру воздуха за период времени $t_k - t_0$,

$$G(t_k) = \frac{\sum_{t_0}^{t_k} T(x)}{t_k - t_0} \qquad (1)$$

- функция ***H(t)***, характеризующая среднюю температуру воздуха на период времени от t_k до t_{k+m} (фактически функция H(t) дает прогноз погоды на m дней после даты t_k) и использующаяся для оценки рисков, связанных с ошибками второго рода

$$H(t) = \frac{\sum_{t_k}^{t_{k+m}} T(t)}{m} \qquad (2)$$

- функция ***f(t)***, характеризующая длительность периода, в течение которого может произойти переход в ожидаемую фенофазу:

$$f(t_k) = \begin{cases} 1, t_k \le t_0 \\ (t_k - t_0)^2, t_k > t_0 \end{cases} \qquad (3)$$

Функция f(t) тем больше, чем больше времени проходит с момента t_0 до произвольного момента времени t_k. Фактически эта функция характеризует риск ошибки первого рода.

В модели предполагается, что для наступления фенофазы должны выполняться условие $\frac{H(t) \cdot f(t)}{G(t)} \Rightarrow min$.

Каждую дату t в период от начала вегетации до наступления фенодаты можно характеризовать значениями $G(t)$ и произведения $H(t)\cdot f(t)$. Точки в плоскости $\{G, H\cdot f\}$ можно отнести к одному из двух классов: классу дат, для которых наступление фенодаты маловероятно, и классу дат, для которых наступление фенодаты наиболее вероятно. Для разделения облаков точек, принадлежащих к этим двум классам, использовались методы линейного дискриминатного анализа.

Для тестирования модели использовались данные многолетних (1980-2009 гг.) фенологических и метеорологических наблюдений в заповеднике «Столбы» Красноярского края. Анализировались фенодаты начала развертывания листвы у следующих видов деревьев: пихты сибирской (*Abies sibirica*), ели сибирской (*Picea obovata*), лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), осины (*Populus tremula*), сосны обыкновенной (*Pinus silvestris*), сосны сибирской (*Pinus sibirica*), березы повислой (*Betula pendula*), рябины сибирская (*Sorbus sibirica*), черемухи (*Padus avium*).

Результаты тестирования модели на статистических данных зависят от выбора значений параметров: k, m, t_0 а также от выбора вида функции $f(t)$. Оптимальные величины этих параметров следует выбирать, опираясь на фенологию того или иного вида растения.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОМЫСЛОВЫХ ПОПУЛЯЦИЙ

Фрисман Е.Я.

Учреждение Российской академии наук Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия
frisman@mail.ru

Аннотация: предлагается математическая модель, в рамках которой возможно исследование как нелинейных эффектов популяционной динамики, так и воздействия промысла. Формализуется зависимость величины изъятия от промысловых усилий и численности популяции. Осуществлен теоретический анализ возможных эволюционно-генетических последствий промысла. Показано, что, промысел способен изменить условия естественного отбора и поменять направление генетической эволюции.

Для многих интенсивно эксплуатируемых популяций процесс промыслового изъятия стал неотъемлемой составляющей биологического цикла, не менее существенной для популяционной динамики, чем процессы естественной смертности или размножения.

Вместе с тем интенсивность промысла сама по себе может весьма сложно зависеть от плотности популяции добываемых животных. Так для мелких пушных зверей, особенно белки, оказывается характерна сложная зависимость интенсивности охоты (в том числе количества промышляющих охотников) от численности животных в данный охотничий сезон. Охотники ведут интенсивный промысел при большой плотности зверей и практически отказываются от промысла в периоды депрессии численности. Таким образом, при анализе механизмов динамики численности промысловых популяций необходимо явно учитывать особенности и результаты их промысла.

В процессе выполнения данного исследования была разработана весьма простая математическая модель динамики численности промысловых популяций, отражающая периодичность процесса размножения (модель с дискретным временем) и ориентированная на описание и исследование результатов промыслового воздействия. При построении модели предполагается, что жизненный цикл состоит из следующих процессов: размножения, естественной смертности и промысла. Обозначим через X_n, численность популяции, с которой она вступает в размножение, в n-ом году. После годового воспроизводства (рождения

потомства и естественной убыли) популяция подвергается промыслу, и оставшаяся часть доживает до размножения (n+1)-го года. Формально это можно записать в виде следующего рекуррентного уравнения:

$$X_{n+1} = F(X_n) - G(F(X_n)),$$

где $F(X_n)$ – функция воспроизводства, а $G(F)$ – функция промысла.

В качестве функция воспроизводства для промысловых популяций рыб наиболее часто используются кривые Бивертона-Холта: $F(X_n) = aX_n/(1+bX_n)$ и Рикера: $F(X_n) = aX_n exp(bX_n)$. При выборе и уточнении функции воспроизводства можно учесть зависимость репродуктивных возможностей популяции и величины естественной убыли от текущих условий среды обитания, в частности, от запасов доступной пищи. Это можно сделать, полагая, например, в модели Рикера коэффициент b, характеризующий конкурентно-способность особей между периодами размножения n-го и (n+1)-го годов, линейной функцией двух аргументов C_n, и C_{n+1} – запасов доступного корма в смежных годах, т.е.:

$$b_n = b_0 - b_1 C_n - b_2 C_{n+1}$$

Функция промысла $G(F)$ существенно зависит от условий и интенсивности промысла, которая, в свою очередь, измеряется величиной промысловых усилий U_n. Функция $G(F)$, выбрана нами в виде “трофической” функции с насыщением как по численности популяции F, так и по числу усилий U:

$$G(F,U) = \rho FU / [(m+U)(1+\mu F)]$$

Используемые здесь параметры носят ясный содержательный смысл: ρ - максимально возможная доля изъятия, m - величина промысловых усилий, обеспечивающая долю изъятия, равную половине от максимально возможной при заданном уровне численности, $1/\mu$ - величина численности популяции, при которой изымаемая доля равна половине от максимально возможной при заданных промысловых усилиях.

Аналитическое и численное исследования предложенной модели и ее применение для описания динамики промысловых видов привели к следующим выводам.

В отсутствии промысла характер динамики численности популяции определяется величиной репродуктивного потенциала и наличием 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 видов. 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. Более того, поскольку интенсивность промысла зависит от уровня численности, он может как «раскачивать» вынужденные колебания, так и приводить к резкому падению численности популяции вплоть до ее полного вырождения.

На основе разработанной модели поставлена и исследована задача оптимизации размера промыслового изъятия из популяции. Показано, что оптимальная интенсивность промысла не должна превышать степени природного экологического лимитирования популяции. Развитие данных подходов приведет к созданию новых стратегий использования промысловых биоресурсов и постепенному переходу от идеологии промысла к хозяйственному природопользованию.

Далее нами был осуществлен теоретический анализ возможных эволюционно-генетических последствий промысла. Рассматривается простейшая модельная ситуация, в которой проявляются закономерности взаимосвязанных изменений генетической структуры и численности популяции, вызванные взаимодействием эволюционных (в основном селективных) и экологических (ограничивающих популяционный рост) факторов. Исследуется модель динамики панмиктичной менделевской популяции диплойдных

организмов, генетическое разнообразие в которой контролируется одним диалелльным локусом, а экологическое лимитирование заключается в убывающей зависимости приспособленностей генотипов от численности. Промысловое воздействие сводится к изъятию постоянной доли от численности каждого поколения. Особое внимание уделяется изучению возможности сохранения или утраты полиморфизма в результате равновесного промысла. Показано, что в свободной от эксплуатации популяции происходит оптимизация ее генетического состава по ресурсному параметру и преимущество имеют генотипы, обеспечивающие большие равновесные численности в условиях ограниченности жизненных ресурсов. В эксплуатируемой популяции оптимизируется скорость ее прироста и наиболее приспособленными оказываются генотипы, дающие большее потомство, т.е. обладающие большим репродуктивным потенциалом, а фактор ограниченности жизненных ресурсов отступает на второй план. Таким образом показано, что, промысел способен изменить условия естественного отбора и привести не только к изменению характера динамики численности эксплуатируемой популяции, но и поменять направление генетической эволюции.

