



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



УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ
БИОЛОГИИ РАН

Материалы

Национальной конференции
с международным участием



Математическое моделирование в экологии

1-5 июня 2009 г.
г. Пущино

УДК 57+51-7
ББК 28в6
М34

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

Математическое моделирование в экологии / Материалы Национальной конференции с международным участием, 1-5 июня 2009 г.- Пущино, ИФХиБПП РАН, 2009.– 322 с.

ISBN 978-5-904385-13-2

Материалы 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, биогеоэкологическом, 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.

УДК 57+51-7
ББК 28в6
М34

ISBN 978-5-904385-13-2

© ИФХиБПП РАН, 2009
© Эмблема конференции В.Н. Шанин, 2009

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель Комаров Александр Сергеевич, проф., д.б.н., *ИФХиБПП РАН, Пущино*
Почетный со-председатель Молчанов Альберт Макарьевич, проф., д. ф.-м.н., *ИМПБ РАН, Пущино*
Абакумов Александр Иванович, проф., д.ф.-м.н., *ИАПУ ДВО РАН, Владивосток*
Белотелов Николай Вадимович, доц., к.ф.-м.н., *ВЦ РАН, Москва*
Гусев Евгений Михайлович, д.б.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*
Криксунов Евгений Аркадьевич, чл.-корр. РАН, проф., д.б.н., *МГУ, Москва*
Легович Тарзан, проф., Генеральный секретарь Международного общества моделирования в экологии, *Центр морских исследований Института имени Р.Босковича, Загреб, Хорватия*
Логофет Дмитрий Олегович, проф., д.ф.-м.н., *ИФА РАН, Москва*
Медвинский Александр Берельевич, проф., д.ф.-м.н., *ИТЭБ РАН, Пущино*
Ризниченко Галина Юрьевна, проф., д.ф.-м.н., *МГУ им.М.В.Ломоносова, 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*
Суховольский Владислав Григорьевич, проф., д.б.н., *ИЛ СО РАН, Красноярск*
Сурков Федор Алексеевич, доц., к.ф.-м.н., *НИИМиПМ им. И.П.Воровича, Ростов*
Тарко Александр Михайлович, проф., д.ф.-м.н., *ВЦ РАН, Москва*
Титлянова Аргента Антониновна, проф., д.б.н., *ИПА СО РАН, Новосибирск*
Ухманский Януш, проф., *Центр экологических исследований Польской академии наук, Варшава, Польша*
Фрисман Ефим Яковлевич, проф., д.б.н., *ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан*
Ханина Лариса Геннадиевна, доц., к.б.н., *ИМПБ РАН, Пущино*

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель: Комаров Александр Сергеевич, *ИФХиБПП РАН*
Зам. председателя: Ханина Лариса Геннадьевна, *ИМПБ РАН*
Секретарь: Хораськина Юлия Сергеевна, *ИФХиБПП РАН*
Припутина Ирина Владимировна, *ИФХБиПП РАН*
Михайлов Алексей Владимирович, *ИФХБиПП РАН*
Шанин Владимир Николаевич, *ИФХБиПП РАН*
Зубкова Елена Владимировна, *ИФХБиПП РАН*
Бобровский Максим Викторович, *ИФХБиПП РАН*
Быховец Сергей Станиславович, *ИФХБиПП РАН*
Грабарник Павел Яковлевич, *ИФХБиПП РАН*
Мякшина Татьяна Николаевна, *ИФХБиПП РАН*
Аверкиева Ирина Юрьевна, *ИФХБиПП РАН*
Безрукова Мария Геннадьевна, *ИФХБиПП РАН*
Глухова Елена Михайловна, *ИМПБ РАН*
Михайлова Наталья Вячеславовна, *ИМПБ РАН*
Романов Михаил Сергеевич, *ИМПБ РАН*
Рубашко Галина Евгеньевна, *ИМПБ РАН*
Смирнов Вадим Эдуардович, *ИМПБ РАН*
Квиткина Анна Константиновна, *ПуцГУ*
Ломаев Роман Леонидович, *ПуцГУ*

Дорогие коллеги!

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 1 – 5 июня 2009 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 и управление экосистемами, экосистемный подход к управлению природными ресурсами, устойчивое развитие, 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 150 материалов докладов из России, Украины, Беларуси, Азербайджана, Польши, Германии. Среди авторов присутствуют ученые из США, Японии, Нидерландов.

Доклады на Конференции представлены по следующим секциям:

- Методы и подходы в моделировании в экологии
- Моделирование циклов элементов в наземных экосистемах
- Модели деревьев. Модели популяций и сообществ растений
- Модели популяций и сообществ микроорганизмов и животных
- Моделирование водных экосистем
- Моделирование глобальных и региональных процессов
- 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

Оглавление

Абакумов А.И. Моделирование и управление в водных экосистемах	13
Albrecht K. – F., Mißbach S. A unique site independent principle for the growth of the height of spruces and other tree species	15
Архангельская Т.А. Математическое моделирование температуры почвы в случае комплексного почвенного покрова	16
Бабич Л.А., Костерина Е.А. Метод восстановления параметров изотермы сорбции Фрейндлиха по экспериментальным данным	18
Баранов И.П., Степанова В.И. Опыт применения симметрии для повышения информативности почвенно-экологических структур	20
Бархатов Ю.В., Дегерменджи А.Г. Математическая модель экосистемы бореальных лесов Восточной Сибири	22
Бархатов Ю.В., Хромечек Е.Б. Моделирование протозоологического сообщества области хемоклина меромиктических озер	24
Барцев С.И. Отношение подобия и редукция сложности моделей экосистем	25
Барцев С.И., Почекутов А.А. Математическое моделирование дыхания почвы и динамики углерода в почве с учетом её температуры и влажности	27
Барцев С.И., Щемель А.Л., Иванова Ю.Д. Оценка неопределенности прогноза биосферной динамики в минимальной биосферной модели, построенной по принципу наилучшего сценария	29
Безрукова М.Г., Быховец С.С., Грабарник П.Я., Ларионова А.А., Надпорожская М.А. Моделирование разложения органического вещества почвы: сравнение байесовского подхода и метода максимального правдоподобия	31
Белолипецкий П.В. Оценка потока углерода между атмосферой и наземной экосистемой по измерениям CO ₂ на высоких вышках	33
Белолипецкий П.В., Белолипецкий В.М., Генова С.Н. Численное моделирование годового режима вертикальной стратификации солёного озера Шира	34
Белотелов Н.В. Математический формализм и вопросы измерений	36
Бессонов В.В., Рубашко Г.Е. Изучение взаимоотношений муравьев и растений с помощью решетчатой имитационной модели	38
Бобровский М.В., Комаров А.С., Шанин В.Н., Быховец С.С., Михайлов А.В., Ханина Л.Г. Моделирование динамики углерода почвы при различных системах традиционного земледелия и лесопользования в Европейской России	40
Болондинский В.К., Виликайнен Л.М. Моделирование световых кривых у карельской березы и березы повислой	43
Букварева Е.Н., Алешенко Г.М. Разделение ниш - условие или следствие сосуществования видов? Оптимизация разнообразия как дополнительный механизм формирования структуры сообществ	45
Быховец С.С., Ларионова А.А., Мильхеев Е.Ю. Параметризация зависимости интенсивности минерализации органического вещества почв от гидротермических условий	47

Вавилин В.А. Математическое моделирование динамики сообществ анаэробных микроорганизмов	49
Варлагин А.В., Курбатова Ю.А. Оценка углеродного обмена экосистем южной европейской тайги с использованием искусственных нейронных сетей	51
Варчева С.Е. Метод расчета динамики влагозапасов почвы для системы круглогодичного агрометеорологического мониторинга	53
Винокуров И.Ю., Степанов И.Н. Информационно-полевые структуры в агроэкосистемах	55
Волкова П.Е., Суховольский В.Г. Феромонный канал коммуникации как система массового обслуживания	57
Володин Е.М. Математическая модель климата	59
Володченкова Л.А., Гуц А.К. Теоретико-катастрофическая модель лесной экосистемы	60
Воробьев Н.И., Семенов А.М, Шаталов А.А., А.Н.С. van Bruggen, Свиридова О.В. Математическое моделирование циклических процессов в микробно-растительных системах	62
Воротынцев А.В. Расчет двухфазной модели "вода-воздух" переноса почвенной влаги в сетевой библиотеке вычислимых моделей	64
Воротынцев А.В. Экологические модели как сценарии в сетевой библиотеке вычислимых моделей	66
Вульфсон А.Н., Бородин О.О. О некоторых особенностях распространения пассивной примеси над локализованными техногенными источниками в водной и воздушной средах	68
Вшивкова О.А., Хлебопрос Р.Г. Модель управления численностью популяции иксодовых клещей в экосистеме	70
Галицкий В.В. Секционная структура и вертикальное распределение биомассы дерева	72
Галицкий В.В. Синхронная квазитрехмерная (q3D) секционная модель динамики биомассы сообщества деревьев	74
Гишкелюк И.А., Кундас С.П. Математическое моделирование переноса загрязняющих веществ в зоне аэрации с учетом неизотермического влагопереноса и испарения	76
Глаголев М.В., Максюттов Ш.Ш. «Стандартная модель» (aB4) эмиссии CH ₄ из болот Западной Сибири	78
Голубятников Л.Л. Оценки отклика растительности России на ожидаемые климатические изменения	80
Грабарник П.Я. Моделирование асимметричной конкуренции между растениями	82
Грабовский В.И. Травяные кольца. Морфология, динамика, модель	84
Грешилова Н.В. Моделирование географической изменчивости фитомассы лиственных древостоев енисейского меридиана	87
Гусев Е.М., Насонова О.Н. Основы методики оценки динамики водного и углеродного балансов экосистемы хвойного леса	89

Давлетшина М.Р. Оценка устойчивости почв методами математического моделирования	91
Дегерменджи А.Г., Барцев С.И. Принцип наилучшего сценария и минимальные модели биосферы: проблемы и перспективы	93
Дегерменджи Н.Н., Дегерменджи А.Г. Математическое моделирование динамики автохтонного бактериопланктона Красноярского водохранилища	95
Дещеревская О.А., Ольчев А.В. Моделирование углеродного и водного баланса лесов южной тайги при климатических изменениях	97
Дину М.И. Химическая модель распределения ТМ в природных водах зоны северной тайги	99
Долгонос Б.М. Информационный подход к моделированию глобального демографического процесса	101
Дружинина О.В., Масина О.Н. Условия глобальной асимптотической устойчивости трехмерной модели динамики популяций	103
Ермакова М.В. Некоторые аспекты динамики формирования искусственных дендроценозов сосны	105
Жданова О.Л., Фрисман Е.Я. Влияние длины онтогенеза на характер динамики численности популяции	107
Завалишин Н.Н. Минимальные модели реакции болотных экосистем России на климатические изменения и антропогенные воздействия	109
Заволокин А.В. Оценка обилия мелкоразмерного нектона по данным пищевых спектров рыб и составу зоопланктона	111
Зилов Е.А., Мокрый А.В. Прогнозирование состояния экосистемы озера Байкал: математические модели и реальность	113
Зубкова Е.В. Динамика распределения стенобионтных видов разных эколого-ценотических групп по стадиям сукцессии	115
Иванова Н.С. Моделирование восстановительно-возрастной динамики лесной растительности горных темнохвойных лесов на основе систем связанных логистических уравнений	117
Исаев А.С., Суховольский В.Г., Ковалев А.В., Овчинникова Т.М., Тарасова О.В. Оценка экологических и экономических рисков массового размножения лесных насекомых в таежных лесах Средней Сибири	119
Картушинский А.В. Численное моделирование влияния гидрофизических факторов на вертикальное распределение фитопланктона в пресных и соленых водных экосистемах	121
Кастрикин В.А., Париков М.П., Игнатенко С.Ю. Влияние многолетних гидрологических циклов на динамику численности японского журавля и дальневосточного аиста	123
Квиткина А.К., Шанин В.Н. Анализ влияния азотных выпадений на продуктивность лесных экосистем с применением системы моделей EFIMOD	125
Ковалев А.В., Суховольский В.Г. Конструирование и анализ имитационных моделей динамики численности насекомых вредителей леса	127

Коваленко В.И., Кундас С.П. Применение нейронных сетей для прогнозирования миграции загрязняющих веществ в почве	129
Колобов А.Н. Имитационное моделирование динамики древесных сообществ	131
Коломыц Э.Г., Шарая Л.С. Ландшафтно-экологические прогнозные модели углеродного баланса в лесных экосистемах при глобальном потеплении	133
Колтунов Е.В. Феноменологическая модель вспышки массового размножения в системе: «береза – непарный шелкопряд»	136
Комаров А.С., Чертов О.Г. Общая схема моделирования динамики органического вещества почвы: расширение модели ROMUL	139
Комаров А.С., Чертов О.Г., Михайлов А.В., Шанин В.Н., Быховец С.С. Применение индивидуально-ориентированной модели EFIMOD для описания динамики органического вещества в лесных экосистемах при катастрофических воздействиях и изменении климата	141
Корж В.Д. Геохимическая система элементов в гидросфере как экологический стандарт	143
Кошелева Н.Е. Опыт моделирования циклов тяжелых металлов в агроландшафтах	145
Криксунов Е.А., Бобырев А.Е., Бурменский В.А. Математическое моделирование в системе промыслово-биологических и экологических исследований	147
Кулаков М.П. Мультистабильность в системе двух симметрично связанных отображений	149
Кухарук Е.В. Моделирование цикла развития и сезонной динамики популяций ягодного клопа (<i>Dolycoris baccarum</i> L.)	151
Ланкин Ю.П. Моделирование экологической сложности на основе самоорганизующихся адаптивных сетей	153
Лантратова А.С., Шредерс М.А. Структурно-функциональные особенности урбаноэкосистем северных городов России	155
Ларько А.А., Иванова Ю.Д., Овчинникова Н.Ф. Сравнение наземной и спутниковой оценок чистой первичной продукции на примере лесных экосистем Западного Саяна	157
Ларько А. А., Шевырнов А.П., Чернецкий М.Ю. Чистая первичная продукция Красноярского края на основе использования космических и наземных данных (как экспериментальная основа для глобального экологического моделирования)	159
Логофет Д.О. Должен ли математик/"модельер" доверять компьютерам?	161
Лукина Н.В., Орлова М.А. Взаимосвязи почва - растительность в ходе сукцессий бореальных лесов	164
Лукьященко К.И., Архангельская Т.А. Расчетная оценка температуропроводности агросерых почв с помощью ряда современных моделей	166
Медвинский А.Б., Русаков А.В., Гоник М.М., Нуриева Н.И. Популяционная и социальная динамика: проблема предсказуемости	168

Медвинский А.Б., Русаков А.В., Гоник М.М., Соколов М.С., Марченко А.И.	170
Математическое моделирование распространения пыльцы трансгенных растений	
Мечникова С.А., Калякин В.Н., Романов М.С., Кудрявцев Н.В.	172
Динамика величины выводков и размеров гнезд кречета на Ямале в 1973-2008 гг.: лог-линейная модель	
Михайлов А.В., Безрукова М.Г., Шанин В.Н., Михайлова Н.В.	174
Компонентный подход к моделированию лесных экосистем	
Михайлова Н.В.	176
Модельный анализ пространственной динамики популяции травянистых растений на градиенте изменения экологического фактора	
Михайлова Н.В., Михайлов А.В.	178
Трехмерная упрощенная модель световой конкуренции деревьев в лесу	
Мокрый А.В., Зилов Е.А.	180
Использование эксэргии для моделирования водных экосистем	
Молчанов А.Г.	182
Экспериментальное моделирование фотосинтетической продуктивности древостоев	
Надпорожская М.А., Абакумов Е.В., Чертов О.Г.	184
Математическая модель динамики органического вещества почв как инструмент для оптимизации восстановления нарушенных земель промышленных карьеров	
Неверова Г.П., Фрисман Е.Я.	186
Режимы динамики модели двухвозрастной популяции с плотностным лимитированием выживаемости молоди	
Неуймин С.И., Шавнин С.А., Монтиле А.А.	188
Математическая модель анализа траекторий развития признаков элементов методом сжатых отображений (на примере <i>Agropyron cristatum</i> (L.) Beauv.)	
Никифорова А.А.	190
Моделирование процесса биоценоза водоемов комплексного назначения с помощью сетевых математических моделей	
Нуриева Н.И., Медвинский А.Б., Русаков А.В., Бобырев А.Е., Бурменский В.А., Криксунов Е.А.	193
Математическое моделирование влияния биологической инвазии на популяционную динамику водных сообществ Нарочанских озёр	
Овчинникова Т.М., Суховольский В.Г., Волкова П.Е., Ковалев А.В.	195
Моделирование системы феромонного поиска у лесных чешуекрылых: анализ свойств канала коммуникации и трансформации сигнала в шум	
Ольчев А.В., Радлер К.	197
Применение трехмерной модели для описания влияния вырубки на радиационный режим лесной экосистемы	
Павлова В.Н.	199
Проблема оценки влияния изменений климата на продуктивность агросферы России: методология, модели, результаты расчетов	
Перевертин К.А.	201
Феномен гормезиса в фитонематологии или критика «моделей критической точки»	
Петросян В.Г., Назарова К.А., Нагорная Е.Г., Дергунова Н.Н., Бессонов С.А.	203
Комплексная модель оценки кормовых ресурсов местообитаний и плотности парнокопытных животных России на основе данных наземных и дистанционных измерений	

Петросян В.Г., Назарова К.А., Бессонов С.А., Дергунова Н.Н., Нагорная Е.Г. Оценка динамики численности и половозрастной структуры лося (<i>Alces alces</i> L.) в России с использованием имитационной модели и данных многолетнего мониторинга	205
Пилюк А.Г., Грабарник П.Я. Анализ пространственно-временной структуры древостоя: сравнение моделей конкуренции	207
Подгорный К.А. Четырехкомпонентная (n-p-z-d) модель планктонной пищевой цепи	209
Подгорный К.А. Имитационная модель экосистемы Невской губы Финского залива	211
Припутина И.В., Аверкиева И.Ю. Использование биогеохимических моделей миграции вещества для оценки устойчивости лесных экосистем к воздействию атмосферных поллютантов	214
Прокопкин И.Г., Дегерменджи А.Г. Одномерная вертикальная модель экосистемы меромиктического соленого озера Шира (Россия, Хакасия)	216
Пузаченко Ю.Г. Термодинамика живого вещества	218
Пузаченко Ю.Г. Оценка параметров популяции на основе временных рядов	220
Пых Ю.А. Прямой метод Ляпунова в теории экологических систем с нелинейными парными взаимодействиями	222
Разжевайкин В.Н., Шпитонков М.И. Корреляционная адаптометрия. модели и приложения к биологическим системам	224
Ревуцкая О.Л., Фрисман Е.Я. Сложные режимы динамики численности трехкомпонентной популяции	226
Рожков В.А. Методы оценки информативности почвенных признаков и сравнения классификаций	228
Розенберг Г.С. К вопросу о стохастическом объяснении цикличности природных процессов	230
Розенберг Г.С. О возможности построения потенциально-эффективной модели динамики посевов многолетних трав	232
Романенков В.А., Рухович Д.И., Королёва П.В., Шевцова Л.К. Комплексный прогноз эффективности управления запасами органического вещества пахотных почв ЕТР в XXI в. при различных сценариях адаптации	234
Романенков В.А., Сиротенко О.Д., Беличенко М.В., Павлова В.Н. Расчёт урожайности зерновых культур и эффективности минеральных удобрений в условиях одновременного изменения климатических условий и плодородия почвы	236
Романов М.С., Мастеров В.Б. Матричная модель популяционной динамики белоплечего орлана на северо-востоке Сахалина в 2004-2008 гг.	238
Романовская А.А., Слепнева Ю.В. Моделирование запасов углерода почв залежных земель России	240
Ростопшин Ю.А. Модели адаптации и эволюции неравновесных систем	242
Русаков А.В., Гоник М.М., Нуриева Н.И., Медвинский А.Б. Влияние пространственного распределения Vt-резистентных насекомых-вредителей на продуктивность Vt культуры	244

Руховец Л.А., Астраханцев Г.П., Меншуткин В.В., Минина Т.Р., Петрова Н.А., Полосков В.Н. Модели экосистемы Ладожского озера и их применение	246
Сандлерский Р.Б. Термодинамическая модель функционирования экосистем южной тайги на основе дистанционной информации	248
Саранча Д.А. Имитационные технологии в экологических исследованиях	250
Саранча Д.А., Недоступов Э.В. Использование индивидуально – ориентированных моделей для анализа колебаний численности популяций животных	252
Свирижева-Хопкинс А.Ю. Города как компартмент Биосферы: исследование городских углеродного и азотного циклов и моделирование загрязнений. (Cities as a compartment of Biosphere: investigating urban carbon and nitrogen fluxes and forecasting cross-boundary pollution)	254
Секретенко О.П., Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф. Геостатистический анализ распределения запасов подстилки в болотных березняках Западной Сибири	256
Сизов И.Е. Новый индекс конкуренции на основе угловой оценки зон влияния соседних деревьев	258
Смирнов В.Э. Функциональные классификации растений в задачах моделирования напочвенного покрова	260
Степанов И.Н. Потоки карт пластики рельефа – формализованные экологические системы	262
Сулейманов Н.Р., Аббасова Р.Я. Математическая модель расчета геометрии активной зоны почвы относительно влажности набухания	264
Сулейманов Э.Н. Мониторинг экологического состояния почв относительно почвенно-экологической природной модели	266
Суховольский В.Г. Методы физики конденсированного состояния в экологическом моделировании	268
Тарко А.М. Моделирование роли биосферы в компенсации глобального потепления	270
Татаринов Ф.А., Сысоев Н.Е., Молчанов А.Г. Оценка и минимизация искажений при измерении дыхания почвы по открытой схеме	272
Татаринов Ф.А., Ченчала Э. (Cienciala, E.) Применение модели углеродного цикла CO ₂ FIX в условиях Чешской республики	274
Титлянова А.А. Сукцессии и биотический круговорот	276
Трофимова Г.Ю. Структурные инварианты видового богатства растений дельты Амударьи в условиях изменяющегося гидрологического режима (1944-1989 гг.)	278
Трубников Б.А., Трубникова О.Б. Квази-Паретовский закон в новой квантовой статистике	280
Трубникова О.Б., Трубников Б.А. Квази-Паретовский закон и оогенез лягушки	282
Турков С.Л. Моделирование процессов устойчивого развития территорий	284
Тучковенко Ю.С. Численное моделирование эвтрофикации водных экосистем	286

Урманский Я. Изменчивость особи и регуляция популяции – влияние внутривидовой конкуренции	288
Фурсова П.В. Управление структурой сообществ микроорганизмов	289
Хавинсон М.Ю. Подходы к математическому моделированию конкуренции специалистов на рынке труда региона (на примере Еврейской автономной области)	291
Ханина Л.Г., Комаров А.С., Бобровский М.В., Шанин В.Н., Быховец С.С., Михайлов А.В. Моделирование разнообразия лесной растительности при различных сценариях динамики климата и лесохозяйственных воздействий	293
Хораськина Ю.С., Комаров А.С., Безрукова М.Г., Лукина Н.В., Орлова М.А. Модель динамики кальция в северотаежных лесных экосистемах	295
Чебакова Н.М., Парфенова Е.И., Баранчиков Ю.Н. Прогноз потенциальных местообитаний сибирского шелкопряда для Северной Евразии	298
Чижикова Н.А., Фардеева М.Б., Александрова С.В. Изучение пространственной структуры ценопопуляций разных жизненных форм с помощью анализа точечных распределений	300
Шалухина Н.В., Варлагин А.В., Ли Ч., Курбатова Ю.А. Моделирование потоков CO ₂ между атмосферой и верховым болотом южной Европейской тайги	302
Шанин В.Н., Комаров А.С., Михайлов А.В. Влияние способа ведения лесного хозяйства на баланс биогенных элементов в лесных экосистемах: модельный подход	304
Шарая Л.С. Пространственная организация лесной экосистемы Жигули	306
Шашкин А.В., Ивановский А., Ваганов Е.А. Модель роста и формирования годовичных колец хвойных в зависимости от климатических условий	308
Шитиков В.К., Абросимова Э.В. Статистический анализ и оценка биоразнообразия речных сообществ макрозообентоса	310
Шлычков В.А. Гидродинамические модели течений в водоемах	312
Юрова А.Ю., Володин Е.М. Расчет динамики органического вещества почв в модели климата с интерактивным углеродным циклом	314

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Абакумов А.И.

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
abakumov@iacp.dvo.ru

Экосистема рассматривается как динамическая система, с изменением ее характеристик во времени. Предлагается использовать многомодельный подход и замкнутые модели с последующим переходом к незамкнутым. При многомодельном подходе разные модели одной и той же экосистемы связываем условиями согласования. В моделях решаются задачи оптимального управления биоресурсами.

Одним из основных способов макроописания водных экосистем является анализ структуры и величин потоков вещества и/или энергии между блоками системы - сообществами близких видов или совокупностями близких по свойствам веществ. Такое описание можно представить в виде ориентированного графа потоков вещества и/или энергии между блоками (Свирижев, Логофет, 1978).

1. Этапы моделирования

При моделировании водных экосистем предлагается сначала рассматривать замкнутые модели. Замкнутость самой экосистемы можно понимать по-разному - термодинамическая, биотическая (Губанов, Дегерменджи, 2003) и другие виды замкнутости. Мы подразумеваем здесь количественную замкнутость модели в следующем смысле.

Пусть экосистема описывается моделью, в основе которой лежит система дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = f(t, x, a), \quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ функция состояния системы в зависимости от времени $t \in T$, T - некоторый промежуток множества действительных чисел. Выделен также вектор a параметров системы уравнений, назначение которых мы обсудим ниже. Под моделью (1) будем понимать указанную систему дифференциальных уравнений вместе с необходимыми дополнительными соотношениями. Назовем модель (1) (количественно) *замкнутой*, если для всех рассматриваемых значений t в некоторой инвариантной по x относительно системы уравнений (1) области D конечномерного пространства R^n и для некоторого множества A изменения параметров a выполняется тождество

$$\varphi(t, x, a) \equiv 0. \quad (2)$$

Такая замкнутость не означает термодинамической изолированности и даже закрытости, она лишь означает некоторую уравновешенность потоков моделируемых характеристик (вещества, энергии и т.п.) через границу системы.