Работа выполнено при поддержке РФФИ (гранты 09-04-00146-а, 11-01-98512-р_восток_а) и ДВО РАН (конкурсный проект 09-1-ОБН-12) в рамках программы ОБН РАН «Биоресурсы России»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЛОВ КАЛЬЦИЯ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Хораськина Ю.С., Комаров А.С., Безрукова М.Г., Быховец С.С.

Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия
yulia_hor@rambler.ru

Аннотация: В данной работе предлагается схема и уравнения модели динамики кальция в лесных экосистемах, основанной на представлении о круговороте, как совокупности пулов и потоков элемента в системе. Наиболее подробно описана почвенная часть. В основе расчета коэффициентов скоростей трансформации лежат соответствующие коэффициенты модели органического вещества Romul.

Кальций – жизненно необходимый элемент для прокариот, грибов, растений и животных. Для растений является важным регулятором роста и развития, входит в состав клеточных стенок (в форме пектата) и ряда ферментов. При недостатке кальция нарушается рост растений в высоту.

Кратко круговорот кальция можно описать следующим образом. Са поступает в лесные экосистемы с атмосферными выпадениями и в результате выветривания минералов. После освобождения в ходе разложения и минерализации органического вещества ион Са поступает в почвенный раствор, из которого может адсорбироваться в почвенный поглощающий комплекс (ППК), поглощаться растениями или микроорганизмами или выщелачиваться из почвенного профиля.

Цель данной работы – разработать модель динамики пулов кальция в лесной почве, для связи динамики пулов кальция с динамикой пулов органического вещества и азота почвы, опираясь при этом на минимальное число уравнений и экспериментально определяемых коэффициентов модели. Модель учитывает следующие цепи круговорота. Кальций поглощается растениями из почвенного раствора, в биомассе растений он накапливается, после отмирания растений или их частей переходит в органические остатки (опад), которые затем минерализуются в почве. При этом Са переходит в доступную для растений форму (ионы почвенного раствора и ППК) и вновь поглощается растениями. Часть доступного кальция участвует в образовании новых минералов (оксалаты кальция) или

выщелачивается вниз по профилю. Вынос кальция из лесной экосистемы также осуществляется при вырубке и отчуждении биомассы за пределы экосистемы.

В нашей модели мы будем придерживаться следующей схемы почвенного профиля для лесных экосистем и пулов кальция в почвенных горизонтах и подгоризонтах (рисунок 1).

L_{Ca} – пул кальция в свежем и неразложившемся опаде, содержится в верхнем подгоризонте подстилки.

F_{Ca} – пул кальция в подгоризонте полуразложившихся и разложившихся растительных остатков. Здесь же сосредоточена основная масса вторичных минералов кальция – оксалатов.

H_{Ca} – пул кальция в гумусовом подгоризонте, содержащем грубый гумус.

SH_{Ca} – пул кальция в ОрВП минерального горизонта, содержащем стабильный гумус, связанный с минеральными частицами, этот горизонт формируется с участием дождевых червей.

LH_{Ca} – пул кальция в лабильном гумусе.

Рисунок 1. Схема пулов и поток в модели динамики кальция

Для L_{Ca} пул делится на фракции соответственно фракциям поступающего опада – хвоя, ветви, древесина, кора, толстые и тонкие корни. В пуле F_{Ca} эти фракции объединяются соответственно в один пул. В H_{Ca} и SH_{Ca} кальций включается в состав органо-минеральных комплексов, образуя фульваты (растворимые) и гуматы (слаборастворимые) кальция. Существует еще несколько «внегоризонтных» пулов.

Доступный для растений (и микроорганизмов) пул включает в себя кальций почвенного раствора и обменный кальций почвенно-поглощающего комплекса (ППК). Водорастворимый кальций почвенного раствора, легко доступный для растений, представляет пул Ca available (Av), менее доступный обменный кальций – Ca exchangeable (Ex).

Sm – пул вторичных минералов кальция – веввелитов и ведделитов – оксалатов кальция. Эти минералы растворимы и образуются в подстилке при недостатке влаги или поступают с опадом, образуясь в клетках растений. Вследствие малого количества материалов по динамике этих минералов, мы предполагаем следующее, основываясь на известных нам данных (Cromack, 1978). В динамике кальция будем различать два периода – вегетационный с начала снеготаяния и до опадения листвы и период покоя. Различия будут

введены для долей от потоков Ca, поступающих в результате минерализации в пул Av и доли, уходящей во вторичные минералы (Sm_f, Sm_l, Sm_h,).

Период покоя. В процессе разложения опада и подстилки часть от высвободившегося кальция осаждается в виде оксалатов. Остальная часть поступает в пул доступного кальция. Ca копится в этих пулах. Весной, при достижении почвой положительных температур, что можно считать началом снеготаяния, происходит растворение части (Sm_{Av}) вторичных минералов и кальций из Sm поступает в Av. Вегетационный период. Из растворимой формы происходит потребление растениями ежемесячно на протяжении вегетационного периода. Если после потребления в конце вегетационного периода в пуле Av что-то осталось, то эта часть переходит в обменный Ca – Ex. Если растениям не хватило кальция, то они добирают необходимый Ca из пула Ex и Sm. Потребление происходит с месячным шагом.

Ca_Weath – пул ежегодного поступления кальция в доступный в результате выветривания минералов. Является входным параметром.

Ca_Up – пул потребления растениями. Соответствует необходимому количеству кальция для годового прироста растений.

Ca_Dep – пул кальция, поступающего с твердыми и жидкими атмосферными выпадениями. Мы предполагаем, что этот кальций сразу поступает в доступный пул.

Leach – кальций, который выщелачивается из доступного пула (раз в месяц).

Предлагается следующая процедура для вычисления объемов выщелачивания с учетом количества осадков, поступающих на почву и выносящихся из нее. На почву поступает некоторое количество воды W плюс некоторое количество есть в самой почве - Ws. В этой воде «растворяется» кальций пула Av. Полученная концентрация кальция в почвенном растворе [Ca_Av]=Ca_Av/(W+Ws). Объем воды, вытекающей из-под рассматриваемой почвенной толщи (после испарения и потребления растениями) будет Wleach. Соответственно кальция в нем – Ca_leach=Wleach*[Ca_Av]. Эти расчеты производятся в конце шага после потребления кальция растениями. Если растения забрали весь кальций из Av, выщелачивание равно 0.

Между описанными выше пулами происходит трансформация органического вещества и его минерализация и, соответственно, переход кальция из одного пула в другой. Эти процессы описываются в виде следующих уравнений:

dLCa/dt=LCa–k1*LCa–k3* LCa
dFCa/dt=FCa+k3*LCa–k2*FCa–k4*FCa–k5*FCa
dHCa/dt=HCa+d*k4*FCa–k6* HCa–k5*HCa
dLHCa/dt=LHCa+k3*LCa–k2*LHCa–k4*LHCa–k5*LHCa
dSHCa/dt=SHCa+k5*FCa+(1-d)*k4*FCa–k8*SHCa
dCaAv/dt=CaAv+(1-SmL)*k1*LCa+(1-SmF)*k2*FCa+(1–SmH)*k6*HCa+k2*LHCa+k8*SHCa+
+CaWeath+CaDep–Leach–Ca_Up+SmAv*Sm
dSm/dt=Sm+SmL*k1*LCa+SmF*k2*FCa+SmH*k6*HCa–(Ca_Up–CaAv–CaEx)–SmAv*Sm
dCaEx/dt=CaEx–(Ca_Upt–CaAv)+CaAv

В качестве начальных значений коэффициентов мы принимаем значения, вычисленные для динамики пулов органического вещества в модели ROMUL (Chertov et. al, 2001). Это позволит в дальнейшем найти условия стационарного состояния для динамики пулов органического вещества, а затем определить поправки к соответствующим коэффициентам для пулов кальция, обеспечивающим стационарную динамику этих пулов.

Программная реализация модели динамики кальция выполнена в среде Borland Developer Studio на языке Object Pascal.

Была проведена калибрация модели для северотаежных лесов Европейской части России, на примере ельника кустрничково-зеленомошного (Хораськина и др, 2009), а также для еловых горных лесов в заповеднике “Парангалица” (Болгария) (Хораськина и др., 2010), для различных сценариев воздействия.

Работа поддержана Программой Президиума РАН №4, грантом РФФИ № 09-04-01209

Литература

Хораськина Ю.С., Комаров А.С., Безрукова М.Г., Лукина Н.В., Орлова М.А. Модель динамики кальция в северотаежных лесных почвах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.- 2009.- №7.- С. 1468-1477.

Хораськина Ю.С., Комаров А.С., Безрукова М.Г., Жиянски М. Моделирование динамики кальция в органических горизонтах почвы // Компьютерные исследования и моделирование.- 2010.- Том 2.- № 1.- С. 103-110.

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 modelling // Ecological Modelling.- 2001.- Vol. 138.- P. 289–308.

Cromack K.JR, Sollins Ph., Graustein W.C., Speidel K., Todd A.W., Spycher G., Li Ch.Y., Todd R.L. Calcium oxaLte accumuLtion and soil weathering in mats of the hypogeous fungus Hysterangium crassum // Soil Bio/. Biochem.- 1979.- Vol. 11.- P. 463-468.

ЧТО ПРОИСХОДИТ ПРИ ОСВОЕНИИ В РУБКУ СЛАБОНАРУШЕННЫХ ЛЕСОВ: ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ EFIMOD ДЛЯ ЧАСТИ ЛИСИНСКОГО УЧЕБНО-ОПЫТНОГО ЛЕСНИЧЕСТВА

Чертов О.Г.[1, 2], Грязькин А.В.[1], Смирнов А.П.[1], Ковалев Н.В.[1]

[1]*Санкт-Петербургская Лесотехническая Академия, Ст-Петербург, Российская Федерация*
lesovod@bk.ru

[2]*Бингенский Политехнический ун-т, Бинген, Германия*
chertov@fh-bingen.de

Аннотация: приводятся данные 100-летней имитации моделью EFIMOD динамики лесной растительности и почв слабонарушенного лесного массива при естественном развитии и при нормативном сплошнолесосечном хозяйстве. Показано существенное снижение пулов углерода в растительности и почве в конце имитации, а также отрицательный баланс углерода при рубках по сравнению с ненарушенными лесами

До сих пор динамические модели лесных экосистем применялись в основном для освоенных интенсивно эксплуатируемых лесов при разных режимах лесопользования (Моделирование динамики..,2007; Чумаченко и др. 2001; Shanin et al., 2011, и мн.др.) В Лисинском лесничестве имеется лесной массив научного значения, в котором длительное время ведется очень ограниченное лесопользование. Его площадь 1134 га, 67% территории составляют спелые и перестойные леса, в которых половина древостоев старше 120 лет. Для этого лесного массива было сделано два 100-летних сценария прогонов модели EFIMOD: а) естественное развитие леса без катастрофических нарушений и б) нормативный сплошнолесосечный режим с 4-мя рубками ухода и сплошной рубкой в 100-120 лет в хвойных и 60-80 лет в лиственных насаждениях. Рубки имитировались каждые 10 лет с соблюдением расчетной лесосеки и успешным возобновлением хвойных и лиственных пород. В среднем за 100-летний период «вырубалось» 3,8 м^3 древесины/га в год.

При рассмотрении генерализованных результатов имитации обращает на себя внимание различие динамических трендов при естественном развитии и вовлечении лесов в рубки (рисунок 1). Если при естественном развитии продолжается аккумуляция углерода в древостоях, то при рубках происходит снижение общей биомассы лесного массива. В итоге средние величины углерода биомассы деревьев на всей территории в конце имитации составляют при естественном развитии 163 т/га, а при рубках 39 т/га. В почвах при естественном развитии отмечается заметное возрастание массы органического вещества почв (ОрВП) до достижения равновесного состояния. Напротив, при вовлечении лесов в рубки

прослеживается некоторое снижение пулов ОрВП к концу 100-летней имитации.

Рисунок 1. Динамика углерода биомассы древостоев и ОрВП Гришкинской дачи Лисинского лесничества в сценариях естественного развития и сплошнолесосечного хозяйства

На рисунке 2 видны существенные различия статей баланса углерода в обоих сценариях. Нетто биологическая продуктивность (НБП) и дыхание почвы (эмиссия углекислоты) снижаются в среднем на всей территории при рубках. При этом при рубках происходит изъятие из лесных экосистем заметного количества углерода с заготовленной древесиной и сжиганием порубочных остатков. Это приводит к существенному различию баланса углерода всей территории при естественном развитии и рубках. В режиме заповедания на территории наблюдается существенное депонирование углерода в размере 0.73 т С /га в год, то при освоении лесов в рубки идут потери углерода в количестве 0.83 т С /га в год.

Такая картина изменения лесной территории и баланса углерода при освоении лесов легко предсказуема. Также ясно, что в итоге пулы и баланс углерода при рубках придут к своему равновесному состоянию, как это было показано ранее. Однако становится понятным, что «освоение» лесов огромных территорий востока страны приведет к неблагоприятным последствиям с точки зрения глобального баланса углерода и изменения климата.

Рисунок 2. Компоненты баланса углерода в лесных экосистемах Гришкинской дачи, средние значения на всю территорию за 100-летний период. Статья «заготовленная древесина» включает в себя также и потери углерода при сжигании порубочных остатков

Литература

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

Чумаченко С.И., Паленова М.М., Коротков В.Н. Прогноз динамики таксационных показателей лесных насаждений при разных сценариях ведения лесного хозяйства: Модель динамики лесных насаждений FORRUS-S // Экология, мониторинг и рациональное природопользование. Науч. тр. МГУЛ, вып. 314. *М.: МГУЛ, 2001.- С. 128-146.*

Shanin V. N. Komarov A.S., Mikhailov A,V., Bykhovets S.S. Modelling carbon and nitrogen dynamics in forest ecosystems of Central Russia under different climate change scenarios and forest management regimes // Ecological Modelling. - Vol. 222.- 2011. Accepted. Citation: doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.11.009.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА БАЛАНС УГЛЕРОДА В ТАЕЖНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАНАДЫ

Чертов О.Г.[1, 4], Комаров А.С.[2],Грязькин А.В.[1], Смирнов А.П.[1], Бхатти Д.С.[3]

[1]*Санкт-Петербургская Лесотехническая Академия, Ст-Петербург, Российская Федерация*
lesovod@bk.ru

[2]*Пущинский гос. университет, Пущино на Оке, Российская Федерация*
as_komarov@rambler.ru

[3]*Северный лесоводственный центр Канадской Лесной Службы, Эдмонтон, Эдмонтон, Альберта, Канада*
jagtar.bhatti@nrcan-rncan.gc.ca

[4]*Бингенский Политехнический ун-т, Бинген, Германия*
chertov@fh-bingen.de

Аннотация: приводятся данные долговременной имитации динамики экосистем хвойных лесов Европейской России и центральной Канады с различными режимами лесных пожаров моделью лесных экосистем EFIMOD. Результаты моделирования показали, что пожары приводят к снижению высоты, диаметра, запасов древесины, нетто биологической продуктивности и пулов органического вещества почв моделируемых экосистем как в обеих странах

Количественная оценка долговременных последствий лесных пожаров является трудоёмкой и сложной задачей (Фуряев, Киреев, 1979; Софронов, Волокитина, 1998; Мелехов и др., 2007). В этом отношении могут оказаться полезными динамические модели лесных экосистем (Моделирование динамики.., 2007; Porte, Bartelink, 2002).