За счет тождества (2) модель (1) исследуется проще, чем общий случай (Арнольд, 1978). Используя накопленную информацию, можно переходить к незамкнутым моделям с целью повышения достоверности моделирования.

Далее предлагается использовать многомодельный подход: разрабатывать и исследовать серии моделей для одного и того же объекта, описывающих его с различной степенью подробности и точности. Взаимосвязи таких моделей будем характеризовать их согласованностью по параметрам с критерием наибольшей близости решений.

Пусть другая модель этой же экосистемы имеет вид

$$\dot{y} = g(t, y, b) \quad (3)$$

с функцией состояния $y(t) \in R^m$ и вектором b параметров из некоторого множества B . В моделях (1) и (2) имеется в виду, что часть параметров мы определяем из литературных источников, экспериментальных данных, но часть параметров в обеих моделях не поддаются

удовлетворительному определению. Вот они-то и обозначены $a \in A$ и $b \in B$. Кроме того, функции x и y могут быть связаны некоторым соотношением

$$y = h(t, x, c) \quad (4)$$

при некотором векторе c неизвестных параметров. Условие *согласования* по неизвестным параметрам можно задать в виде

$$\left\| \frac{\partial h(t, x, c)}{\partial x} \cdot f(t, x, a) - g(t, h(t, x, c), b) \right\|_{a,b,c} \rightarrow \inf. \quad (5)$$

Под нормой понимается норма пространства $L_2(T \times D)$. Условие (5) означает согласование моделей (1) и (3) с помощью условия (4) по скоростям изменения характеристик x, y .

Подобный многомодельный подход с использованием количественной замкнутости моделей можно реализовывать и на системах уравнений более сложного типа.

2. Управление биоресурсами

Следующий цикл задач связан с эксплуатацией биоресурсов. Рассматриваем точечные или распределенные модели для биологических сообществ, основу моделей составляют системы дифференциальных уравнений. В нашем случае распределенность предполагается по характеристикам внутривидовых неоднородностей в сообществах. Задачи оптимального управления на основе подхода Лагранжа сводятся к начально-краевым задачам для систем дифференциальных уравнений (Фурсиков, 1999). Применение численных методов позволяет находить вероятных кандидатов в оптимальные решения. Модели применяются при анализе функционирования водных экосистем, оценке биопродуктивности водоемов (Abakumov, 2007).

Заключение

Предложен способ математического моделирования водных экосистем, использующий замкнутые модели и многомодельные описания при условиях согласованности моделей. Условия согласования используются при параметрической идентификации моделей, то есть определении численных значений параметров на основе экспериментальных данных об объекте моделирования.

Представленные модельные конструкции и задачи оптимизации применяются для исследования экосистем дальневосточных морей России.

Литература

- Арнольд В.И. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений.- М.: Наука, 1978.- 304 с.
- Губанов В.Г., Дегерменджи А.Г. О замкнутости биотического круговорота вещества в надорганизменных системах (методологический аспект). Мера биотической замкнутости // Очерки экологической биофизики.- Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003.- С. 318 – 333.
- Свирижев Ю. М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ.- М.: Наука, 1978.- 352 с.
- Фурсиков А.В. Оптимальное управление распределенными системами. Теория и приложения.- Новосибирск: Научная книга, 1999.- 352 с.
- Abakumov A.I. Optimum harvesting in biological communities // The 6th European Conference on Ecological Modelling: Conference proceedings.- Trieste: Internationale Centre for Theoretical Physics, 2007.- P. 23.

A UNIQUE SITE INDEPENDENT PRINCIPLE FOR THE GROWTH OF THE HEIGHT OF SPRUCES AND OTHER TREE SPECIES

Albrecht K. – F., Mißbach S.

Technical University Dresden, Dresden, Германия
albrecht@forst.tu-dresden.de

Abstract: on the basis of measurements on single trees and of growth tables for mean heights of spruce stands (collected by A. v. Guttenberg, E. Assmann and F. Franz and further authors) the growth data series for different site qualities have been transformed to an site independent unique form by a simple linear transformation. First similar results for other tree species have been obtained also.

On the basis of measurements on single trees and of growth tables for mean heights of spruce stands (collected by A. v. Guttenberg, E. Assmann and F. Franz and further authors) the growth data series for different site qualities have been transformed to an unique form by a simple linear transformation. It came out furthermore that the transformed data series for read oaks also leads to an unique form which nearly agrees with that for spruces. Also for other tree species there are indications that their transformed growth data series roughly agree with those from spruces and read oaks. All these points to the existence of a unique growth principle independent of the site and nearly independent of the tree species.

The transformation into the unique normal form is simple:

$$X' = X/X_m \text{ and } t' = t/t_m \quad (1)$$

with t = age of the tree, t_m = age of the tree when the maximum of the increases is reached,

X = height of the tree and X_m = height of the tree at the age t_m .

To perform this transformation one needs the transformation parameters t_m and X_m . They may be obtained by a suitable interpolation of the data for X and t . (This may be done e.g. by the help of 3th-order-polymoms.) This may be difficult in the case if not enough data exist before t_m and than the resulting transformed data series may be not exact.

It seems that the described transformation may be used in different ways for forestry e.g.:

- Comparison and use of all data of a tree species from different experimental areas for a more precise determination of the growth on sites of special interest.
- Detection of qualitative and quantitative influences (as changes in nutrient concentrations or climate changes) on sites because such changes should cause deviations from the unique transformed growth curve.

First results indicate that similar results can be obtained for other growth indicators also.

References:

- Albrecht K.-F.: Transformation des Höhenwachstumsverlaufs von Fichtenbeständen auf eine einheitliche Normalform, Poster, Forstwissenschaftliche Tagung, 01.02. 2006, Tharandt.
- Albrecht K.- F. und S. Missbach: Standortunabhängige Beschreibung von Höhenwachstumsgängen für Mittelhöhen von Beständen und Mittelwerten von Einzelbäumen, Poster, Forstwissenschaftliche Tagung 2008, Freiburg.
- Assmann E, (1965): Waldertragskunde, Bayrischer Landwirtschaftsverlag, München/
- Assmann, E. und Franz, F. (1963, 2. Aufl. 1972): Vorläufige Fichten- Ertragstafel für Bayern, Institut für Ertragskunde der Forstlichen Forschungsanstalt München.
- Assmann E. und Franz, F. (1965): Vorläufige Fichtenertragstafel fuer Bayern, Forstwissenschaftliches Zentralblatt 84 (1/2), Sonderdruck Verlag Paul Paray, Hamburg und Berlin, 1-68:
- Bauer, F. (1953): Die Roteiche J.D. Sauerländer´s Verlag, Frankfurt a. M.
- Backman (1943): M. Wachstum und organische Zeit, J. A. Barth Verlag, Leipzig.
- Bäker, O. U. und Bachmann, P. (2002): Vorlesungsscript Waldwachstum I/II, ETH, Zürich.
- Erteld, F. (1962): Ertragstafelauszüge für den Gebrauch in der Praxis, 2. Auflage, Neumann Verlag, Radebeul.
- Guttenberg, A. V. (1915): Wachstum und Ertrag der Fichte im Hochgebirge, Franz Deuticke Verlag, Wien, Leipzig.
- Missbach, S. (2008): Methodische Untersuchungen zu standortunabhängigen Eigenschaften des Wachstums von Bestandeshöhen und Baumhöhen, Diplomarbeit TU-Dresden, Fachrichtung Forstwissenschaften.
- Zeide, B. (2004) Intrinsic units growth modeling, Ecological Modelling, Vol. 175 Issue 3, pp. 249-259.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ В СЛУЧАЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Архангельская Т.А.

Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
arhangelskaia@rambler.ru

Аннотация: математическое моделирование температурного режима агросерых почв, входящих в состав палеокриогенных комплексов, проводилось на основе использования метеоданных и (1) данных о строении почвенного профиля в точках сетки либо (2) данных о пространственном распределении физических свойств почв. Оба подхода позволили адекватно воспроизвести расхождения в температуре контрастных почв, выявленные при проведении полевых экспериментов.

Введение

При математическом моделировании глобальных биосферных процессов, при экологическом прогнозировании, при решении различных практических задач возникает потребность в получении расчетных оценок температуры почвы на основе имеющихся метеоданных или для прогнозируемых изменений климата. Температурный режим почвы определяется не только условиями на ее поверхности, т. е. текущей погодой и особенностями взаимодействия деятельной поверхности с приземным слоем воздуха, но и собственными тепловыми свойствами почвы. В случае комплексного почвенного покрова с выраженной латеральной изменчивостью тепловых свойств почв при моделировании необходимо эту изменчивость учитывать. В докладе предполагается рассмотреть результаты математического моделирования температурного поля комплексов агросерых почв.

Объекты исследования

Объектами исследований были комплекс агросерых почв Владимирского ополья (опытные поля ВНИИСХ РАСХН, Суздальский р-н Владимирской обл.) и комплекс агросерых почв правобережья р. Оки (территория ЭПС ИФХ и БПП РАН, Серпуховской р-н Московской обл.). Распространено мнение, что первичным фактором дифференциации почвенного покрова исследованных территорий был реликтовый криогенный микрорельеф, обусловленный расположением этих территорий в позднеплейстоценовой перигляциальной области Русской равнины. В микропонижениях древнего криогенного рельефа, возникших при деградации многолетней мерзлоты, были сформированы почвы с мощным гумусовым горизонтом интенсивно черного или серовато-черного цвета (ныне расположенный под пахотным слоем второй гумусовый горизонт – ВГГ). Почвы без ВГГ и высоким (80-120 см) уровнем залегания карбонатов были сформированы на локальных водоразделах. На переходных участках между микроповышениями и микропонижениями сформировались почвы переходного строения. В литературе имеются указания на крайне слабую выраженность или даже полную выравненность современного агрогенного микрорельефа. Современные профили пахотных почв ополья включают горизонты Апах-(Ah)-AE-BEg'-EB-(B)-C в почвах палеопонижений, Апах-B-Вса-Сса в почвах палеоповышений и Апах-EB-(B)-C-(Csa) в почвах переходных участков. Почвенный покров территории ЭПС ИФХ и БПП РАН представлен почвенными комбинациями, сходными с комплексами почв Владимирского ополья. Для обоих объектов характерна значительная пространственная вариабельность плотности почв, их гранулометрического состава и содержания органического углерода. Температурное поле, формирующееся в этих условиях, является закономерно латерально неоднородным: глубокие слои почв с ВГГ являются более холодными, чем глубокие слои почв с минеральными подпахотными горизонтами, в течение вегетационного периода и более теплыми – в осенне-зимний период.

Результаты и обсуждение

При математическом моделировании пространственного распределения температуры почв в комплексном почвенном покрове динамику температуры в отдельных точках почвенного покрова рассчитывали, задавая одинаковые условия на поверхности и учитывая различия в строении почвенного профиля. Использовали данные ближайшей метеостанции и регрессионные соотношения, связывающие температуру воздуха с температурой верхнего слоя почвы. Температуропроводность почв при известной влажности рассчитывали в соответствии с принадлежностью интересующего слоя к тому или иному горизонту, используя логнормальную параметризацию соответствующих экспериментальных зависимостей, либо по данным о плотности почвы и содержании в ней органического углерода, используя полученные ранее эмпирические соотношения. Применение первого подхода для моделирования пространственного распределения температур в почвенном покрове Владимирского ополья позволило получить картину, близкую к реальной: модель несколько недооценивала скорость летнего прогревания почв ополья, но верно отражала разницу в температуре контрастных участков. В точках с большей мощностью гумусированного слоя расчетная температура была ниже; для глубины 50 см разница составляла около 2°C. Для комплекса почв южного Подмосковья при расчетах температуропроводности использовались не данные о строении профиля (подход «горизонт-температуропроводность», как в случае почв ополья), а результаты опробования агрофизических свойств интересующего участка (подход «свойства-температуропроводность»). Как и в случае почвенного покрова Владимирского ополья, модель верно отражала характер пространственного распределения температуры. Выявленные в процессе моделирования зоны наибольшего и наименьшего прогревания в целом совпадали с обнаруженными при проведении полевых измерений.

Выводы

В модельных экспериментах с заданием идентичных условий на поверхности расчетные температурные режимы агросерых почв с различными физическими свойствами закономерно отличаются. Величина полученных при расчетах различий практически совпадает с выявленными при полевых исследованиях. Эти результаты подтверждают, что обнаруженная пространственная изменчивость почвенных свойств является достаточной для формирования в комплексном почвенном покрове латерально неоднородного температурного поля. Они также являются косвенным подтверждением представления о том, что в условиях агрогенного микрорельефа и однородной антропогенной растительности основным фактором формирования латеральных неоднородностей температурного поля почв является латеральная изменчивость почвенных свойств.

Литература

- Архангельская Т.А. Закономерности пространственного распределения температуры почв в комплексном почвенном покрове (на примере агросерых почв центральной части Русской равнины). Автореф. дисс. на соискание уч. ст. д.б.н. Москва, 2008.- 50 с.
- Архангельская Т.А. Параметризация и математическое моделирование зависимости температуропроводности почвы от влажности // Почвоведение.- 2009.- № 2.- С. 178-188.
- Архангельская Т.А., Бутылкина М.А., Мазиров М.А., Прохоров М.В. Свойства и функционирование пахотных почв палеокриогенного комплекса Владимирского ополья // Почвоведение.- 2007.- № 3.- С. 261-271.
- Архангельская Т.А., Губер А.К., Мазиров М.А., Прохоров М.В. Температурный режим комплексного почвенного покрова Владимирского ополья // Почвоведение.- 2005.- № 7.- С. 832-843.
- Архангельская Т.А., Прохоров М.В., Мазиров М.А. Годовая динамика температуры пахотных почв палеокриогенных комплексов Владимирского ополья // Криосфера Земли.- 2008.- Т. XII. № 3.- С. 80-86.
- Архангельская Т.А., Худяков О.И., Бедрина Т.Н., Митусов А.В. Латеральная изменчивость агрофизических показателей и неоднородность гидротермического поля в комплексном почвенном покрове южного Подмосковья // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение.- 2005.- № 2.- С. 8-15.

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОТЕРМЫ СОРБЦИИ ФРЕЙНДЛИХА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Бабич Л.А.¹, Костерина Е.А.²

¹Казанский государственный университет, Казань, Россия
1293@rambler.ru

²Казанский государственный университет, Казань, Россия
Ekaterina.Kosterina@ksu.ru

Аннотация: работа посвящена построению математического метода восстановления параметров изотермы сорбции Фрейндлиха по экспериментальным данным.

Приповерхностный слой грунта является преградой для проникновения различных загрязнителей в водоносные слои. Такие защитные свойства грунта обеспечиваются, в частности, его способностью сорбировать практически все виды загрязнения.

Для моделирования процессов сорбции в пористой среде чаще всего используются изотермы Лэнгмюра и Фрейндлиха (Киреев, 1978), числовые параметры изотерм определяются свойствами грунта и сорбируемого вещества. Данная работа посвящена построению математического метода восстановления по экспериментальным данным числовых значений параметров изотермы Фрейндлиха

$$a(C) = K \cdot C^p,$$

где $a(C)$ – количество сорбированного грунтом вещества, C – концентрация вещества в порах грунта, $K > 0$, $p > 0$ – числовые параметры, зависящие от конкретной пары грунт-вещество.

Предполагается, что проведен следующий эксперимент. Имеется горизонтальная почвенная колонка с образцом почвы. Сначала почва пропитывается чистой водой до полного насыщения. Затем подается раствор некоторого вещества известной концентрации C_0 . Вещество движется по почвенному профилю за счет механизма диффузии. Часть вещества, проникающего в почвенный образец, сорбируется частицами почвы. Со временем вещество достигает противоположной границы почвенного образца. В ходе эксперимента измеряется концентрация вещества на противоположной границе образца.

Предполагается, что поперечное сечение колонки много больше длины образца, поэтому задачу о распространении вещества в колонке можно считать одномерной.

В прямую задачу распространения вещества по почвенному профилю входит уравнение баланса массы водорастворимого вещества с учетом диффузии и сорбции, два граничных условия (для левой и правой границ почвенного образца) и начальное условие.

Задачу отыскания K и p , соответствующих экспериментальным данным, можно сформулировать как задачу отыскания точки минимума функционала

$$J(K, p) = \int_0^T (C_{obs}(L, t) - C_{comp}(L, t))^2 dt, \quad (1)$$

где T – длительность эксперимента, $C_{obs}(L, t)$ – концентрация на выходе из колонки, полученная экспериментально, $C_{comp}(L, t)$ – концентрация на выходе из колонки, полученная в результате решения прямой задачи.

Прямая задача была записана в безразмерных переменных и аппроксимирована неявной разностной схемой на равномерной сетке. Для отыскания решения прямой задачи применялся метод Ньютона, на каждой итерации которого использовался метод прогонки (Самарский, Гулин, 1989). Для отыскания точки минимума функционала 1 использовался метод проекции градиента (Васильев, 1974). Для отыскания компонентов градиента решались сопряженные задачи. Параметр K может принимать значения от 10^{-6} до 10^2 , а

p может быть как больше, так и меньше единицы (Babu, Ramakrishna, 2003). Нами предполагалось, что $K \in [0.1;10]$ и $p \in [0.2;5]$.

Далее метод отыскания коэффициентов изотермы Фрейндлиха был реализован для вертикальной почвенной колонки. Кроме процессов диффузии и сорбции был учтен процесс конвективного переноса вещества под воздействием силы тяжести.

Были проведены многочисленные вычислительные эксперименты с целью исследовать свойства функционала 1, оценить скорость сходимости и устойчивость метода.

В таблице 1 приведены данные, характеризующие работу метода в случае вертикальной почвенной колонки, когда в качестве экспериментальных значений выходных концентраций примеси использовались результаты решения прямой задачи.

Таблица 1

Истинные значения K, p	Начальные приближения	Восстановленные значения K, p	Значение функционала	Количество итераций	Относительная погрешность
$K=0,75$ $p=0,75$	$K=0,25$	$K=0,74957$	$1,93021E-07$	36	0,000566929
	$p=0,25$	$p=0,74712$			0,003845683
	$K=0,25$	$K=0,75048$	$7,06401E-07$	42	0,000641812
	$p=1,25$	$p=0,75558$			0,007439621
	$K=1,25$	$K=0,75079$	$6,29981E-07$	30	0,001059255
	$p=0,25$	$p=0,74586$			0,005517151
$K=5,8$ $p=3,75$	$K=1,25$	$K=0,75073$	$6,48008E-07$	46	0,00097146
	$p=1,25$	$p=0,75532$			0,007095413
	$K=5,3$	$K=5,78824$	$8,7721E-07$	63	0,002028432
	$p=3,25$	$p=3,73448$			0,004139309
	$K=5,3$	$K=5,78189$	$8,65816E-07$	49	0,003123202
	$p=4,25$	$p=3,75093$			0,000247758
$K=8,7$ $p=0,3$	$K=6,3$	$K=5,83228$	$9,12093E-07$	39	0,00556591
	$p=3,25$	$p=3,77056$			0,005482039
	$K=6,3$	$K=5,83695$	$8,85279E-07$	59	0,006371544
	$p=4,25$	$p=3,76516$			0,004041758
	$K=8,2$	$K=8,68367$	$9,90621E-07$	554	0,001876901
	$p=0,2$	$p=0,29795$			0,006834857
$K=8,7$ $p=0,3$	$K=8,2$	$K=8,68396$	$9,51523E-07$	522	0,001843273
	$p=0,8$	$p=0,29788$			0,00707473
	$K=9,2$	$K=8,71650$	$9,81357E-07$	723	0,001896144
	$p=0,2$	$p=0,30213$			0,007100546
	$K=9,2$	$K=8,71657$	$9,92978E-07$	778	0,001905077
	$p=0,8$	$p=0,30219$			0,007303443

Литература

- Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах.– М.: Недра, 1984.
Васильев Ф.П. Лекции по методам решения экстремальных задач.– М.: Изд-во Московского ун-та, 1974.
Киреев В.А. Краткий курс физической химии.– М.: Химия, 1978.
Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы.– М.: Наука, 1989.
Babu B.V., Ramakrishna V. Modeling of adsorption isotherm constants using regression analysis and neural networks // Proc. Of 2-nd Int.Conf. on Water Quality Management, Paper No II-1.– New Dehli, 2003.– P.II-1 – II-11.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИММЕТРИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Баранов И.П., Степанова В.И.

Институт биологического приборостроения Российской Академии наук, Пущино, Россия
CEK-MO@rambler.ru; agroecology@inbox.ru

Аннотация: материальные почвенно-экологические системы и структуры, выделяемые на картах методом пластики рельефа, относительно упорядочены, что позволяет с большим приближением описать их с помощью понятий аппарата теории симметрии. Для чего использованы методы, описанные в книге Шубникова А.В., Копчика В.А. «Симметрия в науке и искусстве». 2004. Почвоведение ранее основывалось на понятиях «сходство-различие». С 1970 г. вместо этой пары стали изучать пару «структура – функция», что резко повысило уровень знания

Введение. Карты пластики рельефа получили широкое распространение и стали основой при крупно- и среднemasштабных съемках почвенных и геологических структур. Теперь наступил очередной этап – формализации этих структур. Обычно дается словесное описание структур: округлые, вытянутые, древовидные и т.п. Нами делается попытка описания этих структур с помощью символов теории симметрии.

Объекты и методы. Используются почвенно-экологические карты, составленные методом пластики рельефа в бассейне р. Оки. Контурами этих карт являются выпуклостипотоки (рисунок 1), выявленные при почвенно-экологическом картировании М 1:10 000 авторами настоящей статьи. Показаны лишь некоторые формы из множества разнообразных форм.

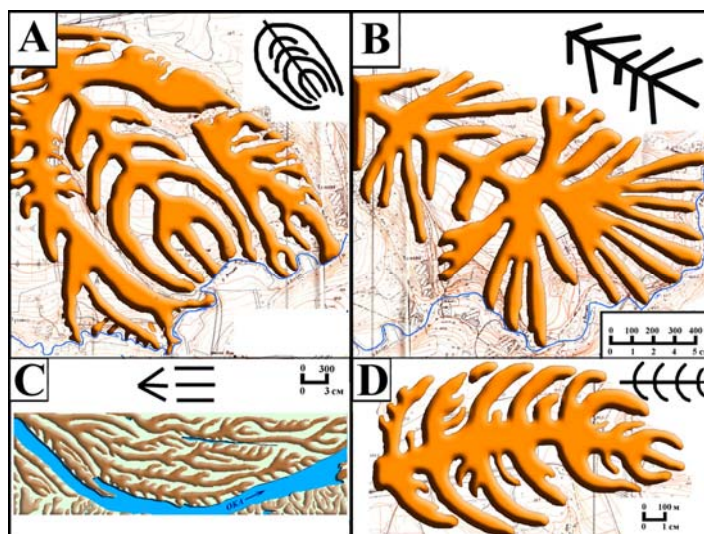


Рисунок 1. Почвенно-экологические потоковые структуры: А, В, D – бассейн реки Восьма (бассейн Оки); С – часть поймы реки Оки в районе Приокско-террасного заповедника

Эти формы упрощены и скелетизированы (схематизированы) в целях получения абстрактных геометрических структур (показано справа, верх). Процедура схематизации не простая, требует навыка, понимания процесса формализации, который всегда сопровождается упрощением конфигураций. Превращение структур рисунка 1 в собственную схему или скелет выполняет задачу упрощения целостной формы. Скелетизация позволяет создать идеализированный образ путем отвлечения от деталей и схватывания наиболее существенных черт геометрического строения почвенно-экологической поверхности. При скелетном представлении структуры непрерывно становятся все более тонкими и сглаживаются вплоть до сохранения только элементов, составляющих его «каркас». Скелет – целостное представление структуры, характеризующее

все его точки одновременно. При его построении происходит огрубление, сглаживание локальных особенностей конфигурации исходной фигуры. Информативность скелета определяется тем, что он сохраняет ряд значимых свойств исходного изображения: связность, ориентацию главной оси, симметрию. Скелет дает возможность сохранить пространственную конфигурацию частей объекта, не сохраняя их локальные свойства (рисунок 2).

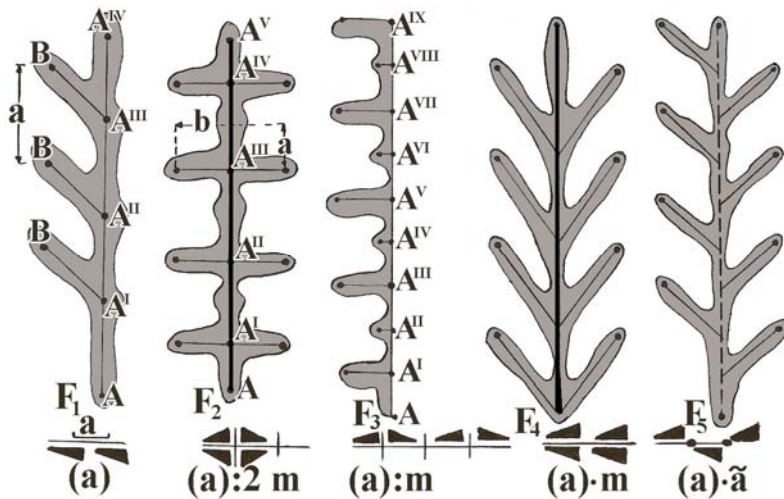


Рисунок 2. Пять почвенно-экологических структур (фигуры F_{1-5}) и характеризующие их символы симметрии в виде сочетания фигур по элементам симметрии и формул симметрии (внизу). Тонкие горизонтальные линии – оси переносов (a); толстые линии – обыкновенные плоскости перпендикулярно к чертежу; штриховые линии – плоскости скользящего отражения \tilde{a} ; двоеточие в символах (:) означает перпендикулярность, одна точка (·) – параллельность

Построение скелета связано с процедурой сжатия фигуры. Для определения скелета каждая точка фигуры представляется как центр наибольшего круга, который целиком содержится в этой фигуре. Для точек контура радиусы таких кругов равны нулю. Скелетом фигуры называется геометрическое место центров максимальных кругов, т.е. таких, которые не содержатся в других кругах. Эти центры вместе с радиусами соответствующих максимальных кругов определяют медиальную ось фигуры.