Приводятся материалы по использованию модели системы «древостой-почва» EFIMOD (Моделирование динамики..,2007) для оценки долговременного экологического воздействия лесных пожаров на экосистемы сосны Банкса (*Pinus banksiana*) и черной ели (*Picea mariana*) в Канаде и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и ели европейской (*Picea abies*) в России. Моделировалось два 70-летних оборота рубки с прореживанием в 40 лет, с успешным возобновлением через 5 лет после рубки и тремя типами пожаров (таблица 1).

Таблица 1. Изменение пулов органического вещества почв (ОрВП) и запасов древесины после пожаров по сравнению с рубками без пожаров

Древостои	Типы пожаров*	Изменение пулов ОрВП, %	Изменение запасов древесины, %
Сосна обыкновенная	1	-31.80	-3.1
	2	-11.20	-13.8

	3	-40.20	-9.9
Ель европейская	1	-23.30	-6.1
	2	-7.30	-8.5
	3	-17.70	-6.7
Сосна Банкса	1	-34.40	-25.9
	2	-18.70	-23.4
	3	-27.80	-16.9
Ель черная	1	-43.30	-19.5
	2	-24.60	-21.3
	3	-35.60	-14.6

*1 Два верховых пожара в конце каждой ротации; 2 Два низовых пожара после прореживания; 3 Два низовых пожара после главной рубки

Рисунок 1. Долговременный эффект лесных пожаров на нетто биологическую продуктивность (НБП) в сосняках Банкса в Канаде во второй 70-летней ротации после сплошной рубки, низового пожара после рубки и верхового пожара без рубки горельника

Все виды имитируемых лесных пожаров приводят к снижению высоты, диаметра, густоты и запасов древесины в моделируемых древостоях как в России, так и в Канаде. Самое слабое негативное влияние на показатели производительности древостоев оказывают подстилочные пожары, самое сильное – верховые. Низовые пожары после сплошной рубки и верховые пожары приводят к близким последствиям в отношении производительности леса в следующем обороте рубки. Хорошо прослеживается и снижение пулов ОрВП за счет выгорания лесной подстилки. Низовые пожары после прореживания в средневозрастных древостоях оказывают в ряде случаев наименьшее влияние на накопленные запасы древесины, но сильное – на пулы ОрВП. Данные по имитации баланса углерода в лесных

экосистемах подтверждают достаточно выраженную деструктивную направленность влияния пожаров на лесные экосистемы. Это, прежде всего, – долговременное снижение нетто биологической продуктивности (Рисунок 1), достигающее в среднем за два оборота рубки 10% в России и 15% в Канаде.

В России потеря углерода из лесных экосистем в долговременной перспективе наблюдается только при верховых пожарах с вырубкой горельника. Во всех остальных случаях при пожарах имитация показывает небольшое секвестирование углерода при пирогенной восстановительной сукцессии. Напротив, в Центральной Канаде все пожары приводят к отрицательному балансу углерода в низкопродуктивных таежных лесах с максимальными потерями углерода при верховых пожарах с вырубкой горельника. Эти различия отражают влияние более мягкого климата Европейской России и более всего – воздействие достаточно высокого поступления азота из атмосферы, оказывающего удобрительный эффект, как это было документировано в Западной Европе (Моделирование динамики..,2007).

Литература

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

Мелехов И.С., Душа-Гудым С.И.., Сергеева Е.П. Лесная пирология.- М., ГОУ ВПО МГУЛ, 2007.– 286 с.

Софронов М.А., Волокитина А.В. Методика оценки баланса углерода по динамике биомассы в пирогенных сукцессиях // Лесоведение.– 1998.- №3.– С.36-42.

Фуряев В.В., Киреев Д.М. Изучение послепожарной динамики лесов на послепожарной основе.– Новосибирск, Наука,. 1979.- 296 с.

Porte A., Bartelink H.H. Modeliing mixed forest growth: a review of models for forest management // Ecological Modelling.- 2002. - Vol. 202.- P.141-188.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ БАЗ В ПОПУЛЯЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Чижикова Н.А.[1], Фардеева М.Б. [1], Прохоров В.Е.[1],

[1]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*
vadim.prokhorov@gmail.com, orchis@inbox.ru

Аннотация: приведена структура популяционной базы данных, показаны примеры её использования для анализа и моделирования популяций растений различных жизненных форм.

В современных условиях для анализа пространственной организации фитоценозов и популяций используют ГИС-технологии, позволяющие генерализировать разнородную информацию, касающуюся пространственной и возрастной структуры популяций и представить её в форме, удобной для дальнейшего анализа и построения различных моделей.

Для исследования пространственно-возрастной структуры популяций растений мы опирались на общепринятые геоботанические и популяционные методы, основанные на картировании постоянных пробных площадей, размер и форма которых зависели от типа жизненной формы.

Популяционная база данных для растений имеет определенную структуру. В основу базы данных входят три таблицы, содержащие (1) информацию о площадках, где был отмечен и/или закартирован вид, (2) информацию о местоположении особей (клонов или других счетных единиц) видов на площадке, (3) геоботанические описания сообществ, где были заложены площадки. В одной ценопопуляции может быть заложено несколько площадок, в том числе и в течение одного вегетационного сезона, поэтому каждому описанию присваивается уникальный идентификационный номер. Информация о заложенных площадках и их геоботанические описания передаются в базу Флора

(Прохоров, 2006, 2009), поэтому идентификационные номера, которые им присваиваются в популяционной базе данных, синхронизируются с базой Флора. Все три основные таблицы в базе связаны по идентификационному номеру описания.

В таблицу (1) заносятся: номер (название) ценопопуляции; дата описания; координаты левого нижнего угла площадки, полученные с помощью GPS; название района; словесное описание антропогенного воздействия; экспертная оценка степени антропогенного воздействия (сильное, умеренное, минимальное); тип фитоценоза; формула древостоя (для лесных фитоценозов). В таблицу (2) заносятся координаты закартированных на площадках особей, кроме этого для каждой особи указывается код вида и код его онтогенетического состояния. В таблицу (3) заносятся геоботанические описания – для каждой площадки приводится список видов и их обилия с указанием методики (по Браун-Бланке, проективное покрытие и т.д.).

Вспомогательными в данной базе данных являются таблицы-справочники, содержащие (4) расшифровку онтогенетических состояний счетных единиц, (5) названия видов, в соответствии с базой Флора, (6) описание эколого-ценотических групп по (Бакин и др., 2000). При необходимости в базу могут быть подгружены и дополнительные справочники.

На основе информационной популяционной базы были построены карты распределения разных видов деревьев на территории различных фитоценозов. Отдельно строились карты поярусного распределения деревьев, как по отдельным видам, так и разновидовые. Составление поярусных карт дает возможность разобраться в пространственной структуре лесных фитоценозов более точно, так как деревья в процессе своего онтогенеза занимают различные ярусы, переходя с возрастом из одного яруса в другой. Каждый ярус обладает определенным только ему присущим комплексом экологических факторов, которые и влияют на пространственную структуру деревьев разного возраста и разных экологических групп (особенно по отношению к свету). Причем для деревьев карты-схемы строились с учетом площадей потенциального питания (Фаликов, 1976). Карты-схемы пространственного распределения травянистых растений и кустарничков отличались тем, что особи разных онтогенетических групп даются точками. Примеры карт-схем представлены на рисунке 1.

А Б В

Рисунок 1. Карты-схемы пространственного распределения: А - прегенративных и генеративных особей *C. calceolus* (серые точки – генеративные особи, черные – прегенеративные); Б - прегенративных и генеративных особей *Corydalis bulbosa* в рекреационной зоне города (серые точки – генеративные особи, черные – прегенеративные); В - деревьев в сосняке зеленомошном с елью и липой с учетом онтогенетических групп и их площадей потенциального питания (ВКГПБЗ)

Анализ возрастной структуры и её динамика проводятся с помощью: базового спектра, коэффициента вариации численности особей CN (в процентах), индекса возрастности популяции Δ, восстановления Iв, замещения Iз; состояние ценопопуляций определялось по совокупности параметров и сравнении онтогенетических спектров с характерными спектрами жизненных форм, предложенных Л.Б. Заугольновой (1994) и классифицировалось как *оптимальное, пессимальное и критическое*.

Анализ внутрипопуляционного размещения особей (или побегов) разных онтогенетических групп проводился с помощью (а) *K(r)* функции Рипли, реализованной в пакете spatstat языка статистического программирования R (Ripley, 1976; Baddeley, 2006). Также использовали PCF (парная корреляционная функция) – пропорциональна среднему числу особей, встречающихся на расстоянии r от случайно выбранной особи. Парная корреляционная функция чётче показывает размер скоплений, расстояний между скоплениями и вновь повторяющихся формирований скоплений (Thorste Wiegand и др.; 2007). Функция Рипли вычислялась для всех особей каждой ценопопуляции без разделения на онтогенетические группы; кросс-функции для прегенеративной и генеративной групп; для всех особей с разделением на онтогенетические группы и клоны-куртины. Созданная электронная популяционная база позволяет проводить более сложный анализ пространственно-возрастного распределения деревьев в разных фитоценозах. Так мы пытались сравнивать пространственное распределение различных онтогенетических групп и разных видов деревьев. Если график функции выше доверительного коридора – отмечается агрегация, если ниже – распределение особей равномерное. Описание метода можно найти в работах (Фардеева, Чижикова и др., 2007, 2009); (б) создавались карты-схемы локальной плотности областей, плотность – как число особей приходящихся на единицу площади.

А Б

Рисунок 2 - А: График поведения функции Рипли взаимного распределения виргинильных особей *Picea* × *fennica* и генеративных особей *Pinus sylvestris* на территории ельника с сосной зеленомошного (5Е4С1Б+Л); Б: График поведения парной корреляционная (PCF) при взаимном распределении генеративных особей *Picea* × *fennica* и имматурных особей *Tilia cordata*.

Литература

Бакин О.В., Рогова Т.В., Ситников А.П. Сосудистые растения Татарстана. Изд-во Казан. ун-та, 2000. 496 с.

Заугольнова Л. Б. Структура популяций семенных растений и проблемы их мониторинга// Автореферат дис. … д. б. н. С. Петербург, 1994.– 70 с.

Грейг-Смит П. Количественная экология растений.– М.: Изд-во Мир, 1967.– 359с.

Прохоров В. Е. Редкие виды сосудистых растений флоры Республики Татарстан: эколого-ландшафтные особенности хорологии и динамики. Дисс. канд. биол. наук. Казанский гос. университет, 2006.– 186 с.

Прохоров В. Е. Информационная система «Флора». – Казань: изд-во Казанского ун-та, 2009.– 40 с.

Фаликов Л. Д. Модель размещения и сопряженности древесных пород в фитоценозе дубравы // Биота основных геосистем центральной лесостепи. — М. Изд-во АН СССР, 1976.— С. 109-122.

Фардеева М. Б., Чижикова Н. А. , Корчебокова О. В. Динамика пространственно-возрастной структуры клубнеобразующих орхидей // Вестник Тверского ГУ–2007, №8 (36).– С. 172-176.

Фардеева М.Б., Чижикова Н.А., Бирючевская Н.В., Рогова Т.В., Савельев А.А. Математические подходы к анализу пространственно-возрастной структуры популяций дерновинных видов трав./ Экология. 2009. № 4.- С. 249-257

Ripley B. D. The second-order analysis of stationary point processes// Journal of Applied Probability.- 1976.- V.- 13. P. 255-266.

Baddeley, A. , Turner, R. , van Lieshout, M. -C. и др. (2005). SPATSTAT: Spatial Point Pattern analysis, model-fitting and simulation. R package version 1. 8-3. URL http://www. spatstat. org.

Wiegand Th., Gunatilleke S., Gunatilleke N., Okuda T. Analyzing the spatial structure of a Sri Lankan tree species with multiple scales of clustering. // Ecology, 88 (12), 2007.– P. 3088–3102.

Wiegand Th., Gunatilleke S., Gunatilleke N. Species associations in a heterogeneous Sri Lankan dipterocarp forest // The American Naturalist, 170 (4), 2007.– P. 77-95.

ОТКЛИК ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ: ПРОГНОЗ СРЕДСТВАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Шанин В.Н., Комаров А.С., Михайлов А.В., Быховец С.С.

Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
shaninvn@gmail.com, as_komarov@rambler.ru, alexey.mikh@gmail.com, s_bykhovets@rambler.ru

Аннотация: индивидуально-ориентированная система моделей была адаптирована для моделирования на больших территориях. Количественно проанализирована долговременная динамика лесных экосистем Европейской России при различных внешних воздействиях.

Введение

Основными целями данной работы были: 1) анализ влияния поступления соединений азота с атмосферными осадками на продуктивность и динамику органического вещества почвы с помощью модели круговорота элементов питания в лесных экосистемах и 2) применение данной модели для прогноза динамики лесных экосистем в разных природных условиях и типах леса в Европейской части России на основе стандартных материалов лесоустройства.

Материалы и методы

Для решения этих задач использовалась индивидуально-ориентированная система моделей EFIMOD (Komarov et al., 2003), которая была дополнена специальным программным модулем, позволяющим проводить моделирование на больших территориях. EFIMOD позволяет имитировать механизм обратной связи между почвой и растительностью посредством такого параметра, как количество азота в доступной для растений форме. Для моделирования были выбраны три экспериментальных объекта: Данковское лесничество в Московской области, Мантуровское лесничество в Костромской области и Железнодорожное лесничество в Республике Коми, с общей площадью порядка 17000 км^2, и различные по природным условиям. Для проведения имитационных экспериментов были разработаны четыре сценария (без воздействий; с пожарами; с выборочными рубками; с рубками ухода и последующими сплошными рубками), а также два климатических (при стационарном климате и в условиях климатических изменений – прогноз с помощью модели HadCM3, сценарий эмиссии A1Fi (Gordon et al., 2000)). Учитывались два уровня поступления соединений азота с атмосферными осадками: текущий (4.8-13.2 кг/га в год, в зависимости от региона, и повышение текущего уровня на 6 кг/га в год (Bobbink et al., 2010)). Был проведен анализ основных источников неопределенностей и оценены ключевые параметры модели, такие как коэффициенты скоростей разложения для разных фракций органического вещества

почвы и биологические свойства видов древесных растений. В рамках подготовительного этапа работы также была проведена верификация модели на основе материалов лесоустройства и данных таблиц хода роста. Процедура верификации показала удовлетворительное соответствие результатов моделирования натурным данным.

Результаты и обсуждение

Результаты имитационных экспериментов показали, что, для всех изучаемых территорий, хозяйственная деятельность человека оказывает большее влияние на динамику пулов углерода и азота в лесных экосистемах, чем изменения климата. Наибольшее накопление углерода, как в биомассе деревьев, так и в органическом веществе почвы наблюдается в сценарии без воздействий. Пожары приводят к потерям органического вещества почвы и биомассы лесной растительности и к значительной эмиссии углекислого газа. В остальных сценариях наблюдается снижение запасов углерода во всех пулах, более значительное в сценарии со сплошными рубками. Эффект изменений климата наиболее заметен в сценарии без воздействий: продуктивность лесной растительности и соответствующий пул углерода возрастают, а запас углерода в почве несколько снижается. Рубки же «маскируют» эти процессы. Также спрогнозировано возрастание эмиссии углекислого газа при изменениях климата в силу интенсификации процессов минерализации. Показано, что режим лесопользования оказывает прямое влияние на углеродный бюджет лесных экосистем, в то время как эффект изменений климата опосредован.