Обсуждение результатов. Перед нами важный вид абстрагирования почвенных структур – построение одномерного линейного образа (скелетного), который позволяет определить по геометрии узора тип структуры (симметрии) почвенно-экологической поверхности и ее генезис. Но это невозможно сделать по традиционным картам, насчитывающим всего несколько обобщенных образов (овальные, вытянутые, древовидные) и понимающим под структурами буквенные индексы и условные знаки. На картах пластики структура – это совокупность устойчивых связей почвенно-экологической поверхности, обеспечивающих её целостность и тождественность самой себе, т.е. сохранение основных свойств при различных преобразованиях. под почвенной *структурой* следует понимать инвариантный аспект почвенной системы, имеющей три плана: 1) статический – устройство почвенной системы, 2) динамический, т.е. форма (структура) почвенного движения и 3) эволюционный, т.е. *структура* почвенного развития – закономерное изменение почвенной формы движения и статистического плана устройства почвенной системы. Отсюда следует, что почвенная форма движения – это его *структура*, т.е. форма почвенного движения – это *структура* почвенного движения;

Выводы. Идея структурирования почвенной и почвенно-экологической поверхности началась в России с 1970-х годов. В.М. Фридландом и другими структуры извлекались из карт, составленных на основе элементарных почвенных ареалов, которые имели ровную поверхность, одинаковый по всей площади контура состав почв, изотропность (отсутствие пространственной ориентации). Такие безликие «структуры» описывались словами и показывались на картах буквенными индексами, или условными знаками. Появление и широкое распространение карт пластики рельефа позволило, используя теорию симметрии, впервые описать количественно реальные почвенно-экологические структуры (рисунок 2).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКОСИСТЕМЫ БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСОВ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Бархатов Ю.В., Дегерменджи А.Г.

Институт Биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
barkh@ibp.ru

Аннотация: разработан новый метод создания локальных биофизических моделей лесных экосистем. Метод имеет дело с реальным биологическим объектом – биоценозом, тогда как традиционные методы создают искусственную градацию. Построена точечная математическая модель экосистемы бореальных лесов Восточной Сибири, способная к пространственным расчетам на основе предложенного метода.

Природные экосистемы Сибири играют существенную роль в стабилизации атмосферы и гидросферы в условиях современного климата, особенно в связи с аккумулярованием тепличных газов из атмосферы. В настоящее время неизвестно, как будут функционировать и изменяться существующие природные экосистемы на территории Сибири в условиях меняющегося глобального и особенно регионального климата.

Традиционным подходом для глобальных и локальных вегетационных моделей является так называемый "клеточный" (cell grid) метод. Нами разработан более простой в техническом плане, но не менее действенный метод. Этот метод основан на разделении рассматриваемого региона на компартменты, однородные по своим структурно-функциональным характеристикам (биоценозы). Каждый из этих компартментов моделируется как целое в его условном центре, однако задается и градиент изменения параметров от центра к границам компартмента. Моделирование компартмента-биоценоза происходит при помощи обыкновенных дифференциальных уравнений. Число компартментов и границы между ними определяются путем анализа баз данных по исследуемому региону. Данный метод предпочтительнее еще и потому, что имеет дело с реальным биологическим объектом – биоценозом, тогда как традиционные методы создают искусственную градацию.

Схема компартментов включает границы биоценозов, а также их условные центры. Модельный центр не обязательно физический центр компартмента-биоценоза, это точка, в которой значения определяющего компонента биоценоза равно среднему по всему биоценозу. Эта точка считается центром координат при определении координат всех других точек биоценоза. Параметры, влияющие на динамику биомассы определяющего компонента биоценоза, изменяются по отношению к центральной точке, т.е. имеется их градиент. Таким образом, можно рассчитать динамику любого компонента системы в любой интересующей нас точке.

Построена точечная математическая модель экосистемы бореальных лесов Восточной Сибири, для описания основных процессов в цикле углерода, способная к пространственным расчетам на основе предложенного выше метода.

В модели потоков вещества в бореальном лесу описаны следующие основные процессы, позволяющие исследовать поведение системы, не превращая в то же время ее в сложную для анализа имитационную модель - фотосинтез, дыхание, сезонные изменения активной фитомассы, водный баланс дерева, влияние на фотосинтез освещенности, концентрации углекислого газа, воды. Также в модель включено описание влияния гетеротрофов на изменение фитомассы, водного баланса почвы, баланса минеральных элементов. Такие факторы как солнечная радиация, динамика осадков и температуры, вертикальный и горизонтальный перенос атмосферных газов являются входными параметрами модели. Модель может быть расширена на другие экосистемы соответствующей группы.

Также моделью рассчитываются скорости потоков углерода из атмосферы в бореальный лес и обратно, что позволяет использовать эти данные непосредственно в качестве входных параметров в моделях атмосферы. В модели учтен такой важный фактор, влияющий на накопление углерода в лесных системах, как лесные пожары. Частота и интенсивность их задаются рендомизационной функцией.

Общий численный прогноз развития ценоза бореальных лесов в условиях глобального изменения климата для различных сценариев, в частности его реакции на изменение среднегодовой температуры, влажности, освещенности, фоновых концентраций кислорода и углекислого газа, показал следующее. При увеличении температуры и влажности в пределах оценок сценариев «глобального изменения» интенсивность круговорота в экосистеме возрастает на 10-15%. Учет снижения освещенности, напрямую связанную с увеличением влажности, несколько снижает эффект. Так же и постоянное увеличение температуры ведет в конечном итоге к подавлению системы. Увеличение же только концентрации углекислого газа без учета других факторов не приводит к заметному изменению.

Модельный расчет показал, что в результате возрастания температуры и влажности происходит накопление углерода бореальными лесами, причем в основном в биомассе дерева. Скорость аккумуляции углерода может достигать значений 0.8 –1.0 тонн углерода на гектар в год. Однако при учете фактора лесных пожаров модельный прогноз неоднозначен, возможно, из-за недостаточно строгого модельного описания этого существенного процесса.

Работа поддержана Интеграционным проектом СО РАН №50 (2009 год).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОЗООЛОГИЧЕСКОГО СООБЩЕСТВА ОБЛАСТИ ХЕМОКЛИНА МЕРОМИКТИЧЕСКИХ ОЗЕР

Бархатов Ю.В., Хромечек Е.Б.

Институт Биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
barkh@ibp.ru

Аннотация: разработана математическая модель протозоологического компонента сообщества хемоклина меромиктических озер и их взаимодействия с другими компонентами микробиальной петли. Модель была использована для проверки гипотезы о характере питания фитофлагелляты *Cryptomonas sp.* в озере Шунет.

Разработана математическая модель протозоологического компонента сообщества хемоклина меромиктических озер и их взаимодействия с другими компонентами микробиальной петли. Модель верифицирована на основе данных многолетнего мониторинга инфузорий и криптоноад для озера Шунет.

Модель включает в себя все основные компоненты протозойного сообщества хемоклина – крупные инфузории (*Oxitricha Sp.*, *Strombidium sp.*), мелкие инфузории (*Cyclidium sp.*, *Prorodon ellipticus*) и фитофлагелляты (*Cryptomonas sp.*). В модели отражены процессы потребления инфузориями и фитофлагеллятами пурпурных и гетеротрофных бактерий хемоклина, а также потребление протозойного компонента хищниками – коловратками и копеподами. Также учитывается способность инфузорий и фитофлагеллят к миграции.

Верификация модели проводилась по данным годовой динамики, суточной динамики, продукционным и микрокосменным экспериментам. В модели нашли отражение как незначительные колебания численности протозоопланктона в хемоклине в течении года, так и резкие суточные колебания численности. Последнее возможно было объяснить двумя механизмами – процессами роста и выедания и миграцией протозоопланктона из хемоклина в темное время суток. Модель показала, что следует принять вторую гипотезу, как более соответствующую реальным скоростям роста протозоопланктона. При включении в модель процесса миграции протозоопланктона, было получено достаточно точное соответствие экспериментальным данным.

Возможные механизмы, вследствие которых криптомонады являются самой крупной популяцией в металимнионе в период стратификации, до настоящего времени являются недостаточно изученными. Одной из гипотез, предложенных для объяснения механизмов и причин поддержания глубинного максимума хлорофилла (ГМХ) в условиях низкой освещенности в сульфидсодержащей зоне водоема, является наличие и доступность биогенных элементов в хемоклине, в частности, фосфора. Другая гипотеза предполагает, что высокая численность криптоноад в области интенсивного развития бактериопланктона поддерживается за счет способности этих фитофлагеллят к миксотрофии. В настоящее время показано, что многие роды фитофлагеллят способны к миксотрофии в пресных и морских водных экосистемах. Тем не менее, до сих пор идут дебаты о том, почему фитофлагелляты потребляют бактерий. Предполагается, что это позволяет получать биогенные вещества в период лимитирования или углерод для поддержания роста. Однако, в целом, ни одна из гипотез, предложенных различными авторами, отдельно не может объяснить механизмы и причины поддержания ГМХ в условиях низкой освещенности в сульфидсодержащей зоне пелагиали.

Модель была использована для проверки гипотезы о характере питания *Cryptomonas sp.* в озере Шунет. В модель было заложено два механизма питания – только автотрофный и комбинация автотрофного и гетеротрофного питания. Было проведено сравнение модельных расчетов с этими двумя механизмами и экспериментальными данными полученных в микрокосме. Полученные результаты позволяют сделать вывод о комплексном характере питания *Cryptomonas sp.* Хотя такое питание и не обеспечивает максимальных скоростей роста, можно говорить о вероятном расширении экологической ниши вида.

Работа поддержана грантом РФФИ №09-04-98042-р_сибирь_а.

ОТНОШЕНИЕ ПОДОБИЯ И РЕДУКЦИЯ СЛОЖНОСТИ МОДЕЛЕЙ ЭКОСИСТЕМ

Барцев С.И.

Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

bartsev@yandex.ru

Аннотация: воспроизводимость экспериментов с уникальными системами, к которым относятся и экосистемы, возможна при наличии подобия между ними. На основе понятия функциональной симметрии и использования групп Ли непрерывных преобразований разработана процедура построения подобных по выделенному показателю моделей экосистем. Проиллюстрирована применимость этой процедуры для выявления подобия и для понижения сложности структур моделей экосистем.

1. Проблема уникальности экологических систем

Единственные в своем роде объекты называются уникальными. Уникальность, свойственная экологическим системам, приводит к тому, что необходимое требование естественнонаучного исследования - воспроизводимость результатов эксперимента – не может быть в полной мере удовлетворено при их изучении. Получение экспериментальных данных и интерпретация полученных результатов всегда осуществляются в рамках определенного модельного представления исследуемой системы. Поэтому, строго говоря, общим решением проблемы воспроизводимости экспериментов и переноса полученных результатов на другие системы была бы разработка формальной процедуры устанавливающей отношения подобия между моделями уникальных систем.

Принципиальная осуществимость этой формальной процедуры показана на примере весьма абстрактной нейросетевой модели (Барцев, Барцева, 2002, 2006). Введение понятия функциональной симметрии и функционально-инвариантных преобразований позволило показать, что структуры исследованных нейросетей выполняющих одну и ту же функцию могут быть преобразованы друг в друга с помощью одного непрерывного и двух дискретных преобразований, независимо от начального числа нейронов. Это также означает, что принципиально возможна формальная процедура редукции сложности моделей. В то время как дискретные преобразования тесно связаны со спецификой организации нейросетей, то непрерывное преобразование, осуществляемое инфинитезимальным оператором группы Ли, может быть использовано к моделям систем, отличных от нейронных сетей.

2. Преобразование подобия в моделях экосистем: стационарный случай

Пусть экосистема описывается системой вида:

$$\dot{X}_i = F_i(\vec{X}, \vec{a}),$$

где X_i – переменные системы; вектор a обозначает совокупность параметров системы уравнений.

Требование совпадения решений системы дифференциальных уравнений при поиске общих структурных черт у различных экосистем представляется излишне жестким. Рассмотрим стационарное состояние системы:

$$F_i(\vec{X}^*, \vec{a}) = 0. \quad (1)$$

Набор показателей, которые должны сохраняться неизменными при преобразованиях структуры системы (параметров $\{a_k\}$), можно задать следующей системой:

$$P_l(\vec{X}^*, \vec{a}) = const, \quad (2)$$

где $l = 1, \dots, L$, и L – количество уравнений, описывающих набор показателей, которые должны сохраняться при преобразованиях структуры.

Применение критерия инвариантности к объединенной системе уравнений (1) и (2) порождает систему уравнений, задающих инвариантное многообразие:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N \lambda_j \frac{\partial F_i}{\partial X_j^*} + \sum_{k=1}^K \lambda_k \frac{\partial F_i}{\partial a_k} = 0 \\ \sum_{j=1}^N \lambda_j \frac{\partial P_l}{\partial X_j^*} + \sum_{k=1}^K \lambda_k \frac{\partial P_l}{\partial a_k} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где λ_i – компоненты вектора (малого по величине) переноса, сохраняющего неизменным выделенное свойство; N – количество переменных модели, которое равно количеству уравнений системы (1); K – количество модельных параметров, которым разрешили меняться.

Линейная система (3) состоит из $N+L$ линейно независимых уравнений и содержит $N+K$ переменных. Типичной является ситуация когда $K>L$. Тогда система имеет бесконечное множество нетривиальных решений и весь набор компонент вектора перемещений можно определить, произвольно задавая $K-L$ из них. Остальные компоненты вектора перемещений всегда можно вычислить в силу линейности системы (3).

Зная компоненты вектора малых приращений можно организовать итерационный процесс, который обеспечивает постепенное перемещение вектора параметров модели по инвариантному многообразию и формирование структур, сохраняющих выбранное свойство, в случае если такие структуры допустимы.

3. Пример на сохранение собственных значений при преобразованиях подобия

Рассмотрим применение подхода поиска функциональной симметрии к набору собственных значений. Набор собственных значений определяет устойчивость системы к малым возмущениям, которая наиболее близко соответствует представлениям экологов об устойчивости экосистем (Свирижев, Логофет, 1978). Преобразование, сохраняющее собственные значения, можно получить применяя инфинитезимальный оператор к уравнениям на стационарные концентрации и к элементарным симметрическим функциям (Хорн, Джонсон, 1989), которыми для систем второго порядка являются след и определитель матрицы коэффициентов линейного приближения. В одном из примеров нелинейная модель простейшей замкнутой экосистемы преобразуется в билинейную модель, имеющую те же самые собственные значения:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = a(A_0 - X_1 - X_2)X_1 - \frac{\mu X_1 X_2}{K + X_1} \\ \dot{X}_2 = \frac{\mu X_1 X_2}{K + X_1} - dX_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{X}_1 = a(A_0 - X_1 - X_2)X_1 - X_1 X_2 \\ \dot{X}_2 = X_1 X_2 - dX_2 \end{cases}$$

Важно отметить, что для построения подобных по собственным значениям моделей знать эти значения не нужно.

Тем самым проиллюстрирована возможность применения функционально-инвариантных локальных преобразований для проверки подобия моделей экосистем, построения семейств подобных моделей и для понижения их сложности.

Литература

- Барцев С.И., Барцева О.Д. Симметрии структуры и эквивалентность эволюционных исходов в простых нейросетевых моделях // ДАН.- 2002.- Т. 386, №1.- С.114-117.
 Барцев С.И., Барцева О.Д. Функционально-инвариантный подход к проблеме уникальности биологических систем: простая нейросетевая модель // ДАН.-2006.-Т. 406, №3.-С. 394-397.
 Свирижев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ.- М.: Наука, 1978.- 350 с.
 Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ.- М.: Мир, 1989.- 655 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЫХАНИЯ ПОЧВЫ И ДИНАМИКИ УГЛЕРОДА В ПОЧВЕ С УЧЕТОМ ЕЁ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

Барцев С.И.¹, Почекутов А.А.²

¹Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
bartsev@yandex.ru, tdep@ibp.ru

²Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
a-a-po@mail.ru, tdep@ibp.ru

Аннотация: моделирование зависимости потоков углерода в почве от климатических условий позволяет оценить отклик различных типов почв на глобальные изменения климата и вклад почвенного дыхания в динамику концентрации CO_2 в атмосфере. В работе проводится математическое моделирование почвенного дыхания в зависимости от температуры и влажности, с учётом их зависимости от сезона и широты.

Почвенное дыхание в глобальном масштабе проявляет себя в сезонных колебаниях атмосферной концентрации CO_2 . Сопоставление параметров эти колебаний с данными о широтном распределении различных типов почв, осуществляемое посредством математической модели потоков углерода в системе "фотосинтезики-почва-атмосфера" позволяет, в принципе, получить оценку характерных времен отклика различных компонентов почвы. Почва разделяется на стандартные блоки: detritus – легко окисляемый детрит (опад и его разлагатели); mobile soil – мобильная почва (подстилка, остатки корней); resistant soil – устойчивая почва (трудно-окисляемый гумус). Время пребывания углерода (обороты в год) в соответствующем блоке составляет – 1,8 года, 80 лет, 577 лет. Схема потоков углерода и обозначения констант скоростей реакций приведены на Рисунке 1 (Harvey, 1989).

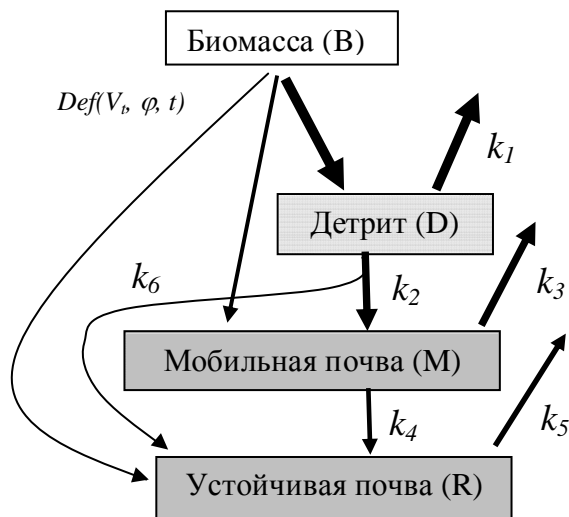


Рисунок 1. Схема потоков углерода и обозначения соответствующих констант скоростей реакций.

В математической модели используются эмпирические зависимости среднегодовой температуры и среднегодовой влажности от широты; эмпирические зависимости колебаний среднемесячных температур и влажностей в течение года в зависимости от широты, времени, и среднегодовой температуры (или, соответственно, влажности) на данной широте.

Уравнения математической модели имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dB}{dt} = NPP(V_t, \varphi, t) - Def(V_t, \varphi, t)B \\ \frac{dD}{dt} = 0,87Def(V_t, \varphi, t)B - [k_1(\varphi, t) + k_2(\varphi, t) + k_6(\varphi, t)]D \\ \frac{dM}{dt} = 0,12Def(V_t, \varphi, t)B + k_2(\varphi, t)D - [k_3(\varphi, t) + k_4(\varphi, t)]M \\ \frac{dR}{dt} = 0,01Def(V_t, \varphi, t)B + k_4(\varphi, t)M + k_6(\varphi, t)D - k_5(\varphi, t)R \end{array} \right. \quad (1)$$

где φ – широта, t – время, V_t – значение температуры начала и завершения вегетации, $NPP(V_t, \varphi, t)$ – чистая первичная продукция биомассы, $Def(V_t, \varphi, t)$ – интенсивность поступления органики в почву в процессе опада, $k_i(\varphi, t)$, $i=1..6$, – скорости превращения органики детрита, мобильной почвы или устойчивой почвы в CO_2 или другой тип почвенной органики (согласно рисунку 1).

В простом варианте этой модели учитывается зависимость $NPP(V_t, \varphi, t)$, $Def(V_t, \varphi, t)$, $k_i(\varphi, t)$ только от температуры на данной широте, изменяющейся с течением времени. Используются эмпирические функции $NPP(V_t, T(\varphi, t))$ и $k_i(T(\varphi, t))$, монотонно возрастающие с ростом среднемесячной температуры $T(\varphi)$.

В более сложном варианте модели учитывается зависимость $NPP(\varphi, t)$, $Def(\varphi, t)$, $k_i(\varphi, t)$ как от температуры на данной широте, так и от влажности.

Общий вид эмпирических зависимостей $NPP(\varphi, t)$ и $k_i(\varphi, t)$ основан на тех соображениях, что производство биомассы и практически всё её разложение и преобразование в почве осуществляется живыми организмами, а для организмов характерно некоторое оптимальное значение параметров среды (в том числе температуры T и влажности $w - T_{opt}$ и w_{opt}), при котором жизнедеятельность организмов происходит с максимальной интенсивностью, и некоторый диапазон параметров среды (в частности, от T_{min} до T_{max} и от w_{min} до w_{max}), вне которого жизнедеятельность этих организмов прекращается. $NPP(\varphi, t)$ и $k_i(\varphi, t)$ задаются как произведения двух функций, зависящих от температуры T и от влажности w :

$$NPP(\varphi, t) = f_{NPP}(T(\varphi, t)) \cdot g_{NPP}(w(\varphi, t)), \quad k_i(\varphi, t) = f_i(T(\varphi, t)) \cdot g_i(w(\varphi, t)), \quad (2)$$

где $f(T)$ и $g(w)$ представляют собой унимодальные функции, такие, что $f(T_{min})=0$, $f(T_{max})=0$, $g(w_{min})=0$, $g(w_{max})=0$, при том имеющие максимумы в оптимальных значениях T_{opt} и w_{opt} .

В обоих вышеописанных вариантах модели её сложность приводила к необходимости численного её исследования. В этих исследованиях была продемонстрирована характерная для реальной почвы динамика потока углерода из почвы в атмосферу, и динамика количества углерода в компонентах почвы.

Работа поддержана Интеграционным проектом СО РАН № 50.

Литература

- Хромов С.П. Метеорология и климатология для географических факультетов.- М.: Гидрометеиздат, 1980.- 455 с.
 Harvey, L. D. D. 1989. Effect of model structure on the response of terrestrial biosphere models to CO_2 and temperature increases. *Global Biogeochemical Cycles* 3, 37–153.
 Lloyd, J. and Taylor, J. A. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology* 8, 315–323.

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРОГНОЗА БИОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ В МИНИМАЛЬНОЙ БИОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ, ПОСТРОЕННОЙ ПО ПРИНЦИПУ НАИХУДШЕГО СЦЕНАРИЯ

Барцев С.И., Щемель А.Л., Иванова Ю.Д.

Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
ibp@ibp.krasnoyarsk.su

Аннотация: ключевым вопросом. на сегодняшний день является оценка способности биосферы нейтрализовать избыточное количество CO₂. Проведенные в работе численные эксперименты с малоразмерной биосферной моделью, ориентированные на наихудший сценарий развития биосферы, показали, что повышение среднегодовой приземной температуры приводит к необратимому уменьшению фитомассы и гумуса в биосфере. При увеличении чувствительности климата коллапс наступает быстрее.

Глобальный круговорот углерода привлекает в последние десятилетия особое внимание исследователей в связи с многочисленными и часто противоположными предположениями о влиянии роста атмосферной концентрации CO₂ на биосферные процессы и климатическую систему Земли (IPCC, 2001; 2007). Для прогноза возможной динамики биосферы разработан ряд математических моделей различной степени сложности. Традиционно, биосферные процессы моделируются с помощью распределенных моделей, в которых динамика биосферы представлена как совокупная динамика биоты на относительно небольших и относительно однородных участках земной поверхности. При этом исследователи 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.

В то же время, практической точки зрения нам важнее знать не наиболее вероятный сценария развития биосферы, а возможный (в рамках доверительных интервалов) но наихудший сценарий развития, чтобы спланировать действия в допущении, что именно он и реализуется. Такой подход, люди в жизни реализуют почти всегда, достаточно представить реакцию людей на появление в помещении запаха гари. Такая реакция объясняется очень высокой ценой легкомысленного отношения к стихии.

Ориентация на наихудший сценарий позволяет строить более простые модели биосферы, поскольку можно не учитывать возможное влияние разнообразных компенсирующих механизмов. Переход к интегральным показателям точечной модели биосферы снижает остроту проблемы оценки параметров, характерную для распределенных моделей. Однако оценки параметров биосферных моделей, как правило, имеют широкие доверительные интервалы, и оцениваемый параметр может находиться в любом месте доверительного интервала, что приводит к неустранимой неопределенности прогноза. Погрешность в оценке параметров биосферы (и параметров модели) ставит вопрос о чувствительности значимых параметров сценария развития биосферы к вариациям значений параметров.

В данной работе проведены вычислительные эксперименты по построению набора биосферных сценариев при различных значениях параметров минимальной модели и начальных условий. Основополагающим в модели является круговорот углерода, который до появления антропогенной эмиссии являлся замкнутым. Дополнительное количество углерода, которое поступает в атмосферу в виде углекислого газа в результате сжигания ископаемых топлив, вызывает повышение приповерхностной температуры вследствие парникового эффекта. Рассматриваются времена порядка сотен лет. В модель заложены существующие в системе биосфера-климат положительные обратные связи: рост приповерхностной температуры способствует, с одной стороны, дополнительному выбросу углекислого газа из почвы в результате процессов ускорения окисления и активации

почвенной микрофлоры. С другой стороны, отклонение от температурного оптимума ведет к уменьшению усвоения углекислого газа из атмосферы зелеными растениями для процессов фотосинтеза. В обоих случаях концентрация углекислого газа растет, усиливая парниковый эффект.

Подбор значений параметров модели осуществлялся на основе критерия соответствия модельной и реальной динамик концентраций углекислого газа с 1700 г. Проведенные численные эксперименты с малоразмерной биосферной моделью, показали в частности, что повышение среднегодовой приземной температуры вызывает падение количества углерода в фитомассе и гумусе. При этом большая часть углерода поступает в атмосферу, поскольку океан не успевает его поглощать, что приводит к стремительному росту температуры за счет парникового эффекта. Наличие положительных обратных связей значительно ускоряет процесс накопления в атмосфере углерода и усиление парникового эффекта, вызывая необратимое уменьшение фитомассы и гумуса. При увеличении чувствительности климата коллапс наступает еще быстрее.

Работа поддержана интеграционным проектом СО РАН №50.