Рисунок 1. Соотношение пулов углерода в лесных экосистемах (А) и различных фракций органического вещества почвы на конец периода моделирования (Б) при различных уровнях выпадения соединений азота с атмосферными осадками (1, 2 – базовый, 3, 4 – повышение на 6 кг/га в год) и климатических сценариях (1, 3 – стационарный климат, 2, 4 – изменение климата). За основу принят лесохозяйственный сценарий без воздействий

Увеличение количества соединений азота, поступающих в лесные экосистемы с атмосферными осадками, приводит к росту продуктивности древостоев и, как следствие, к увеличению потока опада. Это, в свою очередь, вызывает увеличение эмиссии диоксида углерода. Более высокое содержание азота в опаде положительно влияет на скорость минерализации (рис. 1А). Изменение климата также приводит к ускорению процессов разложения органических остатков в почве и к увеличению эмиссии CO_2. Возрастание количества растительных остатков приводит к росту запаса органического вещества, особенно в верхних горизонтах почвы (подстилка и гумусовый горизонт). Напротив, изменение климата приводит к относительному снижению запаса органического вещества в органогенных горизонтах. Суммарный эффект двух этих процессов заключается в увеличении запаса органического вещества почвы (рис. 1Б). Описанные эффекты наблюдаются на всех изучаемых территориях, но наиболее заметны в районах с более теплым климатом (Московская и Костромская области) и менее выражены на территории Республики Коми, где биологические процессы в почве протекают медленнее в силу более холодного климата. Увеличенное поступление соединений азота также приводит к

возрастанию доли широколиственных видов, более требовательных к условиям почвенного питания (за исключением территории Республики Коми).

Литература

Bobbink R., Hicks K., Galloway J., Spranger T., Alkemade R., Ashmore M., Bustamante M., Cinderby S., Davidson E., Dentener F., Emmett B., Erisman J.-W., Fenn M., Gilliam F., Nordin A., Pardo L., de Vries W. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. Ecological Applications, 2010, 20(1).- P. 30-59.

Gordon C.; Cooper C., Senior C.A., Banks H., Gregory J.M., Johns T.C., Mitchell J.F.B., Wood R.A. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. Climate Dynamics, 2000, 16.- P. 147-168.

Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova E. EFIMOD 2 – a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems. Ecological Modelling, 2003, 170(2-3).- P. 373-92.

ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ

Шарый П.А.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г.Пущино, Россия

p_shary@mail.ru

Аннотация: статистическая связь максимальной прибавки к урожаю озимой пшеницы, полученной в результате внесения удобрений и составляющей 60% от контроля, с факторами среды (рельеф, климат, почвы и сорт пшеницы), объясняет более 74% пространственной изменчивости этой прибавки в адекватных регрессионных моделях и слабо зависит от времени. При этом ведущей является роль рельефа.

Введение

Если некоторая характеристика почв или растительности тесно связана с факторами окружающей среды, то ее распределение в пространстве можно рассчитывать прямо по этим факторам. Это положение лежит в основе методов ***предсказательного моделирования***, получившего в последние десятилетия большое распространение в экологии и почвоведении, о чем свидетельствует наличие 12-и обзоров по экологии и 2-х - по почвоведению. В области же сельского хозяйства подобных обзоров нет, а соответствующие работы нечасты.

Изучалась связь характеристик урожая озимой пшеницы *Triticum aestivum* L. с факторами окружающей среды, такими как рельеф, средние многолетние осадки и температура, а также типы почв, на территории протяженностью несколько сотен км (запад бассейна р.Оки). Данные взяты из базы данных геосети «Агрогеос», где имеется информация об урожаях озимой пшеницы до (контроль) и после (опыт) внесения удобрений (различные нормы N P K), сведения о почвах, географическом положении опытов и др. 18 количественных характеристик рельефа рассчитывались по методике (Shary et al., 2002) с использованием матриц высот земной поверхности SRTM-30 с разрешением 600 м. Данные о средних осадках и температуре за каждый месяц доступны с тем же разрешением (Hijmans et al., 2005). Изучалась максимальная прибавка к урожаю, определенная как разность между максимальной по опыту величиной О урожая после внесения удобрений и величиной К урожая в контроле для той же точки наблюдения, то есть О–К. Когда опыты относились к нескольким годам, значения О и К усреднялись по годам. Максимальная прибавка характеризовала оптимальное по опытам внесение удобрений. Использовалась 41 точка наблюдения при среднем расстоянии между ними 45 км. Данные о пшенице относились к трем типам почв: черноземы (6), серые лесные (27) и дерново-подзолистые (8). В скобках – число точек наблюдения для каждого типа почв.

Материалы и методы

Для статистической обработки данных использовались методы линейной множественной регрессии. Подробное описание методологии исследования дано в работе (Шарый и др., 2011). Неколичественные факторы среды (типы почв) описывались с помощью индикаторной переменной $И_1$, равной 1 для дерново-подзолистого типа почв и 0 – для остальных. Проверка модели (т.е. оценка предсказательной силы модели для новых предсказаний) осуществлялась по методике кросс-валидации Аллена.

Уравнение регрессии, описывающее связь максимальной прибавки в урожае озимой пшеницы с факторами окружающей среды, имеет вид

$$\text{Прибавка} = 4{,}292 \cdot F(35°,235°) + 3{,}411 \cdot \text{Рфев} + 0{,}2017 \cdot И_1 F(35°,235°) - 0{,}2992 \cdot \text{Ргод} - 151{,}6, \quad R^2 = 0{,}736;\ P < 10^{-6}; \qquad (1)$$

здесь $F(35,235)$ есть освещенность склонов с юго-запада (при склонении Солнца 35° от горизонта и азимуте 235°), Рфев есть средние многолетние осадки февраля, $И_1$ описывает типы почв, а Ргод есть среднегодовые осадки. Факторы среды расположены в порядке убывания их значимости в модели (слева направо).

Результаты

Модель (1) показывает, что главным фактором среды является освещенность склонов с юго-запада. За ней следуют осадки февраля, то есть методы снегозадержания недостаточно эффективны. Для дерново-подзолистых почв прибавка в урожае выше, чем для остальных.

Эта модель демонстрирует тесную связь максимальной прибавки в урожае пшеницы с факторами среды: $R^2 = 0{,}736$ ($P < 10^{-6}$). Подставляя значения факторов среды в модель (1), получаем показанную на рисунке предсказательную карту.

Рисунок. Предсказательная карта максимальной прибавки к урожаю озимой пшеницы

Поскольку адекватность модели обоснована в (Шарый и др., 2011), то 74% изменчивости максимальной прибавки к урожаю озимой пшеницы объяснялось пространственной изменчивостью соответствующих факторов среды. Такая тесная связь позволяет не только строить детальные (разрешения 600 м) предсказательные карты, но и давать рекомендации по улучшению различных характеристик урожая путем применения соответствующих агротехнологий, например, усилением мер по снегозадержанию в феврале.

При изучении только серых лесных почв (27 точек наблюдения) связь с факторами среды оказалась еще теснее: $R^2 = 0{,}784$ ($P < 10^{-5}$). Здесь статистически значим также сорт пшеницы (неколичественный фактор, как и тип почвы): прибавка в урожае возрастала на гребневых формах рельефа для сорта «Мироновская-808» (Шарый и др., 2011).

Литература

Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С. Методология анализа пространственной изменчивости характеристик урожайности пшеницы в зависимости от условий агроландшафта // Агрохимия, 2011.- №2.- в печати.

УСТОЙЧИВЫЕ СОЧЕТАНИЯ ПАР ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВЕ И СОГЛАСОВАННОСТЬ ИХ УЗОРОВ В ЛАНДШАФТЕ

Шарый П.А. [1], Пинский Д.Л.[1]

[1] *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г.Пущино, Россия*
p_shary@mail.ru

Аннотация: пары химических элементов могут образовывать устойчивые сочетания в почве. Их стабильность описывается с помощью предлагаемого метода наименьшей вариабельности, позволяющего построить ряд стабильностей. Показано, что Cu и Zn образуют наиболее устойчивое сочетание, причем локальная связь между ними на расстояниях ~10 см приводит к согласованному ландшафтному узору на протяженностях ~100 м.

Введение

Локальное взаимодействие химических элементов в почве на расстояниях ~10 см (например, электрохимическое) способно создавать согласованные ландшафтные узоры протяженностью десятки и сотни метров. Этот вопрос недостаточно изучен в литературе; его исследованию для Cu и Zn посвящена настоящая работа. Поскольку это явление может повторяться для различных пар элементов (или других свойств почв), предложена методика выявления и ранжирования устойчивых сочетаний пар (троек и т.д.) элементов.

Материалы и методы

Опытный участок «Алфертищево» (юг Московской области) имеет размер 48 м × 105 м, почва серая лесная сильно смытая под лугом; через него проходит бровка речной долины. Рельеф снят по сетке с шагом 1 м. Для 47 точек наблюдения в двух слоях почвы (верхний 0-10 см и нижний 10-20 см) измерялись концентрации 10-и элементов Сорг, Al, Fe, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Zn и Pb, а также плотность почвы D. Для объединенного слоя 0-20 см концентрации и D рассчитывались как среднее от двух слоев. Концентрации, кроме Сорг, определялись рентгенофлуоресцентной спектроскопией, с известными ошибками измерения. 18 морфометрических величин (МВ) рассчитывались по методике (Shary et al., 2002). Статистическое сравнение концентрации данного элемента с МВ проводилось методами линейной множественной регрессии; модели проверялись по методике кросс-валидации Аллена (Montgomery, Peck, 1982).

При рассмотрении парных корреляции наиболее тесной была отрицательная связь между Cu и Zn: $R^2 = 0{,}553$ ($P<10^{-6}$) в объединенном слое. Это значит, что Cu и Zn связаны

между собой внутри слоя на расстоянии порядка радиуса бура (1,5 см). Значимая корреляция Cu и Zn между верхним и нижним слоями отсутствовала, как и одного элемента (Cu или Zn) между ними. Однако рассмотрение связи между ***вертикальными градиентами*** концентраций Cu и Zn также выявило тесную отрицательную связь между их вертикальными градиентами: $R^2 = 0{,}580$ ($P<10^{-6}$). Это значит, что для Cu и Zn существует локальный механизм связи на расстояниях ~10 см. Этот механизм известен из химии как свойство одного из этих элементов вытеснять другой из раствора из-за возникновения гальванической разности потенциалов в водных растворах.

Результаты

Уравнения регрессии для связи концентраций Cu и Zn (в весовых %) в объединенном слое с рельефом (индексами показаны *t*-статистики) таковы:

$$[\mathrm{Cu}] = -0{,}000529\cdot kmax_{-4{,}77} - 0{,}0589\cdot MCA_{-3{,}78} - 0{,}0000448\cdot И_1 GA_{-3{,}51} + 0{,}00105\cdot И_1 kve_{+2{,}97} + 0{,}0645;\quad R^2 = 0{,}474;\quad P<10^{-3};$$

$$[\mathrm{Zn}] = 0{,}000595\cdot kmax_{+4{,}49} - 0{,}0000897\cdot Z_{-3{,}44} - 0{,}000317\cdot И_1 H_{-3{,}19} - 0{,}000551\cdot kve_{-2{,}53} + 0{,}00344;\quad R^2 = 0{,}443;\quad P<10^{-3};$$

здесь *kmax* – максимальная кривизна (описывает гребневые формы), *MCA* – площадь сбора (гидрологически важная МВ), *GA* – крутизна склонов, *kve* – вертикальная разностная кривизна, *Z* – относительная высота, *H* – средняя кривизна (описывает оба механизма аккумуляции потоков), $И_1$ – различающий участки выше и ниже бровки индикатор. (Индикаторы описывают неколичественные характеристики ландшафта). Расчет по этим уравнениям дал предсказательные карты их пространственного распределения, см. рисунок.

Рисунок.1. Предсказательные карты пространственного распределения Cu (вверху) и Zn (внизу) в слое почвы 0-20 см. Видно, что одна из этих карт близка к негативу от другой

Таким образом, локальное (~10 см) взаимодействие Cu и Zn приводит к согласованным ландшафтным узорам (на протяженностях ~100 м) этих элементов.

Для описания устойчивости пар элементов вводится *коэффициент вариабельности* Kvar, определяемый как умноженное на 100% отношение стандартного отклонения SD к

среднему значению. Коль скоро карты Cu и Zn выглядят как позитив и негатив, то сумма Cu+a·Zn при некотором $a > 0$ варьирует меньше, чем концентрация какого-либо одного из этих элементов. Для отыскания a и нахождения количественной оценки стабильности сочетания элементов разработан ***метод наименьшей вариабельности***, который состоит в минимизации Kvar как функции a для Cu+a·Zn. Для объединенного слоя найденному сочетанию Cu+1,76·Zn отвечает Kvar = 4,38% (12% для Cu и Zn порознь). Доказано, что для антагонистов (коэффициент корреляции $r < 0$) на кривой Kvar(a) существует один экстремум и он есть строгий минимум; a дается формулой $a = (Zn_{CP}+A|r|\cdot Cu_{CP})/[A(A\cdot Cu_{CP}+|r|Zn_{CP})]$, где $A = SD_{Zn}/SD_{Cu}$. Метод обобщен на элементы-спутники ($r > 0$) и на многомерный случай.

Для ранжирования пар элементов по устойчивости их сочетания можно использовать *коэффициент эффективности* сочетания $Keff = \min\{Kvar_{Cu},Kvar_{Zn}\}/Kvar_{Cu+aZn}$ ($Keff > 1$). Это позволило построить ряд устойчивостей пар элементов; наиболее стабильной оказалась пара Cu и Zn (Keff = 2,7).

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАСЕЛЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ МЕЗОФАУНЫ

Шашков М.П.

Центр защиты леса Ленинградской области, г. Санкт-Петербург

max.carabus@gmail.com

Аннотация: исследования динамики биоразнообразия и экосистемных процессов требуют анализа больших объемов первичных полевых данных и литературной информации. Несмотря на объемы накопленных сведений по населению почвенной мезофауны, в отечественных исследованиях специализированные инструменты для обработки подобных данных отсутствуют. Предлагается схема информационной системы, предназначенной для обобщения данных по населению почвенной мезофауны, состоящая из базы данных и пользовательского приложения.

К настоящему времени в литературе, несколькими поколениями исследователей почвенной мезофауны, накоплены громадные объемы полевых данных. Современные исследования биоразнообразия и динамики экосистемных процессов требуют обобщения и анализа этих данных. В то же время исследователям, в процессе выполнения собственных многолетних полевых сборов, приходится манипулировать большими объемами информации.С начала широкого внедрения компьютерной техники во многие области человеческой деятельности, технология баз данных (Codd, 1970) получила большую популярность. Не стали исключением и полевые исследования экологических сообществ. Например, в геоботанике известно много подобных разработок, наиболее удачные из которых обобщенны в виде интегрированной информационной системы IBIS (Зверев, 2007). В то же время, для нужд почвенно-зоологических исследований подобные разработки единичны. В иностранной литературе – это описание базы MACROFAUNA 2.0 (Lipied et all, 2004), а в отечественной литературе они неизвестны вовсе. Большинство исследователей организует данные в виде электронных таблиц Excel, которые не обеспечивают контроль корректности и целостности данных.

Цель данной работы – разработать концептуальную модель информационной системы для хранения и обработки полевых данных исследований сообществ почвенной мезофауны. Центральная задача – создать универсальную структуру реляционной БД для обобщения данных полевых исследований, как первичных материалов исследователей, так и опубликованных в литературе. Структура БД должна быть основана на стандартных методах сборов.