Литература

- IPCC, 2001. Изменение климата, 2001г.: Научные аспекты, ЮНЕП, ВМО, www.ipcc.ch
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., and Miller H. L. (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 996 p.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВЫ: СРАВНЕНИЕ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА И МЕТОДА МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ

Безрукова М.Г.¹, Быховец С.С.¹, Грабарник П.Я.¹, Ларионова А.А.¹, Надпорожская М.А.²

¹Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

work.message.system@gmail.com

²Биологический НИИ Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: сравнивались два метода (максимального правдоподобия и байесовское оценивание) определения скоростей разложения и перехода почвенной модели ROMUL по результатам экспериментов по потере массы свежего опада.

Необходимо определить коэффициенты для модели разложения органического вещества ROMUL (Chertov et al., 2001; Чертов и др., 2007) по результатам экспериментов по потере массы порций различного свежего опада. Мы применили и сравнили два подхода: метод максимального правдоподобия и байесовское оценивание.

Модель ROMUL описывает динамику органического вещества в почве. Органическое вещество почвы в модели представлено тремя пулами: опад (L), подстилка (F) и органическое вещество минеральных горизонтов (H). Эта модель также учитывает динамику азота (N). На каждом шаге, если предусмотрено сценарием, поступает свежий опад (L_0). Далее часть органического вещества в каждом пуле разлагается и переходит в следующий, еще какая-то часть минерализуется и выводится за пределы системы. Количественные характеристики (скорости разложения и перехода) определяются системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dL}{dt} = L_0 - (k_1 + k_3) \cdot L$$

$$\frac{dN_L}{dt} = N_0 - (k_1 + k_3) \cdot N_L$$

$$\frac{dF}{dt} = k_3 \cdot L - (k_2 + k_4 + k_5) \cdot F$$

$$\frac{dN_F}{dt} = [(1 - M_L) \cdot k_1 + k_3] \cdot N_L - (k_2 + k_4 + k_5) \cdot N_F$$

$$\frac{dH}{dt} = (\delta_{bact} \cdot k_4 + \delta_{lumb} \cdot k_5) \cdot N_F - k_6 \cdot H$$

$$\frac{dN_H}{dt} = [(1 - M_F) \cdot k_2 + \gamma \cdot (k_4 + k_5)] \cdot N_F - k_6 \cdot M_H \cdot N_H$$

, при этом

$$\gamma = 0.8$$

$$\delta_{bact} = \gamma \cdot 2 \cdot (C/N)_{bact} = 24$$

$$\delta_{lumb} = \gamma \cdot 2 \cdot (C/N)_{lumb} = 12.8$$

Так как наши данные описывают только первую стадию разложения, то мы имеем дело частью модели, определяемую первыми тремя дифференциальными уравнениями. Для оценки скоростей разложения в работе использовались данные лабораторных экспериментов по разложению растительного опада, выполненных в ИФХиБПП РАН (с оценкой разложения по эмиссии CO_2) и БИНИИ СПбГУ (по потере массы). Для нахождения оценки параметров модели обычно используется метод наименьших квадратов или взвешенный метод наименьших квадратов, в котором в качестве веса берут величину, обратную дисперсии (или ошибки измерений) в точках наблюдения.

Байесовский подход использует теорему Байеса:

$$p(k|D) = \frac{p(D|k) \cdot p(k)}{p(D)}, \text{ где } p(k) - \text{ априорное распределение, } p(D|k) - \text{ функция}$$

правдоподобия, $p(D)$ - вероятность данных, $p(k|D)$ - апостериорное распределение.

На практике байесовская процедура выглядит следующим образом. Вначале экспертно выбирается априорное распределение. Имея данные, распределения и модель, используется алгоритм (в данном случае алгоритм Метрополиса-Хастингса), чтобы определить апостериорные распределения для параметров, наиболее соответствующие модели и данным.

На рисунке приведены результаты определения коэффициентов разложения листьев осины, а также их маргинальные распределения.

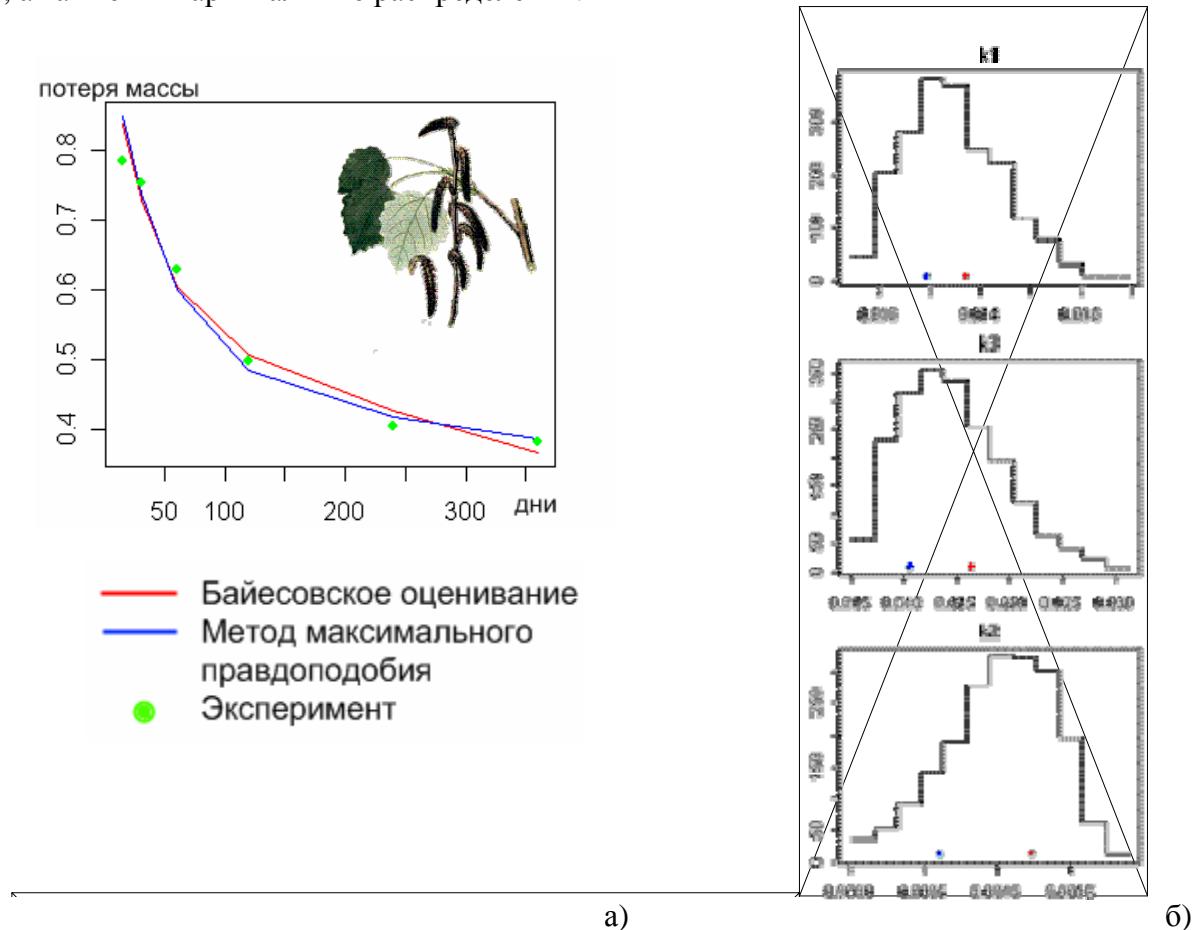


Рисунок 1. Сравнение метода максимального правдоподобия и Байесовского оценивания

а) кривые разложения массы б) маргинальные распределения коэффициентов

Преимущества байесовского метода состоят в том, что он, во-первых, позволяет описать неопределенность параметров в форме байесовских достоверных областей, во-вторых, форма маргинального распределения для параметров модели позволяет судить об их чувствительности и, в-третьих, используются априорные знания о параметрах. Его также следует использовать при недостатке экспериментальной информации.

Работа поддержана грантом РФФИ 09-04-01209.

Литература

- Bykhovets, S., Larionova, A., Nadporozhskaya, M., Chertov, O. Evaluation of decomposition rates of plant debris for soil dynamic models using special laboratory experiments. The 5th European Conference on Ecological Modelling – ECEM 2005. Proceedings. Pushchino, Russia, 2005, P. 33-34.
- Chertov, O.G., Komarov, A.S., Nadporozhskaya, M.A., Bykhovets, S.S., Zudin, S.L. ROMUL—model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modelling. 2001 Ecol. Model. 138, 289–308.
- Gilks, W.R., Richardson, S., Spiegelhalter, D.J. Markov Chain Monte Carlo in Practice. Chapman and Hall, London. 1996

ОЦЕНКА ПОТОКА УГЛЕРОДА МЕЖДУ АТМОСФЕРОЙ И НАЗЕМНОЙ ЭКОСИСТЕМОЙ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ CO₂ НА ВЫСОКИХ ВЫШКАХ

Белоліпецкiй П.В.

*Институт вычислительного моделирования СО РАН,
Сибирский федеральный университет, Институт математики
pbel@icm.krasn.ru*

Аннотация: одним из способов количественной оценки обмена углеродом между атмосферой и наземными экосистемами на больших масштабах и проверки экстраполяции с малых масштабов является измерение концентрации CO₂ с помощью высоких вышек (до 500 м). Предлагается методика оценки потока углерода между атмосферой и бореальными лесами по данным вышек в течение лета.

Введение

Многолетние наблюдения концентрации углекислого газа (CO₂) в атмосфере позволили улучшить понимание глобального углеродного цикла. Обмен углеродом между атмосферой и наземной экосистемой может непосредственно измеряться в течение длительного периода, например с помощью метода ковариации вихрей (eddy covariance). Эти измерения ограничены пространственным масштабом в несколько гектаров. Для количественной оценки обмена углеродом на больших масштабах и проверки экстраполяции с малых масштабов нужны другие подходы. Одним из таких подходов является измерение концентрации CO₂ с помощью высоких вышек (до 500 м) (Bakwin, 1998).

Данные вышек хороши тем, что позволяют собирать информацию о потоках CO₂ с достаточно большой площади диаметром до 100 км. Т.е. с модельного участка леса, исключая мелкие локальные неоднородности. С другой стороны они подвержены сильным колебаниям, связанным с приходом новых воздушных масс и перемешиванием с верхним слоем атмосферы. Поэтому восстановление потока углерода между атмосферой и наземной экосистемой является непростой задачей.

Объекты и методы

Предлагается методика оценки потока углерода между атмосферой и бореальными лесами по данным вышек в течение лета. Свойства воздушных масс нижнего слоя атмосферы (атмосферный граничный слой) и более верхнего (тропосфера) значительно отличаются. Эти слои разделены за счёт температурной стратификации. Граница между ними в центральной Сибири располагается на 500-х метрах и ниже в сентябре-апреле и выше 1000 метров в мае-августе. Поэтому летом тропосфера не влияет на измерения концентраций CO₂ на вышке. Также нередко с ветром приносятся новые воздушные массы и наблюдаются большие скачки концентрации CO₂. Для моделирования мы будем выделять интервалы времени, когда не наблюдается прихода новых воздушных масс. В течение суток атмосферный граничный слой претерпевает значительные изменения: ночью вертикального перемешивания практически нет и за счёт дыхания внизу накапливается CO₂, утром воздух у поверхности начинает прогреваться и интенсивно перемешиваться с верхними слоями, одновременно включается процесс фотосинтеза. Чтобы оценить потоки углерода, обусловленные дыханием и фотосинтезом, по измеренным вертикальным распределениям CO₂ нужно смоделировать процесс вертикального перемешивания в течение суток. Предлагается математическая модель по определению вертикального перемешивания в зависимости от ветра, температуры, влажности и освещённости.

Работа выполнена при финансовой поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 50.

Литература

Bakwin P. S., Tans P. P., Hurst D. F., Zhao C. Measurements of carbon dioxide on very tall towers: Results of the NOAA/CMDL program // Tellus, Ser. B. 1998. 50. С. 401– 415.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОДОВОГО РЕЖИМА ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ СОЛЁНОГО ОЗЕРА ШИРА

Белолипецкий П.В., Белолипецкий В.М., Генова С.Н.

*Институт вычислительного моделирования СО РАН,
Сибирский федеральный университет, Институт математики
pbel@icm.krasn.ru*

Аннотация: Процессы вертикального перемешивания определяют температурную структуру озера, а также распределения химических элементов и соответственно биологические процессы в водоёме. Озеро Шира является меромиктическим и в течение всего года в нём присутствует вертикальная стратификация. Для моделирования и объяснения годового режима вертикальной стратификации использовались одномерная и двумерная в вертикальной плоскости модели.

Введение

Исследования, направленные на анализ связей между гидрофизическими и биологическими процессами являются одним из подходов объяснения структуры водных экосистем. Физические параметры (температура, свет, плотность, перемешивание) являются определяющими для биологических процессов. Обычно когда стратификация образуется в малых и средних озёрах, горизонтальные неоднородности являются незначительными по сравнению с вертикальными.

Меромиктические озёра – это такие озёра, которые содержат неперемешивающиеся в течение всего года слои жидкости. Меромиктические озёра встречаются относительно редко по сравнению с нестратифицированными и перемешивающимися хотя бы раз в год. Этот тип озёр может формироваться вследствие различных причин. Например, водоём может быть очень глубоким по сравнению с площадью поверхности или нижний слой очень минерализован и намного плотнее верхних слоёв воды.

Объекты и методы

Мы исследовали солёное озеро Шира, расположенное в Сибири. Озеро имеет овальную форму, приблизительно 9.4 км в длину и 5 км в ширину. Глубина центральной части около 20 м. Шира является меромиктическим озером и в течение всего года в нём присутствует вертикальная стратификация. Это показывают измерения вертикальных профилей температуры, солёности, кислорода и сероводорода проводившиеся сотрудниками Института биофизики СО РАН в 2002-2008 годах весной, летом, осенью и зимой. Глубина границы между верхним и нижним слоями претерпевает значительные изменения в течение года. Для объяснения причин формирования и динамики вертикальной стратификации использовались одномерная (Белолипецкий и Генова, 2008) и двумерная (Белолипецкий и Белолипецкий, 2006) вертикальные модели.

Одномерная модель для летнего режима (когда поверхность озера не покрыта льдом) основана на уравнениях конвекции-диффузии для температуры и солёности воды. Существенное влияние на тепломассоперенос оказывает турбулентность, вызываемая ветром. Для параметризации вертикального турбулентного обмена применяется формула, полученная на основе формулы Прандтля-Обухова и приближённого решения Экмана для ветровых течений. Важными параметрами, влияющими на температурный режим водоёма, являются тепловые потоки через поверхность водоёма. Составляющие теплового обмена находятся по известным соотношениям.

Для определения формирования и динамики толщины ледяного покрова в зимний период применяется упрощённая модель, основанная на квазистационарном температурном режиме в затвердевшей области. Подо льдом образуется перемешанный конвекцией слой. Основным фактором, вызывающим конвективное перемешивание при нарастании льда,

является поток солей, высвобождающихся при кристаллизации воды. Образуется неустойчивая плотностная стратификация, приводящая к интенсивной вертикальной циркуляции и выравниванию температуры и солёности в конвективном слое. В соответствии с теорией Зубова (Доронин, 1981) глубина распространения конвекции определяется из условия равенства плотности перемешанного слоя и плотности на этой глубине. Эта гипотеза используется для построения численной процедуры определения вертикальных распределений температуры, солёности и плотности воды. В весенний период учитываются процессы одновременного таяния льда сверху и снизу.

Также была разработана двумерная в вертикальной плоскости модель для летнего режима. Она в дополнение к процессам, описываемым одномерной моделью, моделирует вертикальные циркуляции водной толщи, порождаемые ветром. Математическая модель основана на осреднённых уравнениях Рейнольдса для турбулентных течений в приближениях Буссинеска, гидростатики и твёрдой крышки, на уравнениях конвекции-диффузии для температуры и солёности воды. Для параметризации вертикального турбулентного обмена применяется формула Прандтля-Обухова. Остальные параметры находятся также как и в одномерной модели.

Результаты

Математическое моделирование показывает, что в озере Шира вода циркулирует в верхнем слое и перемешивание между нижним и верхним слоями не происходит. Это подтверждается также натурными измерениями. Мы проводили расчёты по представленным моделям для 2002-2008 годов и сравнивали результаты с натурными измерениями. Метеоданные мы брали с сервера «Погода России – архивы погоды» (meteo.infospace.ru). Результаты вычислений, в общем, согласуются с результатами измерений. Одной из основных причин меромиксиса в Шира является градиент солёности. Он формируется весной, вследствие поступления на поверхность пресной воды от таяния льда и снега. В результате на поверхности водоёма образуется слой менее солёной воды. Этот слой прогревается за счёт теплообмена с атмосферой и активно перемешивается. Почти до середины лета его глубина непрерывно увеличивается, а температура повышается. Затем примерно полтора месяца температура, солёность и глубина верхнего слоя меняются незначительно. Затем верхний слой начинает остывать, а его глубина увеличиваться. Поздней осенью только градиент солёности, образовавшийся между верхним и нижним слоем, защищает озеро от перемешивания ветром. При замерзании воды высвобождаются соли содержащиеся в заледевшем объеме. Образуется неустойчивая плотностная стратификация, приводящая к конвективному перемешиванию. Моделирование показывает, что в Шира глубина слоя конвективного перемешивания ограничивается глубиной градиента солёности оставшегося после осени. Его глубина в свою очередь в течение зимы не меняется, вне зависимости от внешних условий.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-01-00153), Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 95.

Литература

- Белолипецкий В.М., Белолипецкий П.В. Численное моделирование ветровых течений в стратифицированных водоемах методом расщепления. Гидростатическое приближение // Вычислительные технологии.- 2006.- Т. 11, № 5.- С. 21-31.
- Белолипецкий В.М., Генова С.Н. Численное моделирование годовой динамики вертикальной структуры соленого озера // Вычислительные технологии.- 2008.- Т.9, №4.- С. 34-43.
- Доронин Ю.П. Взаимодействие атмосферы и океана.- Л.: Гидрометеиздат, 1981.- 288 с.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФОРМАЛИЗМ И ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Белотелов Н.В.

ВЦ РАН, Москва, Россия
belotel@mail.ru

Аннотация: в работе на примере трех задач: моделирование динамики растительности при изменении климата; моделирование связи между численностью вида и метаболизмом особи; моделирование подвижности популяции, обсуждаются некоторые нерешенные проблемы математического описания экологических объектов. Центральными являются вопросы: - достаточно ли для описания экологических систем типичных переменных - численности популяций, число видов, концентрации биогенных элементов, а также возможно ли их совместное измерение.

Развитие математических моделей экологических систем лежит в общем русле развития математического моделирования, применяемого для описания экономических, социальных и других систем, в которых процедура измерения, входящих в модели переменных и параметров затруднительна.

Под моделью мы понимаем формальное представление взаимосвязей между измеримыми понятиями. Целями, создания экологических моделей, являются: объяснение наблюдаемых эффектов (колебания численности, популяционные волны и т.п.); прогнозирование состояния экосистем; формализация, имеющихся представлений (инструмент междисциплинарных исследований). В последнем случае модели позволяют по-новому взглянуть на изучаемые экологические объекты. На их основе создаются системы понятий, в которых обсуждаются исследуемые явления. «Под системой понятий, мы имеем в виду просто-напросто однозначное логическое отображение соотношений между опытными данными» (Н.Н.Моисеев).

Целью настоящей работы является попытка обсудить некоторые не решенные проблемы математического описания экологических объектов. Центральными являются вопросы: - достаточно ли для описания экологических систем типичных переменных - численности популяций, число видов, концентрации биогенных элементов, а также возможно ли их совместное измерение.

Массэнергетическое описание экологических систем возникло вследствие развития геохимии, что позволило в начале 20-го века осознать, что живые системы, взаимодействуя друг с другом и окружающими абиотическими факторами, организуют круговороты биогенных элементов и являются важнейшим фактором геохимической эволюции Земли. На основании этого взгляда на функционирование экологических систем появились такие базовые понятия, как трофические цепи, продуктивность и другие, описание которых в рамках математических моделей и в настоящее время является основой для описания и прогноза поведения экологических объектов. Пионером развития математических моделей такого типа является В.А.Костицын.

В математических моделях такого типа выделяют переменные, описывающие продукционные процессы, потоки биогенных элементов, процессы синтеза и деструкции органического вещества.

Другим способом описания экологических объектов является популяционное описание. Такое описание живых систем лежит в основе широкого класса математических моделей, родоначальниками которого являются В.Вольтерра и А.Лотка (Ю.М.Свирижев). Это так называемые вольтеровские модели.

Современные подходы к моделированию экологических объектов исходят из предположения, что все рассматриваемые фазовые переменные и параметры могут быть в принципе измерены. В этом модельеры следуют традиции классической физики,

«предполагая, что всегда можно «подсмотреть» явление, не вмешиваясь в него и не влияя на него...

Пренебрежение этим обстоятельством представляет собой абстракцию, которую можно назвать абсолютизацией физического процесса. Если ее принять, то становится возможным рассмотрение физических процессов как происходящих самих по себе, вне зависимости от того, существует ли принципиальная возможность их наблюдения» (В.А.Фок).

В докладе обсуждаются три задачи, на примере которых мы постараемся показать невозможность одновременного измерения некоторых экологических переменных. Это задачи оценки круговорота углерода и трансформации растительных зон при изменении климатических характеристик (Belotelov et al., 1996); оценки размерного спектра потребления популяции (Makarieva et al., 2004) и учета миграционных и демографических процессов (Белотелов, Лобанов, 1997).

Заключение

В работе делается вывод, что возможно целесообразно при описании живых систем заимствовать «математические образы», возникшие в процессе описания микрофизических объектов. Поскольку, как было показано выше, принципиальные совместные измерения общепринятых в настоящее время базовых экологических переменных (численность, концентрации биогенных элементов, количество видов) имеет ограниченную совместную измеримость.

«Всякая экспериментальная установка, которая позволила бы контролировать такие (биологические) отправления с той же степенью точностью, какая требуется для четкого их описания на языке физики, будет препятствовать свободному течению жизни» (Н.Бор).

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 09-0700-398, № 07-07-0071, № 07-062-00330).

Литература

- Бор Н. Единство знаний Избранные научные труды. Т.2.- М.: Наука, 1971.- С. 481-497.
Белотелов Н.В., Лобанов А.И. Популяционные модели с нелинейной диффузией. Математическое моделирование.- Т.9.- № 12,- 1997.- С. 44-56.
Фок В.А. Начала квантовой механики.- М.: Изд-во ЛКИ, 2007.
Моисеев Н.Н., Александров В.В, Тарко А.М. Человек и биосфера.- М: Наука, 1985.
Свирижев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ.- М: Наука, 1978.
Фок В.А. Начала квантовой механики.- М.: Изд-во ЛКИ, 2007.
Belotelov N.V., Bogatyrev V.G., Kirilenko A.P., Venevsky S.V. Modelling of time-dependent biomes shifts under global climate changes. Ecological Modelling, 87(3-4), 1996: 29-40
A.V.Makarieva, V.G.Gorshkov, Bai-Lian Li. Body size, energy consumption and allometric scaling: a new dimension in the diversity-stability debate. Ecological Complexity, 1(2004), 139-175.

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ МУРАВЬЕВ И РАСТЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РЕШЕТЧАТОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Бессонов В.В., Рубашко Г.Е.

Учреждение Российской академии наук Институт математических проблем биологии
РАН, г. Пущино, Россия

grubashko@rambler.ru

Аннотация: разработана решетчатая имитационная модель для исследования взаимодействия популяций травянистых растений и муравьев. С помощью модели проанализирована возможность освоения растениями муравейников двух видов (*Lasius niger* и *Formica rufa*) в зависимости от активности трансформирующей деятельности муравьев и с учетом мирекохории.

Введение. Взаимодействие муравьев и растительности на гнездах муравьев в числе наиболее актуальных научных задач при разработке основ и методической базы мероприятий по сохранению полезных лесных муравьев как ценного биологического ресурса, влияющего на продуктивность и биологическую устойчивость лесов (Захаров, 2005). С помощью разработанной модели рассмотрен процесс зарастания муравейников двух видов черного садового муравья (*Lasius niger* L.) и рыжего лесного муравья (*Formica rufa* L.) звездчаткой ланцетолистной (*Stellaria holostea* L.), рассматриваемые виды муравьев сильно различаются по своей биологии. Модель основана на представлении о клеточных автоматах, в обобщении А.С. Комарова с соавторами (Комаров, Паленова, 2001; Комаров, 2003; Михайлова, 2008) для вегетативно-подвижных растений. В модели использовался авторский полевой материал сборов 1996-2007 гг. и литературные данные.

Методика моделирования. В модели расчетная площадка представлялась в виде плоской решетки, размер ячейки которой видоспецифичен и принят равным 4 см. Купол муравейника располагался в центре расчетной площадки. Диаметр купола принят 1 м для обоих видов. Вероятность гибели растений на муравейнике, зависит от силы муравьиной семьи, и ее активности. Для оценки активности муравейника на i -м шаге использовалась следующая формула:

$$C_i = \begin{cases} C_{i-1}(k_c - k_u D_m), & C_{i-1} < C_m \\ C_{i-1}(k_c - k_u D_m) - C_k, & C_{i-1} > C_m, \quad P > P_k \end{cases} \quad (1)$$

где C_{i-1} — сила муравейника на предыдущем шаге, k_c и k_u — коэффициенты развития и угнетения муравейника соответственно, D_m — доля муравьиного холма, захваченного растениями, $C_k=1$ — сила, забираемая колонной, $P_k=0,5$ — вероятность появления колонны, $C_m=2$ — сила муравейника, при которой возможно появление колонны. Коэффициент гибели растений на муравейнике рассчитывается по формуле: $k_{d_hilli} = k_{d_hill0} C_i$, где k_{d_hill0} — коэффициент гибели растений на муравейнике при $C=1$. Ширина кольца выстригаемой территории 1 м. Звездчатка ланцетолистная не имеет анатомических приспособлений мирмекохоров, однако, по нашим наблюдениям, муравьи активно интересуются ее семенами. Личные наблюдения показали, что отдельные семена звездчатки перемещаются муравьями *F. rufa* на расстояние до 7 м, а муравьями *L. niger* до 1.4 м. Считаем, что семена собираются муравьями со всего участка в муравейник. По пути часть семян теряется, половина принесенных семян выносятся и оставляется рядом с муравейником на расстоянии до 0,5 м. Потери семян по нашим наблюдениям и литературным данным (Левина, 1957) составляют 20 % от общего количества перенесенных семян. В модели сделано допущение, что из этих семян всходит на следующий год 3%. Значение коэффициента развития k_c было принято 1,2.

Результаты. Проведено несколько серий компьютерных экспериментов, в которых было имитировано развитие растений на куполе муравейников двух видов муравьев (*F. rufa*, *L. niger*) и прилегающей к ним территории. Коэффициент смертности растений на

муравьином холме $k_{deathhill0}$ изменяли от 0,4 до 1,0. В первом случае учитывался сбор семян муравьями.

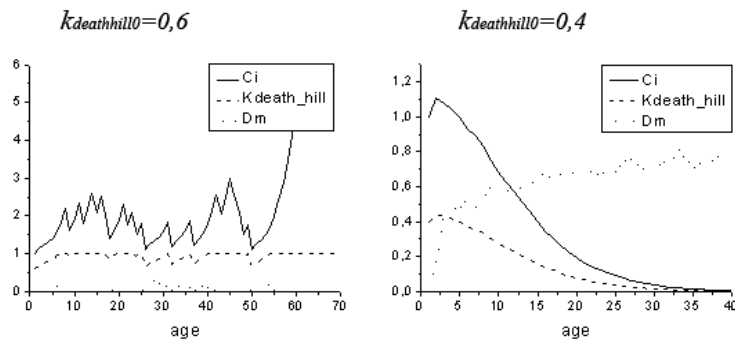


Рисунок 1. Развитие муравейников *F. rufa*

При коэффициенте смертности растений на куполе $k_{deathhill0} = 0,6$, единичные особи прорастают (Рисунок 1). Несмотря на отсутствие выстригаемой территории у муравейника *L. niger*, характер освоения растениями муравейника при тех же значениях $k_{deathhill0}$ качественно повторяет картину, наблюдаемую для *F. rufa*. При коэффициенте смертности растений на куполе $k_{deathhill0} > 0,6$ у растений практически нет шансов появиться на муравейнике любого из исследуемых видов. Сила муравейника во времени изменяется пилообразно при периодическом уходе отводка, либо бурно растет в период до появления нового.

При коэффициенте смертности растений на куполе $k_{deathhill0} < 0,6$ муравейник не способен сопротивляться продвижению растений. Растения, появившиеся на куполе, подавляют развитие семьи. Сила семьи уменьшается, муравейники *F. rufa* и *L. niger* полностью зарастают растениями и возможно погибают (Рисунок 1. $k_{deathhill0} = 0,4$).

Серия численных экспериментов без учета семенного размножения показала, что активный жизнеспособный муравейник *F. rufa* не доступен для растений, осваивающих территорию вегетативным способом. В тоже время, на муравейник *L. niger* без выстригаемой территории возможно проникновение вегетативно-подвижных растений.

Выводы. С помощью разработанной модели проведено сравнение характера освоения территории муравейников *L. niger* и *F. rufa*. Показано, что возможность захвата территории муравейника растениями зависит от состояния гнезда и биологических особенностей вида муравьев. Наличие пригнездовой выстригаемой территории вокруг муравейников *F. rufa* не является препятствующим фактором для захвата муравейника растениями, чьи семена переносятся муравьями. Учитывая биологию рассмотренных видов можно сказать, что захват растениями активного жизнеспособного муравейника видов *L. niger* и *F. rufa* возможен только при коэффициенте смертности растений на куполе $k_{deathhill0} < 0,6$.

Литература

- Захаров А.А. Муравьи и защита леса // Материалы XII Всероссийского мирмекологического симпозиума.- Новосибирск. 2005.- С. 224.
- Комаров А.С. Клеточно-автоматные модели сообществ вегетативно-подвижных растений, учитывающие поливариантность онтогенеза // Материалы X международной конференции «Математика, компьютер, образование».— Ижевск. 2003.— Вып. 10. Ч. 3.— С. 112–124.
- Комаров А.С., Паленова М.М. Моделирование взаимодействующих популяций вегетативно-подвижных трав // Бюлл. МОИП. Отд. биол.— 2001.— Т. 106. № 5.- С. 35–41.
- Левина Р.Е. Способы распространения плодов и семян.— М.: Издательство Моск. гос. ун-та, 1957.- 358с.
- Михайлова Н.В., Михайлов А.В., Богданова Н.Е., Комаров А.С., Жукова Л.А. Имитационная модель инвазионной динамики популяций неморальных видов трав на неоднородной территории // Бюллетень МОИП.— 2008.— Т.113. Вып. 5.— С. 68–75.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ УГЛЕРОДА ПОЧВЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ТРАДИЦИОННОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ И ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ В ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

Бобровский М.В.¹, Комаров А.С.¹, Шанин В.Н.¹, Быховец С.С.¹, Михайлов А.В.¹, Ханина Л.Г.²

¹Учреждение РАН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

maxim.bobrovsky@gmail.com

²Учреждение РАН Институт математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия

Аннотация: Модель EFIMOD использована для прогноза и анализа динамики углерода почвы при 4-х типах сценариев традиционного природопользования, типичных для лесных территорий Европейской России: подсеčno-огневое земледелие, перелог, трехполье, рубки.

1. Введение

Практически вся территория Европейской России испытала на себе разнообразные виды интенсивных антропогенных воздействий, большинство которых было связано с традиционными системами земледелия: подсеčno-огневой, переложной и паровой (трехполье), а также с использованием лесных ресурсов (прежде всего, древесины). За несколько тысяч лет активного присутствия человека на одной и той же территории происходили разнообразные смены воздействий – чередовались периоды интенсивной эксплуатации земель, активного лесопользования и лесовосстановления. Длительная история антропогенных воздействий привела к изменению состава и структуры экосистем и, по-видимому, к существенным изменениям биогеохимических циклов основных биофильных элементов, прежде всего, углерода. Количественно оценить влияние длительных антропогенных воздействий на природные системы практически невозможно без привлечения математических моделей. Использование последних позволяет получить, в частности, оценки параметров накопления и деструкции органического вещества в экосистемах, количественно оценить вклад внешних факторов в изменение баланса и распределение соединений в пулах экосистем.

Ранее нами был предложен модельный подход для оценки динамики органического вещества почвы при традиционных системах земледелия (Bobrovsky et al., 2007; in press). Целью настоящей работы является прогноз и анализ долговременной динамики углерода почвы в стационарных климатических условиях при различных системах традиционного земледелия и лесопользования, типичных для территории Европейской России.

2. Объекты и методы

Долговременную динамику углерода почвы (С) при различных антропогенных воздействиях оценивали для суглинистых дерново-подзолистых почв. Использовали систему моделей биологического круговорота углерода и азота в лесных экосистемах EFIMOD (Komarov et al., 2003) вместе со встроенной в нее почвенной моделью ROMUL (Chertov et al., 2001). Использование модели EFIMOD для оценки динамики С при традиционном природопользовании обусловлено тем, что в исторических системах земледелия лесная стадия является одним из обязательных элементов. Поэтому оценить вклад таких систем земледелия в общую экосистемную динамику и баланс элементов возможно только при условии использования модели, хорошо симулирующей динамику лесных экосистем.

Для инициализации модели имитировали свободное развитие леса в стационарных климатических условиях до стабилизации уровня С почвы. Естественное возобновление древостоя моделировали путем «подсадки» каждые 15 лет 5-летних сеянцев основных видов деревьев – ели, липы, дуба, сосны, березы, осины с плотностью каждого вида 700 шт./га.

Этап инициализации модели «длился» 370 лет; в итоге «сформировался» смешанный разновозрастный лес с доминированием поздне sukcesсионных видов деревьев.

Далее моделировали 4 типа сценариев природопользования.

(1) Подсечно-огневое земледелие (SB) с разной частотой воздействий. Цикл: посев на расчистках 3 года, периоды между расчистками 20, 40, 60, 80 и 120 лет.

(2) Переложное земледелие (ShS). Циклы: 10, 20 лет пашни и 10, 20 лет развития леса.

(3) Трехпольная система земледелия. Без внесения удобрения (TFF) и с внесением удобрения (TF) один раз в 3, 9 и 18 лет.

(4) Рубки сплошные и выборочные. Сплошные рубки (CC) с оборотом 10, 20 лет (дровяные леса) и 40, 60, 80, 120 лет (строевые леса). Принудительно-выборочные рубки (SC) с изъятием древесины один раз в 30 лет в объеме 30% древесины по запасу «сверху».

В разработанных «земледельческих» сценариях использовали посев озимых и яровых культур с разделением на надземные и подземные когорты опада и определенным временем их поступления на/в почву. Для сравнения результатов продолжали также моделировать «свободное развитие леса» (сценарий F). Всего было смоделировано 22 сценария природопользования на срок 260 лет с шагом моделирования 1 год.

3. Результаты и обсуждение

Результаты моделирования показали, что максимальный уровень содержания C сохраняется при свободном развитии лесной экосистемы (рисунок, А, сценарий F). Средний за период воздействий запас C в почве уменьшается в ряду: (а) свободное развитие леса - (б) строевой лес - (в) дровяной лес, выборочные рубки, трехполье с удобрением раз в три года - (г) подсека с оборотом 40–120 лет, трехполье с удобрением раз в 9 и 18 лет - (д) подсека с оборотом 20 лет - (е) все варианты перелога и трехполье без удобрения.

При *трехполье* (рисунок, В) содержание C в почве зависит от качества (частоты) удобрения. При этом внесение навоза или компоста дает позитивный, но кратковременный эффект. Относительные скорости потерь гумуса по результатам моделирования соответствуют результатам долговременных полевых экспериментов (Перепелица, 1974). Очень близки они и к результатам содержания гумуса в почве после 20-летнего использования (Хохлов, 1980).

Подсечно-огневую систему земледелия (рисунок, Б) на территории центра европейской России применяли на протяжении более 4000 лет. При этом еще в 19 – начале 20 века в России подсека рассматривались как более выгодная альтернатива навозной пашне, как крестьянами, так и специалистами в сельском хозяйстве. Эффективность подсеки зависит от уровня восстановления почвенного плодородия во время «отдыха» - свободного развития леса, что демонстрируют и результаты моделирования. При большой длительности лесной фазы (сценарий SB120) уровень содержания C в почве сравнимо с трехпольем (сценарий TF9). При всех вариантах наблюдается ступенчатое уменьшение содержания C в почве, при этом содержание C падает непропорционально уменьшению периода отдыха. При сценариях SB10 и SB20 содержание C уменьшается как на сельскохозяйственной, так и на лесной фазе, при SB40 и SB60 наблюдается стабилизация содержания C на лесной фазе, при SB80 и SB120 – частичная компенсация содержания C на лесной фазе.

Переложная система земледелия (рисунок, Г) была компромиссным средством поддержания почвенного плодородия при невозможности как нормального удобрения, так и длительного развития леса для восстановления почвы. Ее широкое использование на модельной территории в 15–19 вв. могло быть более эффективным скорее для получения дополнительной дровяной древесины, чем для значимого улучшения качества пашни.

При оборотах *рубки* (рисунок, А) от 40 до 120 лет (строевые леса) наблюдали снижение содержания C относительно «фоновой» лесной почвы при отсутствии заметного «накопления потерь». Хорошо заметно отличие динамики C почвы для дровяных лесов (сплошная рубка с оборотом 10 и 20 лет) по сравнению со строевыми лесами: с течением

времени происходит уменьшение содержания С «с накоплением потерь». Малый оборот рубки деревьев ведет к большим потерям С почвы, поскольку в молодом состоянии деревья тратят больше питательных веществ, чем отчуждают с опадом.

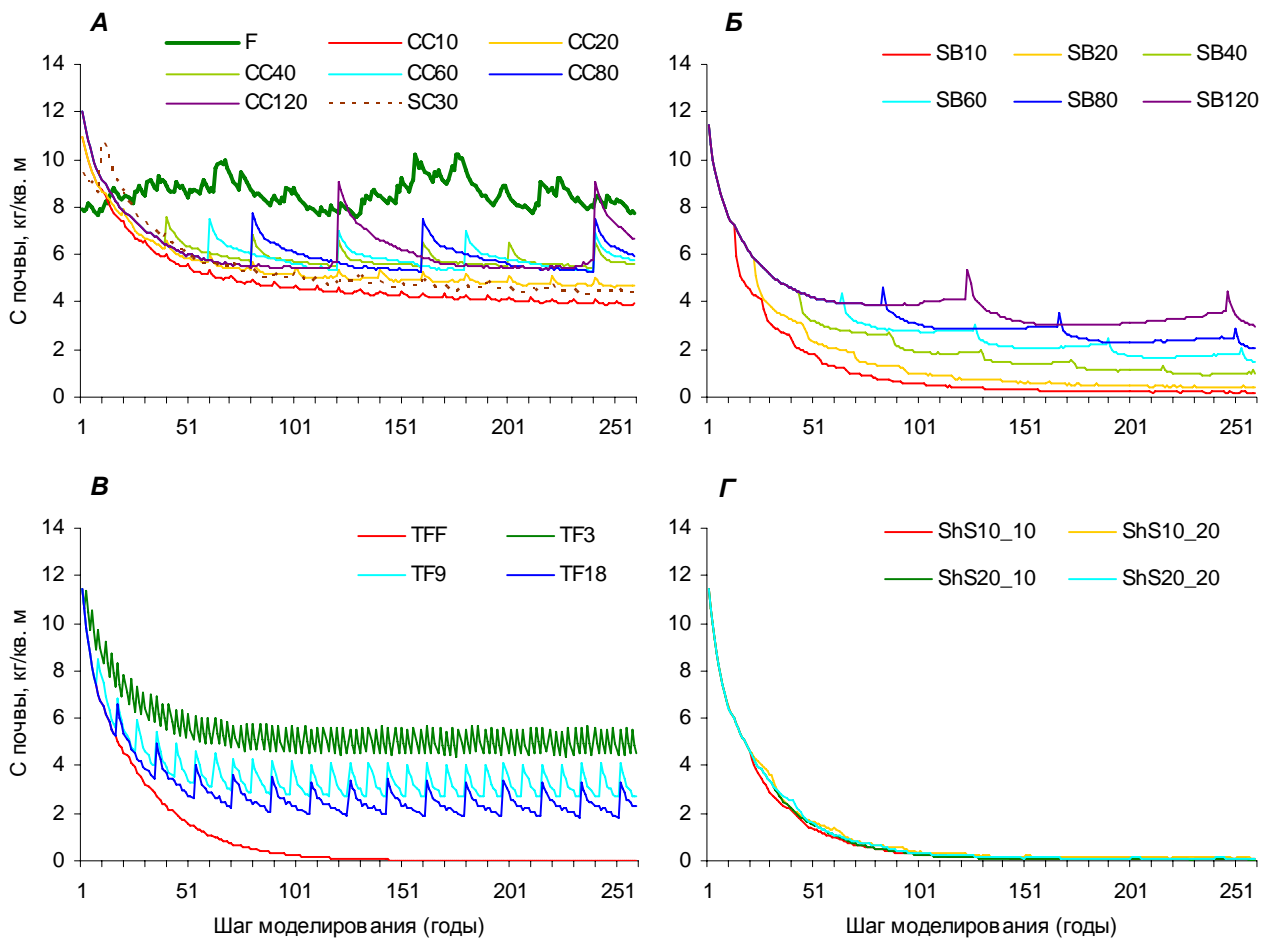


Рисунок - Динамика углерода почвы после начала воздействий: **A** – сценарии рубок и свободного развития леса; **B** – сценарии подсечно-огневого земледелия; **V** – сценарии трехполя; **Г** – сценарии перелога. Обозначения сценариев в тексте

Работа выполнена при поддержке РФФИ (08-04-00559 и 09-04-01209) и Программы фундаментальных исследований РАН № 16 «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы».

Литература

- Перепилица В.М. Роль органических и минеральных удобрений в накоплении гумуса почвы // Почвоведение. – 1974. - № 3. – С. 29-37.
- Хохлов В.Г. Органическое вещество дерново-подзолистых почв Смоленской области. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. биол. наук. 1980. Москва.
- Bobrovsky M., Komarov A., Kubasova T., Mikhailov A. Modelling dynamics of soil organic matter under historical land-use management in European Russia // The 6th European conference on ecological modelling ECEM'07. Conf. proceedings. Challenges for ecological modelling in a changing world: global changes, sustainability and ecosystem based management. Trieste, November 27–30, 2007. Trieste, OGS– ICTP, 2007. P. 70–71.
- Bobrovsky M., Komarov A., Mikhailov A., Khanina L. Modelling dynamics of soil organic matter under historical land-use management in European Russia // Ecological modelling. In press.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A. et al. ROMUL — a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // Ecological modelling. – 2001. – V. 138. – P. 289-308.
- Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L., Nadporozhskaya M.A., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S., Zudina E.V., Zoubkova E.V. EFIMOD 2 - a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecological modelling. – 2003. – V. 170. – P. 373-392.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОВЫХ КРИВЫХ У КАРЕЛЬСКОЙ БЕРЕЗЫ И БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ

Болондинский В.К., Виликайнен Л.М.

Учреждение Российской академии наук Институт леса Карельского научного центра РАН,
Петрозаводск, Россия
bolond@krc.karelia.ru

Аннотация: для изучения зависимости CO_2 -газообмена от солнечной радиации у различных разновидностей березы методом нелинейного регрессионного анализа моделировались световые кривые фотосинтеза. Наибольшие различия между карельской березой и березой повислой отмечались в параметре, характеризующем крутизну световой кривой

Модели продукционных процессов включают в себя описание совокупности физических, физико-химических и биологических процессов, протекающих как в отдельном растении, так и в фитоценозе. Модели отдельных процессов, отражающие их содержательную основу, не только расширяют область применимости модели, но и делают их более адекватными природе. В первую очередь, это касается процесса фотосинтеза, лежащего в основе продукционного процесса. Анатомо-цитологические и физиолого-биохимические исследования (Новицкая, 2008) показали существенные особенности обменных процессов у карельской березы с узорчатой древесиной (*БК*) по сравнению с обычной березой повислой (*БП*). В основном они были связаны с накоплением запасных форм метаболитов. Поскольку ассимиляты, являющиеся субстратом для синтеза запасных питательных веществ, образуются в процессе фотосинтеза, нами ставилась задача исследовать световые кривые фотосинтеза у 4-летних саженцев *БК* и *БП* в ходе вегетации.

Исследования CO_2 -газообмена проводили вблизи г. Петрозаводска в августе-сентябре 2007 г. с помощью газоанализаторов LI 6200 (фирма Li-Cor, USA). Для снятия световых кривых фотосинтеза ассимиляционная камера Li-Cor покрывалась тканями разной плотности. После каждого уменьшения освещенности измерялись все показатели, регистрируемые прибором - фотосинтетически активная радиация (*I*), CO_2 -газообмен (*P*), концентрация CO_2 в камере, температура и влажность воздуха в камере и т.д. Известно (Малкина, 1995, Молчанов, 1983), что световая кривая тесно связана с суточным ходом фотосинтеза и может значительно изменяться на протяжении дня, а также зависит как от внешних условий в данный момент, так и от предшествующей метеорологической обстановки. С учетом этого мы старались проводить измерения световых кривых у двух разновидностей в одно и то же время.

Моделирование световых кривых производили методом нелинейного регрессионного анализа с помощью функции Микаэлиса-Ментен

$$P(I(t)) = a + P_{\max} \cdot I(t)/(I(t) + b), \quad (1)$$

где *a* - параметр, характеризующий CO_2 -газообмен при *I* = 0, т.е. уровень дыхания; P_{\max} - максимум фотосинтеза; *b* - параметр, равный величине *I*, при которой $P = 0,5P_{\max}$ и является характеристикой скорости насыщения световой кривой; *t* - время.

Анализ параметров более чем 50 световых кривых фотосинтеза, часть которых приведена в таблице 1, позволил выявить некоторые тенденции. Уровень плато (P_{\max}) как правило выше у *БП*, т.е. при очень высоких интенсивностях света в соответствии с моделью поглощение углекислого газа у нее превышает таковое у *БК*. Обратные ситуации (21-22 августа) скорее всего были связаны с влиянием предшествующей атмосферной засухи. У деревьев возникало некоторое обезвоживание ствола и устьичное ограничение у *БП* было больше, чем у *БК*. Второй важный фактор - темновое дыхание (параметр модели *R*) у *БК* выше по абсолютной величине, чем у *БП*. В связи с этой причиной и световой компенсационный пункт (точка пересечения световой кривой с осью абсцисс) у б. карельской примерно в два раза выше, чем у б. повислой. Превышение фотосинтеза у березы карельской по сравнению с березой повислой (21.08.2007) можно объяснить уменьшением дыхания листьев у этих двух разновидностей в связи с небольшим похолоданием.

Таблица 1. Параметры моделей световых кривых фотосинтеза $P(I(t))$ для карельской березы (С) и березы повислой (Р).

Дата	Время	Объект	R	P_{max}	b	r^2	T	H
			мкмоль $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot c^{-1}$	мкмоль $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot c^{-1}$	мкмоль· $m^{-2} \cdot c^{-1}$	%	°C	%
16 авг.	13:47	Р	-3,34	16,56	160,3	86,2	26,6	64
16 авг.	14:34	С	-6,42	13,43	69,9	59,7	27,2	60
21 авг.	13:20	С	-2,56	13,69	207,9	93,5	20,9	56
21 авг.	15:29	Р	-2,93	9,83	321,2	82,7	20,0	64
22 авг.	11:53	С	-2,50	13,55	167,7	89,0	17,7	86
22 авг.	12:12	Р	-2,91	9,77	64,0	78,6	17,7	86
23 авг.	11:41	С	-2,78	12,05	175,2	63,2	22,1	58
23 авг.	12:19	Р	-1,96	12,63	342,1	84,4	22,3	58
13 сент.	11:33	С	-2,42	14,94	178,2	89,9	13,8	60
13 сент.	12:02	Р	-1,11	16,41	165,4	88,5	14,2	58
21 сент.	12:52	С	-1,21	11,27	93,3	90,3	13,7	77
21 сент.	13:21	Р	-1,09	14,53	131,8	93,9	13,3	79
26 сент.	11:58	Р	-2,68	20,46	125,6	93,4	19,1	47
26 сент.	12:43	С	-4,24	17,65	97,7	91,3	19,1	47

Примечание: r^2 - коэффициент детерминации; T – температура воздуха, H – относительная влажность воздуха.

Наибольший интерес представляет третий параметр – “b”, который характеризует угол наклона в начальной части световой кривой к оси абсцисс. Практически во всех случаях, когда во время измерения погода была безоблачной, величины b были меньше у БК, чем у БП. Но результаты были достаточно стабильными. Снятие световых кривых в переменную облачность с редкими периодами чистого солнца приводило к большому разбросу данных, и коэффициент детерминации моделей (r^2) составлял 65-80%. Однако и в этих случаях прослеживалась тенденция более высоких значений параметра b у БП. Таким образом, при малых интенсивностях света более эффективно его использовала береза карельская, и высокий уровень сахаров во флоэмно-ксилемном экссудате БК поддерживался на достаточно высоком уровне даже при умеренной освещенности.

Незначительное снижение CO_2 -газообмена у саженцев БК при высокой интенсивности света, даже при повышенном уровне темнового дыхания, по сравнению с БП можно объяснить тем, что, наряду с повышенным уровнем темнового дыхания у БК, имеет место интенсивный отток ассимилятов в осевые органы и значительное увеличение в структуре тканей доли запасающей паренхимы (Новицкая, 2008). В результате концентрация сахаров не достигает того критического уровня, который приводил бы к снижению фотосинтеза. За счет более эффективного использования света затененными листьями суммарное поглощение кроной углекислоты у БК не ниже, чем у БП такого же габитуса. Таким образом, в ходе эволюции у карельской березы выработались адаптационные механизмы, оптимизирующие поглощение углекислоты кроной и способствующие выживанию данной разновидности в насаждениях.

Литература

- Молчанов А.Г. Экофизиологическое изучение продуктивности древостоев.- М.: Наука, 1983.- 134 с.
Малкина И.С. Обмен CO_2 молодых деревьев лиственницы // Лесоведение.- 1995.- № 5.- С. 59-66.
Новицкая Л.Л. Карельская береза: механизмы роста и развития структурных аномалий.- Петрозаводск, 2008.- 143 с.

РАЗДЕЛЕНИЕ НИШ - УСЛОВИЕ ИЛИ СЛЕДСТВИЕ СОСУЩЕСТВОВАНИЯ ВИДОВ? ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗНООБРАЗИЯ КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СООБЩЕСТВ

Букварева Е.Н.¹, Алещенко Г.М.²

¹*Институт проблем экологии и эволюции РАН им. А.Н. Северцова, Москва, Россия*
bukvareva@mail.ru

²*Географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия*
gleb@orc.ru

Аннотация: с помощью моделирования двухуровневой системы «популяция – сообщество» показана возможность возникновения оптимальных значений внутривидового и видового разнообразия. В модели не учитывалась конкуренция и расхождение экологических ниш, считающиеся основными факторами формирования видового разнообразия. Предлагается рассматривать оптимизацию разнообразия как дополнительный механизм развития структуры сообществ.

1. Механизмы сосуществования видов

Принцип конкурентного исключения Вольтерры-Гаузе на протяжении многих десятилетий является одной из основных концепций экологии сообществ. Его первоначальная формулировка о том, что виды, занимающие одну и ту же экологическую нишу, не могут устойчиво сосуществовать, противоречила высокому видовому разнообразию в природных сообществах (наиболее яркие примеры – «планктонный парадокс» Г. Хатчинсона, тропические леса и коралловые рифы). Это заставило исследователей искать специальные механизмы, которые бы позволяли видам обойти этот принцип. Особенно велико число таких работ в области математического моделирования экологических сообществ (см., например, Chesson, 2000). В качестве основных механизмов сосуществования видов предлагались баланс внутривидовой и межвидовой конкуренции, круговые системы подавления или поддержки видов друг другом, воздействие на конкурирующие виды врагов (хищников, паразитов, болезней), колебания условий среды и характеристик видов во времени, пространственная гетерогенность среды и характеристик конкурирующих видов. Первоначальная формулировка принципа конкурентного исключения сменилась представлением о том, что число видов, неограниченно долго сосуществующих в гомогенном местообитании с постоянными численностями, не может быть больше числа зависящих от плотности факторов, ограничивающих рост их популяций. Основным механизмом, обеспечивающим сосуществование видов, продолжает считаться расхождение их экологических свойств (дифференциация ниш). Однако в последнее время стали популярными гипотезы нейтральности и функциональной эквивалентности видов (Hubbel, 2005), которые утверждают, что сосуществование видов со сходными экологическими свойствами возможно, и рассматривают видовое разнообразие как результат баланса скоростей видообразования, вымирания и расселения видов.