Информационная система с рабочим названием «Carabus» состоит из:

- Базы данных, разработанной в открытой СУБД PostgreSQL;

- Пользовательского приложения для управления данными базы, разрабатываемого на ООЯП Delphi.

База данных состоит из трех блоков:

- Систематический список;
- Библиография и прочие ссылки;
- Полевые данные.

Систематический список имеет составной иерархический ключ. При этом блок систематики объединен внутри себя и с блоком полевых данных системой триггеров на обновление, которые обеспечивают целостность идентификаторов по всей базе при любых изменениях в систематическом списке, что позволяет добавлять виды с середину списков и производить их перенумерацию согласно изменениям в систематике.

Библиография представлена в виде внешней базы или каталога XML или текстовых файлов.

Блок полевых данных состоит из двух разделов:

- Характеристика ПП;
- Данные сборов.

Характеристика ПП может включать многие параметры и иметь связи с внешними базами (геоботанические описания, описания почвенных разрезов и т.д.).

Подавляющее большинство работ по фауне и животному населению почвенной мезофауны основаны на трех типах данных. Согласно этим типам данные сборов в базе организованы в три подраздела (таблицы):

- Фаунистический список;
- Сборы почвенными ловушками;
- Сборы почвенными раскопками.

Основная единица в базе данных – это находка того или иного вида в конкретном месте (пробной площади - ПП). Для сборов методом почвенных ловушек для находки также указывается число собранных экземпляров, а для ПП число ловушек и дней, в течение которых они действовали – для расчета динамической плотности (уловистости). Для сборов методом почвенных раскопок указывается число экземпляров, их онтогенетичекое состояние, почвенный горизонт и его глубина, а для ПП указывается число проб и площадь одной пробы – для расчета плотности.

Выбранная СУБД PostgreSQL обеспечивает непосредственную совместимость практически со всеми современными ГИС. Пространственные данные, в виде указаний на тот или иной географический, административный район или точные географические координаты, могут быть использованы для визуализации данных, содержащихся в базе.

К настоящему времени разработана инфологическая модель БД, в общих чертах описанная выше. Разработка пользовательского приложения, удобного для исследователей и обеспечивающего выполнение большинства основных задач по обработке первичных данных – задача дальнейшей разработки информационной системы.

Литература

Зверев А.А. Программно–информационное обеспечение исследований растительного покрова: Автореф. дис. канд. биол. наук. Томск, 2007.- 22 с.

Codd, E.F. (1970). "A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks". Communications of the ACM 13 (6): 377–387.

Lapied L., Fragoso C., Brown G., Lavelle P. (2004) MACROFAUNA 2.0 – a database management system for assessing the soil fauna diversity of natural and disturbed ecosystems // XIVth International Collocquium on Soil Zoology and Ecology.- P.44.

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

Якушев В.П., Буре В.М.

г. Санкт-Петербург, Агрофизический НИИ Россельхозакадемии
office@agrophys.ru

Технология точного земледелия рассматривает каждое сельскохозяйственное поле как неоднородное. Оно разделяется на некоторое количество новых единиц управления, которые являются однородными (квазиоднородными) участками. Суть точного земледелия заключается в том, чтобы выделить на поле эти участки и обеспечить для всех растений заданного массива оптимальные условия произрастания с учётом выявленной неоднородности.

Система точного земледелия по своей направленности относится к ресурсосберегающим высокоинтенсивным технологиям, рассчитанным на достижении урожайности культуры, близкой к ее биологическому потенциалу, с высоким качеством продукции при минимальных экологических рисках, при этом используются современные достижения научно-технического прогресса, прецизионная техника, современные препараты и информационные технологии. Важную роль в этом процессе играет совершенствование информационного обеспечения методов поддержки решений путем создания баз данных и знаний, экспертных систем и различных математических моделей, в том числе вероятностно-статистического характера, позволяющих находить оптимальные или близкие к ним решения в условиях стохастической неопределенности и изменчивости. В рамках точного земледелия появляется принципиальная возможность разработки системы математических моделей для каждого поля в отдельности, что в принципе позволяет в максимальной степени учесть пространственную неоднородность. В проблематике вероятностно-статистического моделирования можно выделить следующие основные группы решаемых на практике задач.

Оптимизация сроков проведения агротехнологических операций (Якушев В. П., Буре, 2001, 2002) является важнейшим этапом в реализации точного земледелия. Уже на стадии планировании агротехнологий возникает задача оценки момента времени проведения той или иной операции, при этом, как правило, можно оценить ожидаемые потери за единицу времени, связанные с завышением или, наоборот, с занижением оценки времени проведения необходимого мероприятия. В задачах такого типа часто заранее можно указать временные границы проведения мероприятий. Проблема сводится к оценке момента времени проведения необходимых работ внутри некоторого временного интервала.

Ключевым понятием концепции точного земледелия является адаптация элементов агротехнологии к внутриполевому варьированию условий, т.е. приспособление системы хозяйствования к пространственной неоднородности конкретного поля. Очевидно, что с точки зрения такого подхода первостепенное значение приобретает более глубокое изучение самой пространственной неоднородности сельскохозяйственных угодий, разработка методов ее количественного описания и выделения границ изменчивости на заданной территории. Предложены два подхода к оценке пространственной неоднородности по продуктивности сельскохозяйственных культур. Первый из них позволяет оценивать биоэквивалентность двух заданных участков на поле (Якушев В. П., Буре, 2006). Соответствующий алгоритм предполагает наличие данных по урожайности за ряд лет на сравниваемых участках. Второй подход, напротив, по распределению и величине урожайности на конкретном поле за определенный год позволяет выделить однородные технологические зоны на нем (Якушев и др., 2007, Якушев и др., 2008). Решение второй задачи имеет важное практическое значение, так как позволяет осуществить прецизионное внесение удобрений на основе электронных карт урожайности, которые автоматически формируются при уборке сельскохозяйственных культур с помощью комбайнов, оборудованных мониторами и соответствующими

датчиками, с привязкой урожайности к глобальной системе координат (Якушев и др., 2009). Еще одним важным аспектом вероятностно-статистического моделирования является разработка вероятностных моделей оценки риска неурожаев в условиях климатических изменений и оценки влияния доли орошаемых земель на риски неурожаев в условиях засухи (Якушев, Жуковский, 2010; Якушев и др., 2011).

Литература

Якушев В.П., Буре В.М. Методологические подходы к оценке оптимального момента времени проведения агротехнологических мероприятий // Доклады РАСХН.- 2001.- № 4.

Якушев В. П., Буре В. М. Статистическая оценка распределения оптимального момента времени проведения агротехнического мероприятия // Доклады РАСХН.- 2002. -№ 3.

Якушев В. П., Буре В. М. Оценка биоэквивалентности двух участков на сельскохозяйственном поле // Доклады РАСХН.- 2006.- № 5.

Якушев В. П., Буре В. М., Якушев В. В. Выделение однородных зон на поле по урожайности отдельных участков // Доклады РАСХН.- 2007.- № 3.

Якушев В. П., Буре В. М., Якушев В. В. Методология и инструментарий анализа натурных данных в точном земледелии // Доклады РАСХН.- 2008.- № 6.

Якушев В.П., Якушев В.В., Якушева Л.Н., Буре В.М. Электронная карта урожайности как информационная основа прецизионного внесения удобрений. // Земледелие, 2009, №3.

Якушев В.П., Жуковский Е.Е. Климатические изменения и риск в земледелии. // Вестник сельскохозяйственной науки, №2, 2010.

Якушев В. П., Буре В. М., Якушев В. В. Теоретико-вероятностная модель оценки влияния орошаемых земель на риски неурожаев в условиях засухи // Вестник сельскохозяйственной науки, №1, 2011.