2. Принцип оптимального разнообразия и иерархическая модель «популяции - сообщество»

Дополнительным механизмом формирования видового разнообразия может служить принцип оптимального разнообразия, для исследования которого нами была создана и исследована двухуровневая иерархическая модель (Алещенко, Букварева, 1991; Букварева, Алещенко, 2005). Подсистемы нижнего уровня интерпретируются как популяции, верхний уровень - как сообщество одного трофического уровня, состоящее из этих популяций. Все популяции имеют одинаковые параметры. Среда характеризуется интенсивностью потока ресурса и степенью стабильности условий. Показатели разнообразия на популяционном уровне (фенотипическое разнообразие) и ценотическом уровне (число видов)

рассматриваются как характеристики единой иерархической системы. Адаптация биосистем к условиям среды заключается в оптимизации разнообразия на обоих уровнях в ходе их взаимодействия. Критерии оптимизации верхнего и нижнего уровней соответствуют максимальной эффективности использования ресурсов биосистемами.

Исследование поведения модели показало, что оптимальные значения разнообразия возникают как на популяционном, так и на биоценотическом уровнях. Они зависят от параметров модельных популяций и от характеристик среды – степени стабильности и интенсивности потока ресурса. В соответствии с результатами моделирования, природные сообщества, существующие в «богатых» и стабильных средах должны состоять из большого числа видов при низком уровне внутривидового разнообразия, в «бедных» нестабильных средах – из малого числа видов с высоким внутривидовым разнообразием. Этот вывод в самом общем виде соответствует хорошо известным эмпирическим закономерностям распределения разнообразия в разных типах экосистем и климатических условий, что позволяет нам принять принцип оптимального разнообразия биосистем в качестве рабочей гипотезы.

3. Принцип оптимального разнообразия – дополнительный механизм формирования структуры сообществ

Возникновение оптимальных значений внутривидового и видового разнообразия в нашей модели, не учитывающей явления разделения ниш и конкуренции, позволяет предположить, что оптимизация разнообразия может быть механизмом, дополнительным к действию факторов, традиционно считающихся основой формирования видового разнообразия в сообществах. Например, явления быстрого видообразования на островах и в других изолированных местообитаниях в «ненасыщенной» (обедненной) биотической среде часто интерпретируются как результат отсутствия конкуренции. Принцип оптимального разнообразия позволяет интерпретировать эти процессы как движение сообщества к оптимальным уровням разнообразия при недостатке видов. Принцип оптимального разнообразия может быть одним из объяснений симпатрического существования экологических видов-двойников, когда биоценоз как целое их «не различает» по экологическим характеристикам (Северцов, 2001). Эти явления труднообъяснимы с помощью представлений о разделении ниш, как ключевом факторе, определяющем видовую структуру сообщества. На основании принципа оптимального разнообразия можно предложить альтернативную схему: первичным фактором формирования структуры сообществ является оптимизация числа видов (и внутривидового разнообразия), а расхождение их экологических ниш – это необязательный результат их дальнейшей коадаптации. Другими словами, биоценоз прежде всего «различает» количество и ширину ниш, и лишь затем – положение ниш на градиенте условий среды.

Литература

- Алещенко Г.М., Букварева Е.Н. Модель фенотипического разнообразия популяции в случайной среде // Журнал общей биологии.- 1991.- Т.52.- №4.- С.499-508.
- Букварева Е.Н., Алещенко Г.М. Принцип оптимального разнообразия биосистем // Успехи современной биологии.- 2005.- Т.125.- №4.- С.337-348.
- Северцов А.С. Микроэволюция и филогенез // Эволюционная биология. Томск: 2001.- Т.1.- С.89-105.
- Chesson P.L. Mechanisms of maintenance of species diversity // Annual Review of Ecology and Systematics.- 2000.- V.31.- P.343-366.
- Hubbell S.P. Neutral theory in community ecology and the hypothesis of functional equivalence// Functional Ecology.- 2005.- V.19.- P. 166-172.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ ОТ ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Быховец С.С.^{1,2}, Ларионова А.А.¹, Мильхеев Е.Ю.³

¹Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

s_bykhovets@rambler.ru

²Пущинский государственный университет, Пущино, Россия

³Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Аннотация: приведены оценки интенсивности минерализации органического вещества почв в зависимости от их температуры и влажности по результатам лабораторных экспериментов, а также анализ возможных походов к параметризации указанных зависимостей.

1. Введение

Температура и влажность почвы принадлежат к числу основных факторов, определяющих скорости минерализации органического вещества почвы (ОрВП). Знание их зависимости от указанных факторов крайне необходимо для моделирования динамики ОрВП. Особенно важным это становится при попытках оценки возможного влияния ожидаемых изменений климата на баланс углерода в экосистемах. При этом остается во многом дискуссионным вопрос: насколько различны температурные зависимости скоростей минерализации лабильных и стабильных пулов ОрВП.

2. Материалы и методы

С целью оценки зависимости скоростей минерализации от температуры и влажности почвы образцы трех типов почв (луговой с содержанием органического углерода 4.3%, лугово-болотной – 27.2% и дерновой лесной – 2.5%), отобранные с глубины 0-10 см, инкубировались при различной влажности (15, 30, 70, 120 и 200% предельной полевой влагоемкости, ППВ) последовательно при температуре 2, 12, 22, 32, 42 и 52°C в течение 2-5 дней при каждой температуре, в 3-кратной повторности. Для сравнительной оценки скоростей минерализации стабильного и лабильного ОрВП, наряду с «исходными» образцами почвы, инкубировались при тех же условиях образцы тех же почв, предварительно инкубированные при температуре 22°C и влажности 70% ППВ в течение 365 дней. Предполагалось, что если в «свежих» образцах значительная часть эмиссии CO₂ может быть обусловлена сравнительно небольшим количеством быстроразлагающегося ОрВП, то в образцах, инкубированных в течение года при оптимальных условиях эта составляющая должна практически полностью минерализоваться, и эмиссия CO₂ будет обусловлена оставшимся более стабильным пулом.

Температурная зависимость скорости минерализации $k(T) = k(T_{\text{ref}}) \cdot f(T)$ аппроксимировалась широко известными функциями: Вант-Гоффа

$$f(T) = Q_{10}^{\frac{T-T_{\text{ref}}}{10}}$$

где: Q_{10} – коэффициент, показывающий, во сколько раз изменяется значение $f(T)$ при изменении температуры T на 10°C, T_{ref} – значение температуры, при котором $f(T) = 1$ (в нашем случае 20°C); и Аррениуса

$$f(T) = e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}+273} - \frac{1}{T+273} \right)}$$

где: E_a – энергия активации, Дж/моль; $R = 8.31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

3. Результаты и обсуждение

Обе кривые достаточно хорошо описывают температурную зависимость экспериментальных данных, т.к. в нашем случае в исследованном диапазоне температур не наблюдалось существенного замедления процесса с ростом температуры.

На рисунке приведены зависимости скорости минерализации при фиксированной температуре 20°C (k_{20}) и коэффициента Q_{10} от влажности почвы. Скорость минерализации, в целом, растет с ростом влажности (заметного снижения ее при переувлажнении не наблюдается; очевидно, из-за малого объема образцов, в них не возникают анаэробные условия, являющиеся в этом случае главной причиной замедления минерализации).

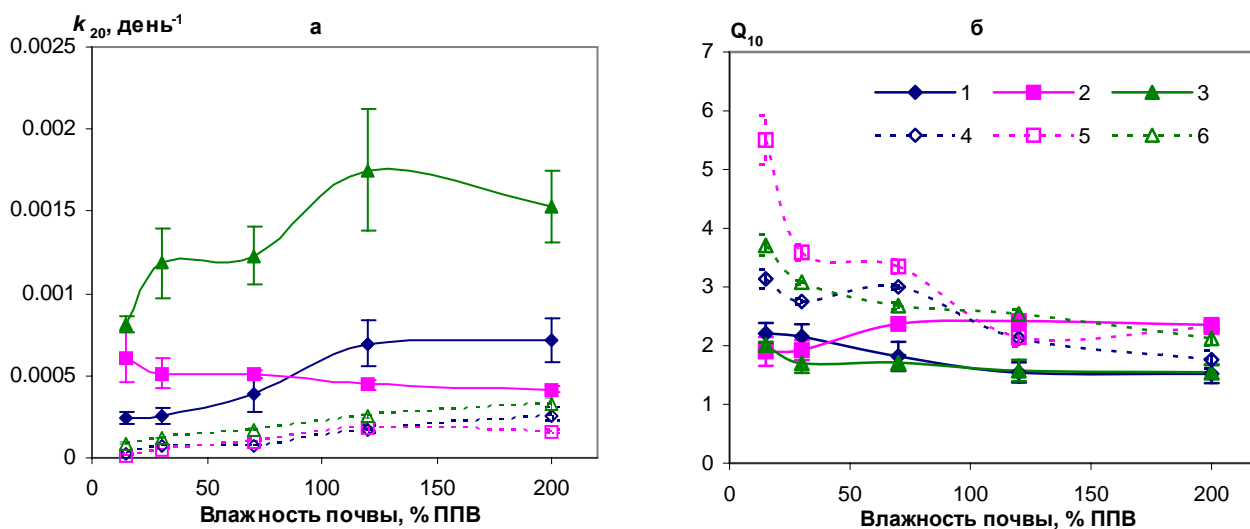


Рис. 1. Зависимость скорости минерализации при постоянной температуре 20°C k_{20} (а) и коэффициента Q_{10} (б) от влажности почв; 1-3 – «исходная» почва, 4-6 – после года инкубации; 1, 4 – луговая, 2, 5 – лугово-болотная, 3, 6 – дерновая лесная; вертикальные линии – стандартная ошибка

Как и следовало ожидать, интенсивность минерализации стабильного ОрВП ниже, чем ОрВП «исходной» почвы. Зависимость же от температуры в случае стабильного ОрВП выражена сильнее (на что указывают более высокие значения коэффициентов Q_{10} и E_a), что не противоречит литературным данным, и может оказаться важным для анализа последствий изменения климата. Обращает на себя внимание зависимость коэффициента Q_{10} (а также E_a) от влажности почвы, более явно выраженная для стабильного ОрВП. Подтверждение этого факта на более обширном материале может позволить получить немультимпликативную функцию для двухфакторной зависимости от температуры и влажности.

4. Заключение

В современных моделях углеродного цикла температура одинаково влияет на разложение различных пулов ОрВП. Наши данные свидетельствуют о том, что необходимо учитывать различие температурных зависимостей минерализации лабильных и стабильных пулов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (08-04-00559 и 09-04-01209) и Программы фундаментальных исследований РАН № 16 «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы».

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СООБЩЕСТВ АНАЭРОБНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

Вавилин В.А.

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

Аннотация: показано, что современный анализ поведения сообществ микроорганизмов, разлагающих органические вещества, включает традиционные измерения химических компонентов, молекулярно-биологические методы и математическое моделирование. Предложено уравнение, описывающее аккумуляцию изотопа в микробной клетке.

При отсутствии кислорода в разложении органических веществ участвует целое сообщество микроорганизмов, осуществляющих последовательно гидролиз, кислотогенез, ацетогенез и метаногенез. В ходе этих стадий из сложных молекул образуются жирные кислоты и конечные продукты – метан (CH₄) и углекислый газ (CO₂). В начале 90-х годов прошлого столетия мы построили имитационную модель “Метан” (Вавилин и др., 1993), позволяющую оценить скорость разложения органического вещества в анаэробных условиях. Это первая в мировой практике обобщенная математическая модель анаэробного процесса, которой могут пользоваться обычные исследователи и инженеры, а не только программисты-профессионалы (www.methane.da.ru). Высокие концентрации продукта или субстрата могут ингибировать каждую реакцию, и в итоге конечный продукт CH₄ может и не появиться.

Традиционно (Batstone et al., 2002), для калибровки и верификации математических моделей процессов разложения органических веществ учитывается лишь динамика химических компонентов. Недавно, с развитием молекулярных методов стало возможным идентифицировать и измерять концентрации конкретных видов и групп микроорганизмов, осуществляющих процесс разложения органических веществ. Этому способствовали и соответствующие изотопные измерения.

Известны два типа метаногенных микроорганизмов, превращающих ацетат в метан (Ferry, 1993). Палочковидная *Methanosaeta* sp. доминирует при низкой концентрации ацетата, тогда как кокки *Methanosarcina* sp., образующие колонии, преобладают при высокой концентрации ацетата. Измеряя ¹³C в отдельной микробной клетке (Nano Secondary Ion Mass Spectrometry – In Situ Hybridization), можно уточнять механизм процесса. На рисунке показана динамика разложения метанола сообществом мезофильных микроорганизмов, изученная группой французских исследователей, в которую входил и автор:

1. CH₃OH + 2H₂O → 3H₂ + H₂CO₃ (Метанол-окисляющие бактерии)
2. H₂ + 0.25H₂CO₃ → 0.25CH₄ + 0.75H₂O (*Methanoculleus* sp.)
3. H₂ + 0.5 H₂CO₃ → 0.25CH₃COOH + H₂O (Гомоацетогены)
4. CH₃COOH + H₂O → CH₄ + H₂CO₃ (*Methanosarcina* sp.)

Согласно SSCP (Single Strand Conformation Polymorphism) и FISH (Fluorescent In Situ Hybridization) анализов, наиболее вероятно, что микроорганизмы, относящиеся к роду *Pseudomonas*, выполняют синтрофное окисление метанола вместе с водородотрофными метаногенами *Methanoculleus* sp., превращающих H₂/CO₂ в CH₄. Гомоацетогенами являются микроорганизмы рода *Clostridia*.

В ходе анаэробного процесса субстрат превращается в продукт и частично переходит в биомассу: Субстрат (S) → Продукт (P) + Биомасса (B). Для описания аккумуляции ¹³C в биомассе мы предложили следующее уравнение (Vavilin et al., 2009):

$$\frac{df^{Bio}}{dt} = \frac{1}{B} \frac{d^{13C}B}{dt} - \frac{^{13C}B}{B^2} \frac{dB}{dt} = \frac{dB/dt}{B} \left\{ \frac{d^{13C}B/dt}{dB/dt} - f^{Bio} \right\} \approx f(L) \{f^S - f^{Bio}\}$$

где $f^{Bio} = ^{13C}B/B$ - доля 13C в биомассе, которая, в свою очередь, зависит от доли 13C в

субстрате $f^S = ^{13C}S/S$; dB/dt - скорость роста биомассы; $f(L) = \frac{\mu_m L}{K_L + L}$ - функция Моно

для единственного лимитирующего субстрата L ; $\mu_m = Y\rho_m$ - максимальная удельная скорость роста биомассы. Уравнение упрощается при лимитировании скорости процесса концентрацией субстрата L . Чем выше доля 13C в субстрате, тем выше и аккумуляция 13C в биомассе. В итоге, было показано, что метилотрофные микроорганизмы являются автотрофами, т.е. они растут на H_2CO_3 , а не непосредственно на CH_3OH .

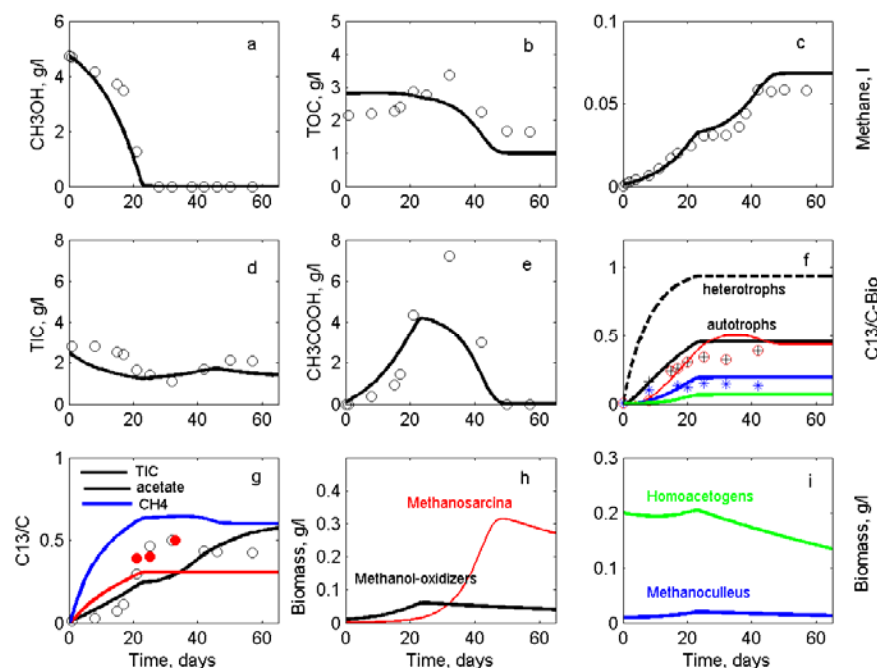


Рисунок 1. Символы – эксперимент (Li, 2008), кривые - динамическая модель. TIC и TOC – общая концентрация неорганического и органического углерода. Содержание $^{13C}/C$ в биомассе: + (метилотрофы), o (*Methanosarcina* sp.) и * (другие микроорганизмы).

Литература

- Вавилин В.А., Васильев В.Б., Рытов С.В. Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов.- М.: Наука, 1993.- 204с.
- Batstone D.J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S.V., Pavlostathis S.G., Rozzi A., Sanders W.T.M., Siegrist H., Vavilin V.A. Anaerobic Digestion Model No.1. Scientific and Technical Report No.13.– 2002. Cornwall, UK: IWA Publishing, – 77p.
- Ferry J.G. (ed.) Methanogenesis: ecology, physiology, biochemistry & genetics. New York: Chapman & Hill, 1993.
- Li T. Groups Microbiens Fonctionnels Impliqués dans la Methanization de la Cellulose et du Methanol: Diversite, Fonction et Influence de la Temperature. These de Doctorat. Universite Paris-Sud 11, U.F.R. des Sciences d'Orsay. 2008.– 241p.
- Vavilin V.A., Li T., Qu X., Mazeas L., He P.-J., Bouchez T. Modelling solid waste degradation mechanisms: chemical reactions, microbial ecology and isotope 13C fractionation. In Proc.: 3rd International Workshop “Hydro-Physico-Mechanics of Landfills. Braunschweig, Germany, 10-13 March 2009, Session B, 1-10.

ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО ОБМЕНА ЭКОСИСТЕМ ЮЖНОЙ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТАЙГИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Варлагин А.В., Курбатова Ю.А.

*Учреждение Российской академии наук Институт проблем экологии и эволюции
им. А.Н. Северцова РАН, Москва, РФ*
varlagin@deol.ru

Аннотация: пульсационные измерения потоков H_2O и CO_2 позволяют рассчитать чистый углеродный обмен, суммарное дыхание, валовую первичную продукцию и эвапотранспирацию экосистемы. Данные используются при изучении энергомассообмена наземных экосистем для различных временных интервалов и для валидации широкого диапазона моделей. В статье рассматривается использование данных пульсационных измерений для тренировки искусственной нейронной сети с целью получения суточных и годовых потоков углекислого газа и водяного пара еловой экосистемы в текущих условиях и при климатических изменениях.

Объекты и методы исследований

Для обеспечения режимных круглогодичных пульсационных измерений оснащена техническими средствами наблюдения станция в ельнике сфагново-черничном на территории Центрального Лесного Биосферного Природного Государственного Заповедника. Для территории характерно наличие естественных экосистем при минимуме антропогенного влияния.

Методика работ состоит в непрерывных измерениях концентрации CO_2 и водяного пара инфракрасным газоанализатором и основных метеорологических параметров приборами, расположенными на метеорологической вышках. Метод микровихревых пульсаций заключается в измерении потоков скалярных величин (тепло, масса) в измеряемом объеме воздуха, приборами, расположенными на некоторой высоте над поверхностью земли. Наряду с измерениями концентраций CO_2 и H_2O инфракрасными газоанализаторами в систему метеорологических вышек включены следующие приборы: ультразвуковой анемометр-термометр, радиометры, альбедометр, датчики фотосинтетически активной радиации, датчики температуры и влажности воздуха, мембранный датчик атмосферного давления, чашечный анемометр, ветровой флюгер, датчики температуры почвы, датчики потоков тепла с поверхности почвы, измеритель осадков, логгеры-коммутаторы и накопители данных. Данные регистрируются круглосуточно с частотой 20Гц с получасовым осреднением и последующей записью на накопителях.

Данные, полученные измерительным комплексом, обрабатывались в соответствии с методологией принятой для Европейской сети станций (Aubinet et al.,2000), включающей контроль качества, учет запаздывания сигнала, коррекцию компонент ветра, тесты стационарности и u^* коррекцию. Расчет количества CO_2 запасаемого в нижних ярусах полога при слабом атмосферном перемешивании производился на основании изменений концентрации углекислого газа над пологом леса в течение получасового периода. Небольшие пропуски данных (до двух часов) обусловленные отключениями электричества или периодическими калибровками аппаратуры заполнялись линейной интерполяцией крайних значений. Значения для более длительных пропусков рассчитывались методом крайних распределений (Reichstein et al.,2005). Расчеты суточных и годовых потоков углекислого газа и водяного пара проводились суммированием 48 значений получасовых потоков для получения дневного NEE (Net Ecosystem Exchange – чистый обмен экосистемы), суммирование которых в свою очередь давало значение годового NEP (Net Ecosystem Productivity – чистая продукция экосистемы). Суммарное дыхание экосистемы ER (Ecosystem Respiration) рассчитывалось на основании кратковременных зависимостей ночных потоков NEE от температуры воздуха и почвы (Reichstein et al.,2005). Валовая первичная продукция GPP (Gross Primary Production), или фотосинтез экосистемы, рассчитывался как разница между ER и NEE.

При моделировании NEE, ER, GPP и эвапотранспирации (ET) значения суточных потоков углекислого газа и водяного пара, полученных в период 1998-2008гг. (всего 3287 суточных значений) были разбиты на три множества: обучающее, контрольное (для избегания переобучения сети) и тестовое (365 значений – данные 2004 года). Для построения искусственной нейронной сети использовалась архитектура многослойного персептрона с двумя промежуточными слоями, 11-ю входами (температура воздуха T_a , температура почвы на четырех глубинах T_{s1-4} , сумма осадков, относительная и максимальная за день влажность воздуха, уровень фотосинтетически активной радиации, номер дня года представленный в виде синусов и косинусов) и 4-мя выходами (NEE, ER, GPP, ET). Для обучения сети использовался алгоритм обратного распространения.

Результаты и их обсуждение

Результаты сравнения рассчитанных с помощью нейронной сети и измеренных потоков углекислого газа и водяного пара показали, что предложенный метод позволяет достоверно оценить углеродный и водный обмен на уровне экосистемы для различных временных интервалов (от одних суток до года). В Таблице 1 приведены статистические характеристики сравнения для выборки участвующей в обучении сети и для тестовой выборки.

Длительность непрерывных уникальных рядов прямых измерений на экосистемном уровне, позволяет провести анализ отклика состояния (выраженный через изменчивость потоков тепла, влаги и газообмена CO_2) для тестовых еловых экосистем (типичных для европейской тайги) на глобальные изменения, характерные для региона (увеличение зимних температур, концентрации CO_2 в атмосферном воздухе, изменение режима осадков и уровня грунтовых вод, температуры и влажности почвы). В сочетании с моделями биогеохимических циклов, моделями класса SVAT и нейросетевыми методами эти данные являются хорошей основой для усовершенствования методик измерений, оценки устойчивости составляющих биогеохимического и гидрологического циклов, прогноза газообмена CO_2 и суммарного испарения для лесных экосистем при различных сценариях будущего климата.

Таблица 1. Коэффициенты детерминации сравнения рассчитанных и измеренных значений для обучающего и тестового массивов искусственной нейронной сети

	NEE	GPP	ER	ET
обучающий и контрольный массивы	0.78	0.95	0.93	0.89
тестовый массив (данные 2004 года)	0.78	0.94	0.91	0.89

Благодарности

Исследования поддержаны программами Отделения биологических наук РАН «Биологические ресурсы России», Президиума РАН «Биологическое разнообразие», РФФИ (проект №09-04-00151).

Литература

- Aubinet, M., A. Grelle, A. Ibrom, Ü. Rannik, J. Moncrieff, T. Foken, A. S. Kowalski, P. H. Martin, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Clement, J. Elbers, A. Granier, T. Grünwald, K. Morgenstern, K. Pilegaard, C. Rebmann, W. Snijders, R. Valentini, and T. Vesala. 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research* 30:113-175.
- Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, et al. (2005) On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11, 1424-1439.
- Papale D & Valentini R (2003) A new assessment of European forests carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization. *Global Change Biology*, 9, 525-535.

МЕТОД РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ВЛАГОЗАПАСОВ ПОЧВЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ КРУГЛОГОДИЧНОГО АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Варчева С.Е.

ГУ «ВНИИСХМ», г. Обнинск, Россия
s.varcheva@mail.ru

Аннотация: представляется математическая модель, описывающая круглогодичную динамику запасов почвенных вод в масштабе сельскохозяйственного поля с декадным шагом по времени. Проводится сравнение рассчитанных запасов воды в метровом слое почвы с измеренными на агрометеорологической станции. Показано, что численная схема, ориентированная на стандартную агрометеорологическую информацию, обеспечивает достаточную для практики точность мониторинга влагозапасов в круглогодичном режиме.

Для целей разрабатываемого в настоящее время в ГУ «ВНИИСХМ» системы круглогодичного мониторинга условий увлажнения посевов сельскохозяйственных культур (Сиротенко, 2008) необходима модель, которая позволяет рассчитывать динамику влагозапасов почвы и связанных с ними элементов водного баланса непрерывно в течение года с декадным шагом по времени. Круглогодичный расчет элементов водного баланса по сравнению с расчетными схемами, пригодными лишь для теплого периода года, значительно усложняет задачу и по этой причине, по-видимому, такой подход не использовался ранее. Разрабатываемая численная схема предполагает непрерывное моделирование годового гидрологического цикла. Для климатических условий России это означает моделирование процессов промерзания и оттаивания почвы, накопления снега, а также процессов формирования стока талых вод. Моделирование гидрологического цикла в холодный период года, когда в основном происходит накопление запасов почвенной влаги, позволяет, в частности, определить запасы продуктивной влаги к началу весны. Этот показатель, как известно, является ключевым для прогнозирования урожайности озимых зерновых культур на территории черноземной зоны России.

Теоретические и практические вопросы моделирования энергомассообмена в системе ПОЧВА-РАСТЕНИЕ-АТМОСФЕРА неоднократно рассматривались многими авторами (Сиротенко, 1981; Палагин, 1981; Полуэктов, 1991).

Предлагаемая схема расчета водно-теплового режима системы ПОЧВА-РАСТЕНИЕ-АТМОСФЕРА основывается на использовании балансовых уравнений – для запасов воды в снежном покрове и в пахотном слое почвы. Моделируются процессы накопления воды в снежном покрове, интенсивность таяния снега, испарение с поверхности почвы и динамика влагозапасов в метровом слое почвы.

Предполагается, что система численного мониторинга влагозапасов для ЕТ РФ будет реализована в нескольких вариантах, в том числе и для полей, заданных на фиксированной нерегулярной сети гидрометеорологических станций (ГМС) – без пространственного осреднения.

В данном случае рассматривается схема для заданной сети станций, при этом для расчетов используются декадные значения следующих метеорологических параметров: осадков, температуры и дефицита влажности воздуха.

Параметры численной схемы идентифицировались (калибровались) на основании наблюдений за влажностью почвы на полях с озимой пшеницей на ГМС Гигант Ростовской области в течение 1971 по 1986 гг. Почвенный покров – тяжелосуглинистый предкавказский чернозем. На рисунках представлены результаты двух численных экспериментов, проведенных после предварительной калибровки параметров модели водно-теплового режима. Эти данные позволяют сделать вывод о достаточно высокой сходимости рассчитанных и измеренных значений запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы. В первом эксперименте (рисунок а) влагозапасы почвы один раз в год корректировались – задавались равными фактическим значениям на дату возобновления вегетации озимых

зерновых; в этом случае расчетная схема позволила воспроизвести 81 % дисперсии продуктивных влагозапасов метрового слоя почвы на материалах наблюдений, включающих 134 измерения (коэффициент корреляции $r=0,90$).

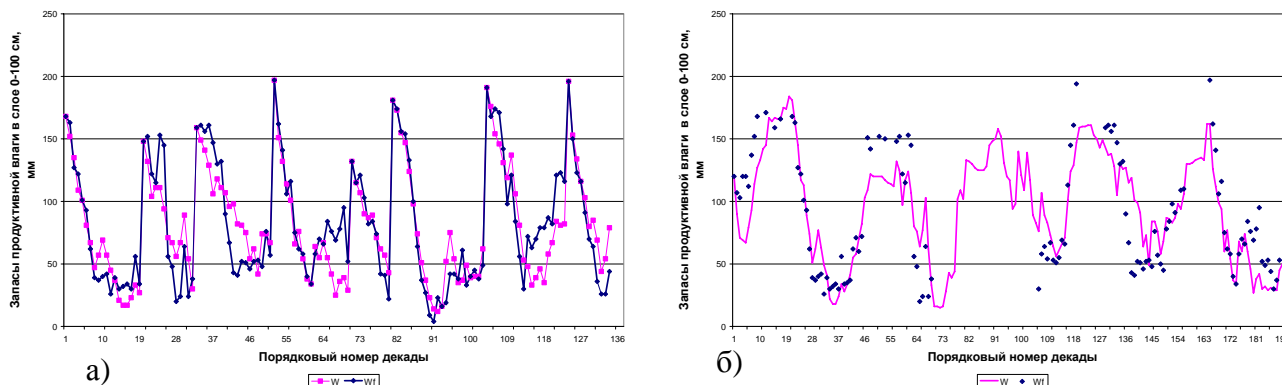


Рисунок. Сравнение рассчитанных (W) и фактических (Wf) влагозапасов почвы под озимой пшеницей на ГМС Гигант Ростовской области с 1971 по 1986 гг.: а) вариант с ежегодным присвоением начальных значений влажности почвы (N=134, $r=0,90$); б) вариант без ежегодной корректировки влажности почвы (N=576, $r=0,86$)

Во втором эксперименте (рисунок б) был реализован непрерывный режим расчета динамики влагозапасов в течение 16 лет без ежегодного задания начальных условий. Это необходимо для задачи оценки влияния изменений климата на степень аридности территории и, в конечном итоге, на продуктивность сельского хозяйства.

Расчетная схема в этом случае позволила воспроизвести 74 % дисперсии ($r=0,86$). Близость оценок коэффициентов корреляции (0,90 и 0,86) для первого и второго расчетов подтверждают достаточную для практического использования точность расчетной схемы в круглогодичном режиме. Об этом свидетельствует также отсутствие каких-либо проявлений неустойчивости (например, возможного накопления ошибок) для столь длительного расчетного периода, равного 576 декадам (16 лет). В целом, как показывают приведенные выше результаты расчетов для Ростовской области, численная схема для фиксированной сети гидрометеорологических станций при использовании стандартной для агрометеорологических расчетов информации – декадных значений осадков, температуры и влажности воздуха – обеспечивает достаточную для практики точность мониторинга влагозапасов в круглогодичном режиме.

Влияние изменений климата на условия увлажнения почвы было оценено с помощью непрерывного численного эксперимента в течение последних 40 лет – с 1966 по 2006 гг.

Таким образом, многолетнее круглогодичное моделирование гидрологического цикла открывает возможность реального учета наблюдаемых и ожидаемых в ближайшие десятилетия изменений климата при разработке стратегии развития АПК России с учетом тенденций мирового производства продовольствия.

Литература

- Палагин Э.Г. Математическое моделирование агрометеорологических условий перезимовки озимых культур.– Л.: Гидрометеоиздат, 1981.– 197 с.
- Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэкосистемы.– Л.: Гидрометеоиздат, 1991.– 312 с.
- Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем.– Л.: Гидрометеоиздат, 1981.– 167 с.
- Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н., Долгий-Трач В.А. Разработка системы регионального круглогодичного мониторинга водно-теплового режима посевов сельскохозяйственных культур // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук.– Калуга, 2008.– Вып. 13.– С. 276-281.

ИНФОРМАЦИОННО-ПОЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ

Винокуров И.Ю.¹, Степанов И.Н.²

¹Владимирский НИИ сельского хозяйства РАСХН, Суздаль, Россия

²Институт биологического приборостроения Российской академии наук, Пущино, Россия
vnish@mail.ru; agroecology@inbox.ru

Аннотация: многолетние производственные опыты на полях Владимирского ополья показали, что в создании почвенного плодородия большое участие принимают физические и информационные поля. Переход к новому квантово-механическому пониманию агроэкосистем открывает новую страницу в земледелии, что предполагает возможность управления полями агроэкосистем на базе нанотехнологий

Введение. При проведении опытов наблюдались загадочные явления: внесение удобрений на одном склоне приводило к изменению пространственной структуры продуктивности криволинейной системы на другом склоне. Перенос удобрений с поверхностным или внутрпочвенным стоком с одного склона на другой исключается. Остается предполагать возможность биогеохимического взаимодействия между почвами указанных агроэкосистем в результате скрытой от глаз деятельности информационных и физических полей. Для проверки этого феномена нами проведены расчеты данных опытов.

Объект и методы исследований. Анализ опытных данных производился по двум схемам, используя крупномасштабные почвенные и агрохимические карты, составленные двумя разными методами. 1- Результаты опытов наносились на ареалы традиционных карт, которые имели *плоские*, однородные, изотропные и изолированные друг от друга поверхности, что позволяло производить расчеты по формулам евклидовой геометрии и классической механики; 2 – Те же результаты опытов наносились на карты, составленные методом пластики рельефа, ареалы которых – потоки имели *искривленные*, неоднородные, анизотропные поверхности, каждая точка которых функционально и генетически связана с соседними точками. Это позволило использовать формулы неевклидовой геометрии и нелинейной физики.

Сравнение полученных данных по схеме «плоские - кривые» поверхности дали неожиданные результаты, подтверждающие влияние на почвенно-агрохимические процессы «искривленных» поверхностей физических и информационных полей. Расчеты на «плоских» поверхностях традиционных карт не показали присутствия полей. Изучение на пашнях кинетики нитрификации позволило разработать модель почвенно-агрохимической устойчивости, связанной с сопряжением «био» и «гео» компонент биогеоценозов (экосистем). Установлено, что кинетику нитрификации серых лесных почв можно описать логистическим уравнением Ферхюльста, которое учитывает константу скорости нитрификации (r), экологическую емкость (K), текущую концентрацию нитратов (x). Параметры K и r определяются из кинетических кривых, отражающих накопление нитратов во времени. В качестве параметра устойчивости агроэкосистем предложено отношение K/r . На рисунках даны номера ЭАЛ (элементарные ареалы ландшафтов) по их расположению на склонах разных экспозиций (СЗ – 1,2,3; ЮВ – 5,6,7) и водоразделе (4).

Результаты и их обсуждение. На рисунке приведены лишь некоторые из многих графиков, показывающие различия в протекании тех или иных процессов на «плоских» и «кривых» поверхностях соответственной традиционных и новых потоковых карт (пластики рельефа). Рассмотрим кинетику нитрификации как показатель влияния физических и информационных полей на биогеохимические свойства пашен. На кинетику нитрификации оказывают влияние почвенные неоднородности, которые могут быть представлены относительно «плоскими» или «кривыми» (с физическими полями) на потоковых картах агроэкосистем.

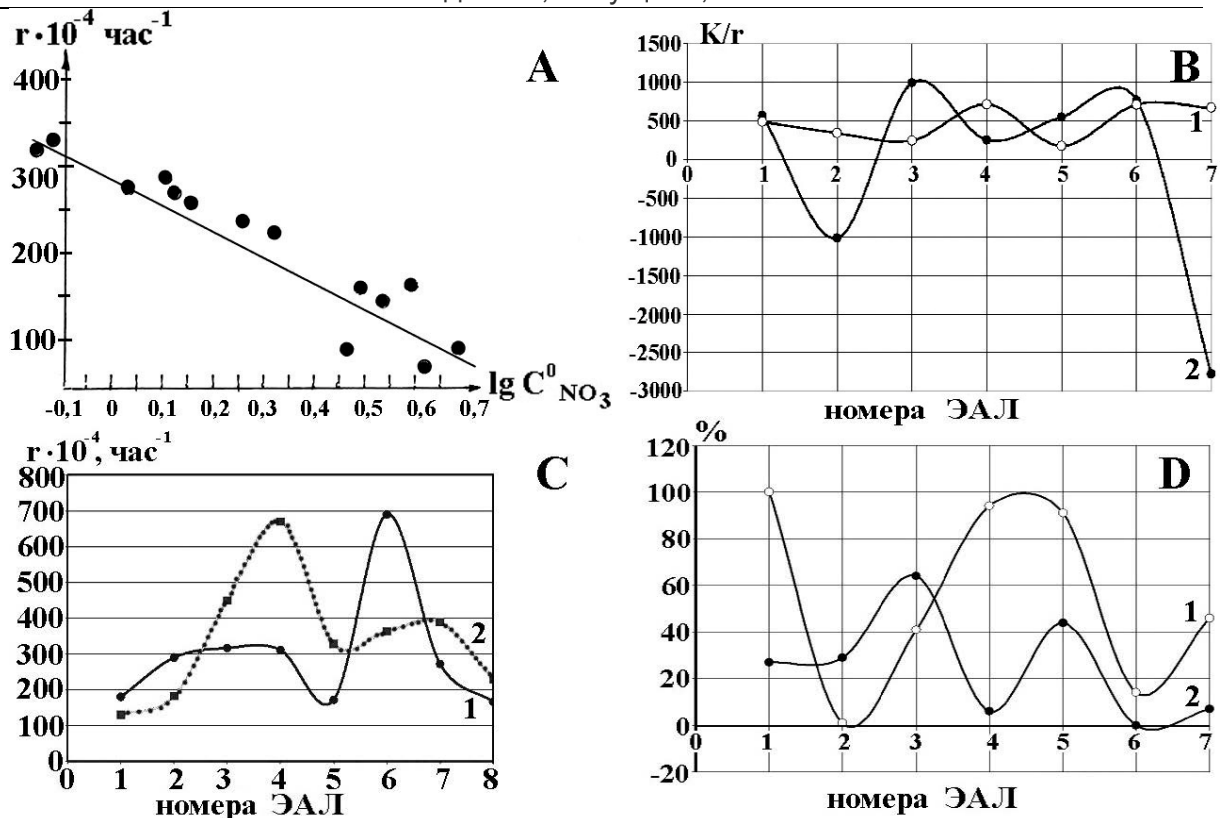


Рисунок. А - Зависимость константы скорости нитрификации от логарифма начальной концентрации нитратов на «плоских» ареалах; В - Параметры устойчивости для «кривых» ареалов; С - Константы скорости нитрификации на «кривом» ареале: контрольная полоса (ряд 1) и антропогенное наращивание минеральной компоненты $N_{40}P_{40}K_{40}$ на соседней полосе (ряд 2), осень 2004 г.; D - Содержание азотобактера (*Chroococcum*) на «кривой» поверхности и влияния физического поля

Нитрификация на «плоских» агроэкосистемах дает одни результаты (А), а при рассмотрении тех же данных на «искривленной» поверхности агроэкосистем – другие (В). На «искривленных» ареалах (В, С) зависимость $r = f(\lg C_{\text{NO}_3})$ теряет линейный характер, который был присущ «плоскому» ареалу (А). Профили контрольной полосы и полосы, на которую внесены минеральные удобрения и имеющие границу раздела, образуют на «искривленных» ареалах симметричные структуры относительно водораздела, разделяющего склоны, что подчеркивает важность учета симметрии только тогда, когда мы используем карту пластики с искривленными ареалами, а сами симметричные особенности данных есть результат воздействия физических полей. Определение кинетических параметров нитрификации на «кривых» ареалов показало, что влияние кривизны создает волнообразный согласованный характер данных.

Выводы. Многие века земледелие основывалось на данных о почве как твердом образовании, плодородие которого зависело от минералов, органического вещества, воды и воздуха. Все внимание было обращено на поведение этих составляющих. Видимо, наступило время точного (прецизионное) и нанотехнологического земледелия, когда в процесс повышения плодородия агроэкосистем могут быть включены физические и информационные поля.

Литература

Винокуров И.Ю. Эволюция почвенных экосистем: Химическое загрязнение, саморегуляция, самоорганизация, устойчивость.- М.: Юркнига, 2007.- 320 с.

ФЕРОМОННЫЙ КАНАЛ КОММУНИКАЦИИ КАК СИСТЕМА МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Волкова П.Е., Суховольский В.Г.

Институт леса им. В.Н.Сукачёва СО РАН, Красноярск, Россия
polina72000@mail.ru

Аннотация: предложена модель феромонного канала коммуникации насекомых как системы массового обслуживания. В связи с тем, что постановка экспериментов по записыванию сигналов с нейронов антенны бабочки во время его полёта не представляется реальным, математическое моделирование процессов «обработки» феромонов рецепторами насекомых предоставляет возможность глубже понять механизмы, лежащие в основе навигации насекомых по феромонным струям.

Механизмы поиска половых партнёров у различных насекомых включают в себя коммуникацию с помощью обладающих привлекающим действием половых феромонов. Данная работа посвящена построению модели феромонного канала коммуникации насекомых на основе математического аппарата системы массового обслуживания. Эта задача представляет интерес в связи с активным использованием феромонов для оценки плотности популяций насекомых-вредителей и контроля их численности.

Многие авторы предполагают, что механизм поиска по феромонному следу связан с отрицательным анемотаксисом самцов. Однако в условиях турбулентности на дистанциях более чем в несколько метров направление ветра не несёт уже почти никакой информации о том, в какой стороне находится источник. (Brady et al., 1989; Elkinton et al., 1987). Т.е. рецепция молекулы феромона и определение направления ветра особью не дают полной информации о местонахождении предполагаемого партнера.

Достаточно большие скорости полёта насекомых в сочетании с высокой степенью неоднородности потока феромона означают, что усреднённая по времени статистика не может быть достоверно вычислена в доступном насекомому промежутке времени. В связи с этим мы предполагаем, что при навигации вдоль феромонных струй насекомое руководствуется текущей информацией от рецепторов. В настоящее время затруднительно записать сигналы с нейронов антенны бабочки во время его полёта (Rutkowski et al., 2006.) и, соответственно, трудно точно узнать, почему и на основе какой информации бабочка выбирает направление, в котором она перемещается в тот или иной момент времени.

Сложность постановки экспериментов на биологических объектах в исследованиях, касающихся механизмов феромонной коммуникации, обуславливает необходимость использования методов математического моделирования для анализа возможных алгоритмов принятия решения в процессе поиска самками половых партнеров.

В настоящей работе для построения модели поиска насекомыми половых партнеров использованы методы теории массового обслуживания. В рамках системы массового обслуживания поток феромона можно рассматривать как поток требований, а феромонный рецептор - как прибор, «обслуживающий» молекулы феромона.

Будем предполагать, что отдельный рецептор связывает молекулу феромона независимо от того, фиксируется ли молекула феромона другими рецепторами, т.е. процессы восприятия феромона отдельными рецепторами независимы. Пусть отдельный рецептор бабочки «бомбардируются» молекулами феромона с интенсивностью λ (молекул/сек) Будем предполагать, что поток феромона – простейший (то есть одновременно на рецептор не могут попасть две и более молекулы феромона) без последствия (то есть вероятность фиксации молекулы феромона не зависит от предыстории восприятия феромонов рецепторами). Попавшая на рецептор молекула феромона блокирует его в течение среднего

времени $\tau = \frac{1}{\mu}$ (где μ - интенсивность «обслуживания» молекулы рецептором,

требований/сек). При этом нервные окончания рецепторов генерируется спайк, посылая тем самым в нервные ганглии насекомого информацию о восприятии молекулы феромона.

При таких условиях можно говорить, что взаимодействие феромона с рецепторами описывается системой массового обслуживания **M/M/1** (Клейнрок, 1982). В этом случае в произвольный момент времени вероятность p_0 того, что рецептор будет свободным, дается выражением

$$p_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu} \quad (1)$$

Выражение (1) имеет смысл только при условии, что интенсивность потока молекул будет меньше скорости взаимодействия молекулы феромона с рецептором ($\lambda < \mu$). Чем больше величина p_0 , тем выше у особи шанс фиксации молекулы феромона, то есть получения информации о наличии самок данного вида насекомых. Напротив, если $p_0 \rightarrow 0$, то есть рецептор практически всегда занят, восприятие новой молекулы феромона становится маловероятным. Из (1) следует, что при насыщении воздуха молекулами феромона и выполнении условия $\lambda \rightarrow \mu$ рецептор не выполняет свою функцию информирования о появлении новых молекул феромона. Если у бабочки всего имеется m рецепторов, то из условия независимости следует, что в произвольный момент времени будет свободно q рецепторов, $q = p_0 m$. Таким образом, из модели **M/M/1** следует, что эффективность восприятия феромонов снижается до минимума при приближении самца к источнику феромонов – самке. Действительно, хорошо известно, что, приближаясь к самке, самец ориентируется не по запаху, а по зрению (Richerson et al., 1976).

В случае если интенсивность потока молекул феромонов высока, а интенсивность «обслуживания» феромонов рецепторами существенно ниже, и если все рецепторы блокированы молекулами феромона, то новые молекулы уже не воспринимаются рецепторами. При таких условиях можно говорить, что взаимодействие феромона с m рецепторами описывается системой массового обслуживания **M/M/m** с потерями (Клейнрок, 1979). Тогда в стационарном решении вероятность p_m , описывающая долю времени, когда все m рецепторы блокированы, дается формулой потерь Эрланга:

$$p_m = \frac{(\lambda/\mu)^m / m!}{\sum_{k=0}^m (\lambda/\mu)^k / k!} \dots\dots\dots(1)$$

где p_k – вероятность того, что в произвольный момент в системе будет находиться k требований; предполагается, что вероятности p_k не зависят от времени.

Напротив, доля времени, когда все рецепторы свободны, дается выражением

$$p_0 = \left[\sum_{k=0}^m \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{1}{k!} \right]^{-1} \quad (2)$$

Для верификации моделей были получены оценки числа рецепторов, интенсивности потока молекул феромонов в различных условиях.

Работа поддержана РФФИ (грант 09-04-00412).

Литература

- Brady J., Gibson G., Packer M.J. Odor movement, wind direction, and the problem of host-finding by tsetse flies//Physiological Entomology.- 1989.- №14.- P. 369-380.
Elkinton J.S., Schal C., Ono T., Carde R.T. Pheromone puff trajectory and upwind flight of male gypsy moths in a forest// Physiological Entomology. 1987.- №12.- P.399-406.
Клейнрок Л. Теория массового обслуживания.- М.: Машиностроение, 1979.- 432 с.
Richerson, J. V., Brown, E. A., Cameron, E. A. Pre-mating sexual activity of gypsy moth males in small plot field tests // Can. Entomol.- 1976.- №108.- P. 439-448.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КЛИМАТА

Володин Е.М.

Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия

volodin@inm.ras.ru

Аннотация: модель климата ИВМ РАН состоит из моделей динамики атмосферы и динамики океана. Модель климата включает в себя также расчет углеродного и метанового циклов. С моделью проведены расчеты по воспроизведению современного климата, его изменений в 19-20 веках.

1. Описание модели

Модель климата ИВМ РАН состоит из двух основных блоков: модели атмосферы и модели океана. В атмосфере решаются трехмерные уравнения гидротермодинамики на сетке 2×1.5 градуса по долготе и широте и 21 уровнем по вертикали от поверхности Земли до 30 км. Шаг по времени составляет 5 минут. Модель включает в себя учет основных физических процессов, таких как атмосферная радиация, конденсация, процессы в почве и растительности. В модели океана трехмерные уравнения решаются на сетке с шагом 1×0.5 градуса по долготе и широте и 40 уровней по вертикали. Шаг по времени составляет 2 часа. Модель включает основные физические процессы: динамику и термодинамику льда, параметризацию верхнего перемешанного слоя. Стыковка моделей атмосферы и океана происходит без коррекции потоков. Модель климата включает в себя также расчет углеродного цикла, который состоит из расчета эволюции углерода растений, почвы, атмосферы и океана, а также цикла метана, где учитывается эмиссия метана из болотных экосистем и его разложение в атмосфере.

2. Воспроизведение современного климата

С моделью проведены численные эксперименты по воспроизведению современного климата. В модели в основном неплохо получаются не только среднеклиматические поля давления, температуры, скорости ветра, осадков, но и различные явления, характеризующие изменчивость атмосферной циркуляции, например Эль-Ниньо, Арктическое колебание. Модель неплохо воспроизводит экстремальные значения ежедневных и среднемесячных параметров.

3. Моделирование изменений климата

С моделью проведены численные эксперименты по воспроизведению наблюдавшихся изменений климата в 19-20 веках и моделированию вероятных будущих изменений климата в 21-22 веках. Для этого задавались эмиссии углекислого газа и метана, а также концентрации других радиационно-активных газов и аэрозолей. Модель правильно воспроизводит наблюдаемый рост концентрации CO_2 и метана в 19-20 веках, а также повышение глобальной температуры к концу 20 века примерно на 0.7 градуса. Получается также некоторое ускорение потепления в 1940-1950г.г. и замедление потепления в 1960-1970г.г. Глобальное потепление к концу 21 века согласно модели составит от 2 до 4 градусов при различных сценариях эмиссии парниковых газов. Рассматриваются оценки изменения уровня океана, площади морского льда, осадков, стока рек, продуктивности растений и количества углерода в почве. Анализируются изменения экстремальных температур и осадков.

ТЕОРЕТИКО-КАТАСТРОФИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

Володченкова Л.А., Гуц А.К.

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия
volodchenkova@cmm.univer.omsk.su, guts@omsu.ru

Аннотация: предлагается описание катастрофических изменений в экологии лесных биоценозов с помощью математической теории катастроф. Модель позволяет проводить качественное прогнозирование возможных равновесных состояний, лесных экологических катастроф и показывает к каким равновесным состоянием может переходить лесная экосистема после катастрофы.

1. Лесные экосистемы и их возможное моделирование

Лес – это элемент географического ландшафта, состоящий совокупности деревьев, занимающих доминирующее положение, кустарников, напочвенного покрова, животных и микроорганизмов, в своем развитии биологически взаимосвязанных, влияющих друг на друга и на внешнюю среду.

В этом докладе ставится задача построения математической динамической модели смены равновесных состояний лесных экосистем, с чьей помощью можно было бы проводить прогнозирование экологических катастроф, при которых лесная экосистема теряет равновесие и устремляется к новому равновесию. Построенная модель должна быть способна давать ответы на вопросы, каковы эти равновесия, когда они нарушаются, к каким равновесиям система перейдет и сколько новых равновесий может быть?

Строится математическая модель лесной экосистемы в рамках математической теории катастроф Рене Тома. Модель основывается на четырех управляющих внешних факторах, задающих среду экосистемы. Это влажность почвы w (или освещенность при иной интерпретации этого фактора), оконная динамика u (или качество атмосферного воздуха при иной интерпретации этого фактора), определяющая мозаичность фитоценоза; наличие конкуренции l (принцип конкурентного исключения) и антропогенное вмешательство v в лесную экосистему (вырубка леса, пожары и т.д.). Модель легко может быть усложнена за счет введения дополнительных управляющих внешних факторов, но при этом она становится менее наглядной и требует при ее использовании уже гораздо более серьезных математических знаний.

Состояние леса мы характеризуем скалярной функцией времени $x(t)$, зависящей от четырех управляющих внешних факторов, перечисленных выше. Функцию $x(t)$ будем называть *доброкачеством леса*. Ее значения являются интегральным показателем вида:

$$x(t) = \sum_j f_j x_j(t),$$

где f_j – вес показателя $x_j(t)$, т.е. его вклад (доля) в интегральный показатель, а сами показатели $x_j(t)$ – это употребляемые при оценке лесных экосистем такие показатели как бонитет леса, показатели численности видов, индекс разнообразия видов, частота встречаемости, коэффициент встречаемости, обилие видов, покрытие, степень доминирования, биомасса, продуктивность древостоя, санитарное состояние леса, суховершинность, влажность древесины, возраст данного фитоценоза и другие.

2. Построение модели леса в рамках теории катастроф

Степень доброкачества лесного биоценоза в момент времени t будет

определять доброкачественность леса в следующий момент времени $t + dt$. Иначе говоря, эволюция величины $x(t)$ мы описываем с помощью дифференциального уравнения.

При его построении мы исходили из того, что 1) в основе продуктивного процесса растений лежит фотосинтез. Растения под воздействием солнечной энергии, поглощая листьями из атмосферы углекислый газ и корневой системой из почвы воду, создают органическое вещество. Недостаток влаги $(-w) > 0$ является фактором, не способствующим благополучию леса; 2) учтём, что для здорового леса обязательной чертой является наличие *ярусности*. Следуя Дюрье, примем в расчет только четыре яруса. Взаимодействие ярусов должно дать вклад в доброкачественность леса вида; 3) особое значение имеет конкуренция растений в лесу; 4) действенен основной механизм смены поколений деревьев, поддерживающий специфическую мозаичность лесов и высокое биологическое разнообразие во многих типах леса, называемый “оконной динамикой”. Он связан с гибелью отдельных старых деревьев или их групп, образованием за счет этого “окон” в пологом древостое и формированием в этих окнах групп молодых деревьев.

В результате учёта этих факторов мы легко приходим к тому, что динамика доброкачественности леса описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{dx}{dt} = k_0 x^6 + lx^4 + ux^3 + vx^2 + wx \quad (1)$$

Отметим, что доброкачественность характеризуется неравенством $x > 0$; наличие конкуренции неравенством $l < 0$, действенность оконной динамики неравенством $u > 0$; вырубка лесов, пожары неравенством $v < 0$, недостаток влаги неравенством $w < 0$.

Первый член $k_0 x^6$ ($k_0 > 0$) определяется наличием только четырех ярусов леса. Учет каждого нового яруса увеличивает показатель степени x на единицу. Но при этом теряется так называемая структурная устойчивость модели. Иначе говоря, вид уравнения не сохраняется при малых возмущениях правой части уравнений 1.

Правая часть уравнения 1 $V(x, l, u, v, w) = k_0 x^6 + lx^4 + ux^3 + vx^2 + wx$ порождает при изменении факторов l, u, v, w самые различные бифуркации (катастрофы по Тому), называемые в математической теории катастроф катастрофами типа “бабочка” (Брёкер и др., 1977, Постон и др., 1980).

Модель описывает следующие экологические катастрофы: 1) катастрофы при вырубке лесов, при пожарах в случае отсутствия мозаичности, но при наличии сильной конкуренции и любой влажности; 2) катастрофы при вырубке лесов, при пожарах (нет мозаичности, нет сильной конкуренции, влажность любая); 3) катастрофы при вырубке лесов, при пожарах (есть чистая хорошая атмосфера, нет сильной конкуренции, влажность любая); 4) некатастрофические смены равновесия (в случае выбора правила Максвелла) при вымокании леса; 5) многие иные ситуации.

Литература

- Брёкер Т., Ландер Л. Дифференцируемые ростки и катастрофы.- М.: Мир, 1977.- 207 с.
Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения.- М.: Мир, 1980.- 543 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МИКРОБНО-РАСТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Воробьев Н.И.¹, Семенов А.М.², Шаталов А.А.², А.Н.С. van Bruggen³, Свиридова О.В.¹

¹ГНУ ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

vorobyov@arriam.spb.ru

²Московский государственный университет, Москва, Российская Федерация.

amsemenov@list.ru

³Emerging Pathogens Institute and Plant Pathology Department, IFAS, University of Florida, USA,

ahcvanbruggen@ufl.edu

Аннотация: создана математическая модель динамики численности бактерий *Pseudomonas fluorescens* 32 *gfp* в нише с ограниченным питательным ресурсом. Наилучшее совпадение модели и объекта было достигнуто при учете циклической смены состояний клеток: активные -> покоящиеся -> лизировавшиеся -> активные ... Дополнительно предполагалось, что часть активных клеток переходит безвозвратно в состояние глубокого анабиоза.

Почвенные микроорганизмы и растения всегда вместе боролись за выживание. Поэтому нет ничего неожиданного в том, что, начиная с некоторого момента, они выбрали и стали придерживаться более организованной и прогрессивной формы существования – микробно-растительная система. Новая форма существования представляет собой бесконечную цепь повторяющихся жизненных циклов. Каждый жизненный цикл для микроорганизмов и растений – это вначале стадия взаимной настройки на совместную деятельность, затем стадия функционирования с распределением ролей, а на заключительной стадии осуществляется организованная декомпозиция биосистемы (Воробьев, 2008). После декомпозиции возникает естественная пауза в совместной деятельности (осенне-весенний период), во время которой микроорганизмы вынуждены самостоятельно выживать в почве. Обычно они попадают в ниши с ограниченным питательным ресурсом, и там тоже наблюдаются периодические колебания численности микроорганизмов (Zelenev, 2006).

Для построения математической модели выживания бактерий в нише с ограниченным питательным ресурсом мы предположили (Vorobyov, 2009), что отдельные клетки циклически меняют свое морфологическое состояние (рисунок 1): X - активные размножающиеся клетки, Z - покоящиеся неразмножающиеся клетки, S - автоматически лизировавшиеся клетки, Z_0 - клетки в глубоком анабиозе. C_H – углерод в недоступной для бактерий форме. В модели переходы клеток из одного состояния в другое описываются схемой потоков углерода (рисунок): J_A – поток субстратного углерода, который потребляют активные клетки; J_{CX} – поток клеточного углерода, связанный с переходом активных клеток в покоящееся состояние; J_{SX} – поток субстратного углерода, который выделяют клетки при переходе из активного состояния в покоящееся состояние; J_{CZ} – поток клеточного углерода, связанный с переходом покоящихся клеток в активное состояние; J_{SZ} – поток субстратного углерода, который дополнительно потребляют клетки при переходе из покоящегося состояния в активное состояние; J_{Z0} – поток клеточного углерода, который создают активные клетки при переходе в состояние глубокого анабиоза; J_{CO_2} - поток субстратного углерода, который выделяют активные клетки в виде углекислого газа; J_L – поток субстратного углерода, связанный с аутолизом покоящихся клеток. На основании представленной схемы потоков углерода были составлена система нелинейных дифференциальных уравнений (уравнения углеродного баланса), которая решалась численным методом Рунге-Кутты в среде MathCad X3.

Реальный объект, бактерия *Pseudomonas fluorescens* 32 *gfp*, был представлен экспериментальными данными: двухмесячными динамиками численности клеток и концентрации субстратного углерода в жидкой среде в лабораторных условиях (кафедра

микробиологии МГУ). Численность клеток определялась двумя способами: прямым микроскопическим методом и посевом на питательной среде.

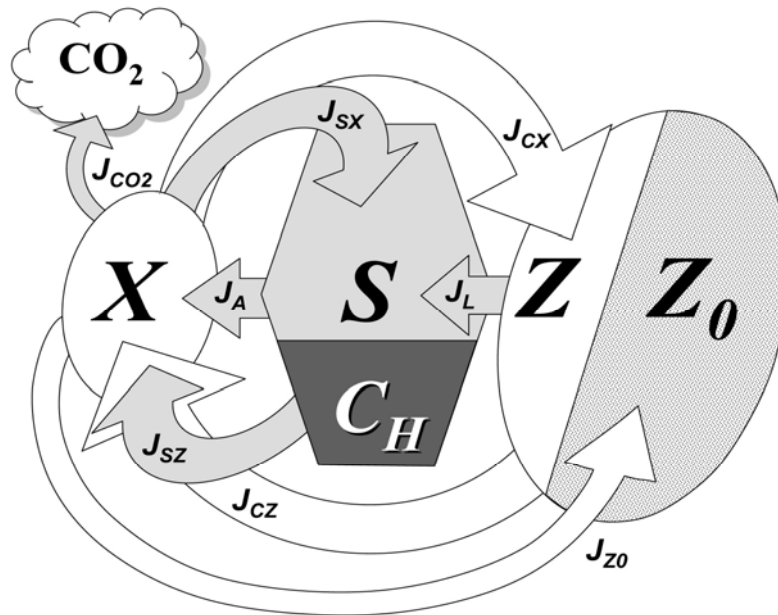


Рисунок. Схема потоков углерода в субстрат-бактериальной системе.

В результате параметрической и функциональной идентификации субстрат-бактериальной модели по экспериментальным данным удалось определить: постоянную времени размножения бактерий в фазу экспоненциального роста; параметры сингулярной точки системы, имеющей свойство неустойчивого фокуса и др.

Предполагается использовать данную модель для анализа процессов выживания микроорганизмов в почве при меняющихся экологических условиях.

Работа поддержана грантом РФФИ-09-04-00907-а.

Литература

- Воробьев Н.И., Проворов Н.А. Моделирование эволюции бобово-ризобияльного симбиоза при мультиштаммовой конкуренции бактерий за инокуляцию симбиотических ниш. Экологическая генетика.- 2008.- Том VI, вып. 4.- С. 3-11.
- Vorobyov N.I., A.M. Semenov, A.A. Shatalov and A.H.C. van Bruggen. Nonlinear modelling of self-oscillations of *Pseudomonas fluorescens* in “a substrate – bacteria” system. Proceedings of National Academy of Sciences.- 2009. (*in print*).
- Zelenev V.V., A.H.C. van Bruggen, P.A. Leffelaar, J. Bloem, A.M. Semenov. Oscillating dynamics of bacterial populations and their predators in response to fresh organic matter added to soil: The simulation model ‘BACWAVE-WEB’. Soil Biology & Biochemistry.- (2006), 38,- 1690–1711.

РАСЧЕТ ДВУХФАЗНОЙ МОДЕЛИ "ВОДА-ВОЗДУХ" ПЕРЕНОСА ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ В СЕТЕВОЙ БИБЛИОТЕКЕ ВЫЧИСЛИМЫХ МОДЕЛЕЙ

Воротынцев А.В.

Учреждение Российской академии наук Вычислительный Центр им. А.А. Дородницына
РАН, Москва, Россия

avv_alexv@mail.ru

Аннотация: обсуждается использование сценариев сетевой библиотеки Нива вычислимых моделей для расчета удаленным пользователем модели переноса влаги в активном слое почвы. Приводятся примеры расчета.

Двухфазная модель совместного капиллярного и гравитационного переноса фаз плотности ρ_α и концентрации θ_α воды ($\alpha = w$) и воздуха ($\alpha = a$) в слое почвы представлена уравнениями:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \theta_w) = -\text{div} \mathbf{j}_w - \tilde{\epsilon}; \quad \mathbf{j}_w = -K_w \nabla (\psi_{G,w} - \rho_w \mathbf{g} \mathbf{r}); \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_a \theta_a) = -\text{div} \mathbf{j}_a; \quad \mathbf{j}_a = -K_a \nabla (\psi_{G,a} - \rho_a \mathbf{g} \mathbf{r}); \quad (1.2)$$

$$\psi_{G,w} = \psi_{G,a} + \psi_{G,ms}(\theta_w); \quad \theta_w + \theta_a = \theta_p; \quad (1.3)$$

$$S_e^{1/m} = \frac{1}{1 + (\alpha \psi_{G,ms})^n}; \quad S_e \equiv \frac{\theta_w - \theta_{wr}}{\theta_{ws} - \theta_{wr}}; \quad (1.4)$$

$$K_\alpha = \rho_\alpha \mu_\alpha^{-1} k_\alpha k_{r\alpha}(S_e), \quad \alpha \in \{w, a\}; \quad (1.5)$$

$$k_{rw} = \sqrt{S_e} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2; \quad k_{ra} = \sqrt{1 - S_e} \left(1 - S_e^{1/m} \right)^{2m}; \quad (1.9)$$

$$\rho_w = \rho_{w0} e^{\beta(\psi_{G,w} - \psi_{G,w0})}; \quad \rho_a = \psi_{G,a} W / (RT); \quad (1.10)$$

В системе уравнений (1) искомыми являются термодинамические потенциалы $\psi_{G,w} = \psi_{G,w}(t, z)$, $\psi_{G,a} = \psi_{G,a}(t, z)$ воды и воздуха; $\psi_{G,ms}(\theta_w)$ - заданная функция; $\tilde{\epsilon}$, g , n , m , μ_α , k_α , ρ_{w0} , β , W , RT - константы. Система (1) решается для слоя почвы $0 \leq z \leq H_s$ толщины H_s , заполненного несколькими подслоями различного механического состава, например, песком, суглинком и песком. Особенность модели заключается в образовании подслоя, насыщенного водой.

Система (1) представляет пример сравнительно сложной модели, для которой весьма непросто создать удовлетворительную программную реализацию. Это делает такие модели практически ненаблюдаемыми, невоспроизводимыми и нерецензируемыми кругом прикладных и других специалистов без помощи их авторов. Поэтому для многих подобных вычислимых моделей, была разработана сетевая библиотека Нива, предоставляющая удобный сетевой доступ к реализациям моделей. Библиотека позволяет сохранять, рецензировать, конструировать сценарии расчета и рассчитывать в сети удаленными пользователями множество вычислимых моделей, решаемых итерациями.

Расчет выполняется с помощью сценария - графа вычислительных работ, который конструирует удаленный пользователь, перетаскивая мышкой компоненты модели из каталога компонент сервера. Граф осуществляет декомпозицию модели $M = \{D, F\}$ в ее компоненты $M_i = \{D_i, F_i\}$, где D, D_i - данные, F, F_i - функциональность. Граф проверяется анализатором с помощью грамматик. Работы графа могут не иметь модельной интерпретации.

На рисунке 1 представлен пример сконструированного графа - сценарий расчета переноса почвенной влаги в профиле 3-х слоев [Loamy sand], [Loam], [Silt loam], а также

зависящей от влажности динамики 3-х популяций микроорганизмов. Состав профиля определяется пользователем при конструировании графа. В левой части формы видно дерево узлов графа. Щелчком по узлу можно получить доступ к параметрам слоя, например, к шагу сетки, чтобы получить их описание и изменить значение. Здесь также указываются переменные, значения которых сервер будет автоматически в процессе расчета пересылать пользователю в виде графиков, рядов или слайдов. Расчет выполняется циклами итераций методом BDF – методом "формулы обратного дифференцирования" для решения жестких задач.

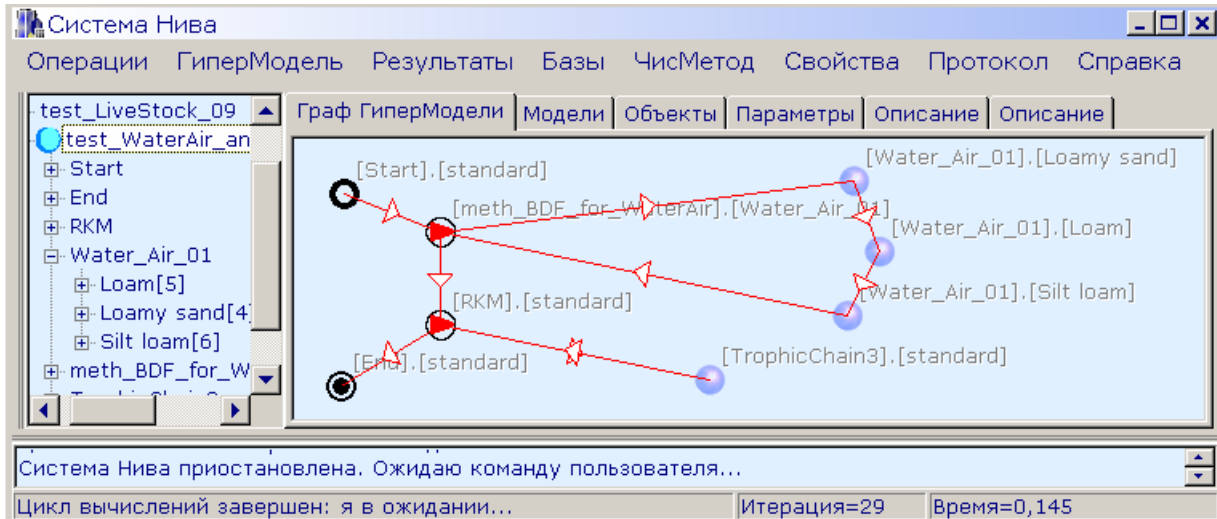


Рисунок 1. Граф сценария расчета модели (1)

Полученные от сервера результаты расчета сценария модели в каждом цикле итераций автоматически отображаются на форме пользователя, см. рисунок 2.

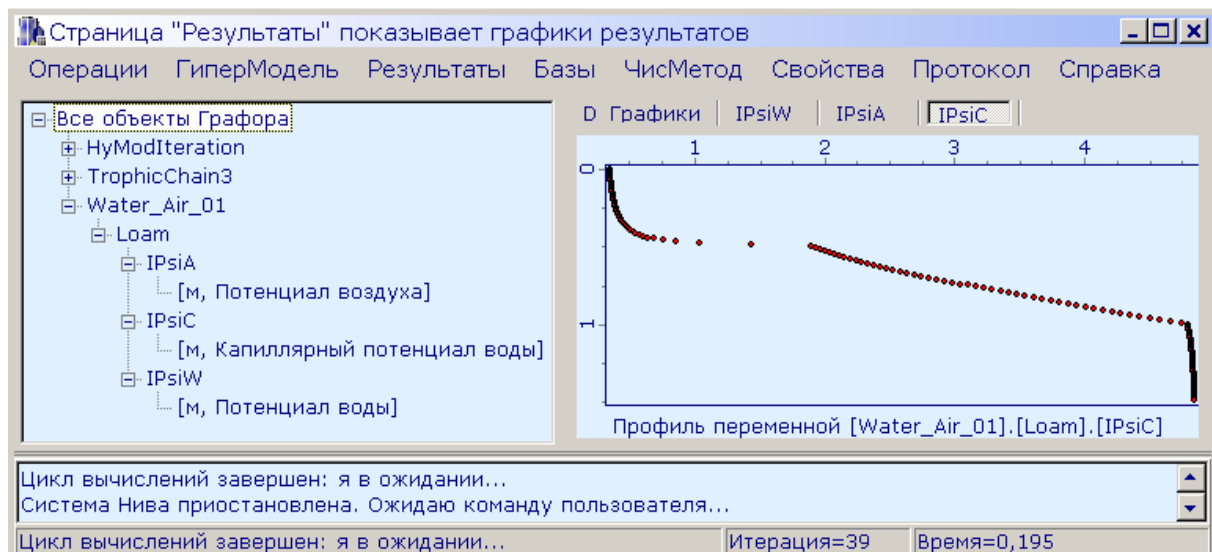


Рисунок 2. Результаты расчета сценария модели (1) на рисунке 1

Сетевая библиотека и ее графические интерфейсы поддерживают будущее сложных вычислимых моделей.

Литература

- Воротынцев А.В. К концепции сетевых информационно-вычислительных библиотек // Сборник научных трудов МФТИ «Моделирование и обработка информации».- М.: МФТИ, 2008.- С. 258-266.982.
Jones J.E., Woodward C.S. Newton-Krylov-multigrid solvers for large-scale, highly heterogeneous, variably saturated flow problems // Adv. Wat. Resour.– 2001.– № 24.– p.p. 763-774.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАК СЦЕНАРИИ В СЕТЕВОЙ БИБЛИОТЕКЕ ВЫЧИСЛИМЫХ МОДЕЛЕЙ

Воротынцев А.В.

Учреждение Российской академии наук Вычислительный Центр им. А.А.Дородницына РАН,
Москва, Россия

avv_alexv@mail.ru

Аннотация: обсуждается представление и расчет сложных экологических моделей в сетевой библиотеке вычислимых моделей с помощью сценариев - графов работ над компонентами модели практически неограниченной программной сложности. Сценарий визуально конструируется удаленным пользователем и проверяется специальными грамматиками. Библиотека дает прикладным специалистам удобный сетевой доступ к широкому множеству вычислимых, в частности экологических, моделей.

Насущна проблема создания в сети Интернет тематических сетевых библиотек-сервисов прикладных вычислимых моделей, предназначенных для расчета и использования прикладными специалистами. Библиотека-сервис – это каталогизированная тематическая коллекция вычислимых моделей и сопровождающих их текстов. Библиотека располагается на компьютере-сервере в сети Интернет и легко доступна удаленным пользователям с помощью специальной программы, размещенной на компьютере пользователя.

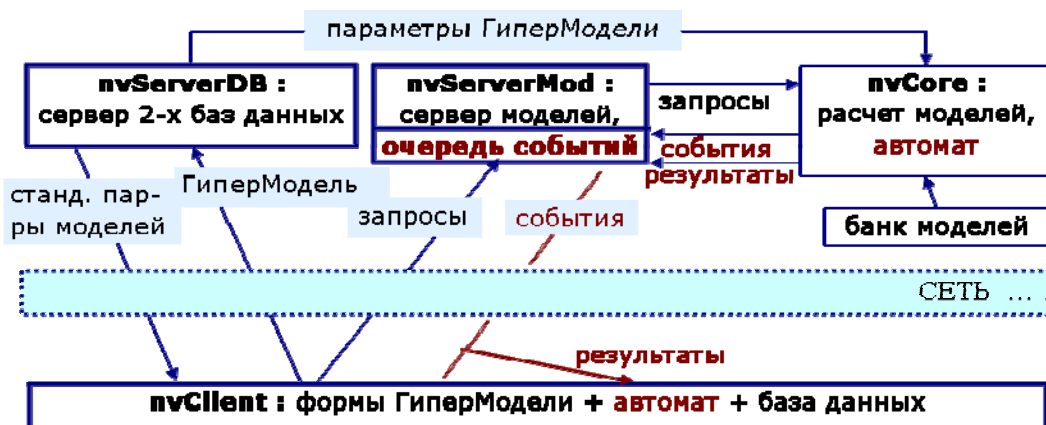


Рисунок 1. Обобщенная структура сетевой библиотеки Нива

Сетевая библиотека-сервис Нива, см. рисунок 1, включает программы nvServerDB и nvServerMod, размещенные на компьютере-сервере, а также программу nvClient на компьютере удаленного пользователя. С помощью программы nvClient пользователь получает от сервера каталог всех модельных компонент библиотеки, выбирает в нем компоненты нужной модели, перетаскивает их мышкой на свою форму, соединяет их стрелками, чтобы сконструировать граф, как, например, на рисунке 2; затем отправляет граф на сервер для проверки анализатором на соответствие грамматике, приведенной на рисунке 2 справа. Здесь name = [mod][obj] обозначает компоненту с набором данных [obj] модели [mod], называемую МодОбъектом. Знак "?" указывает, что, конструируя граф, пользователь может не включать данную компоненту, "+" указывает анализатору вставлять пропущенную компоненту. Компоненты с [obj]=[?+], ошибочно пропущенные пользователем (в этом примере n0, n4-n7), будут вставлены анализатором. Стрелками обозначены переходы; они могут быть условными. Переходы показывают последовательность вычислительных работ, совершаемых компонентами; при этом работы могут не иметь модельной интерпретации.

После проверки графа пользователь, редактируя наборы [obj], может ввести в них свои данные для моделей. Затем правильный граф рассчитывается сервером. Работой программ сервера и программы nvClient управляют автоматы путем обмена событиями.

Правильные графы МодОбъектов называются сценариями, а граф и его МодОбъекты

в исполняемом коде и с данными – ГиперМоделью. Библиотека позволяет сохранять на сервере огромное количество МодОбъектов различных моделей и сценариев (в форме подграфов-грамматик их использования), т.е. сохранять сложные модели с ассоциированной областью определения аналогично сохранению обычных функций в табличной форме. Сценарии очень полезны для корректной формулировки, для коллективной разработки и расчетов в сети сложных экологических и других моделей независимо и без обычного участия их авторов.

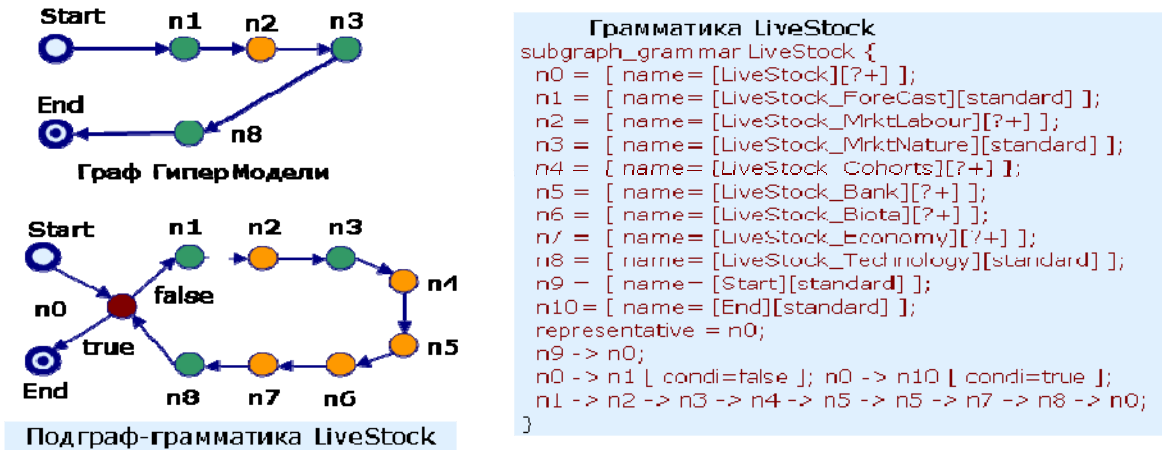


Рисунок 2. Граф ГиперМодели и грамматика эколого-экономической модели животноводства

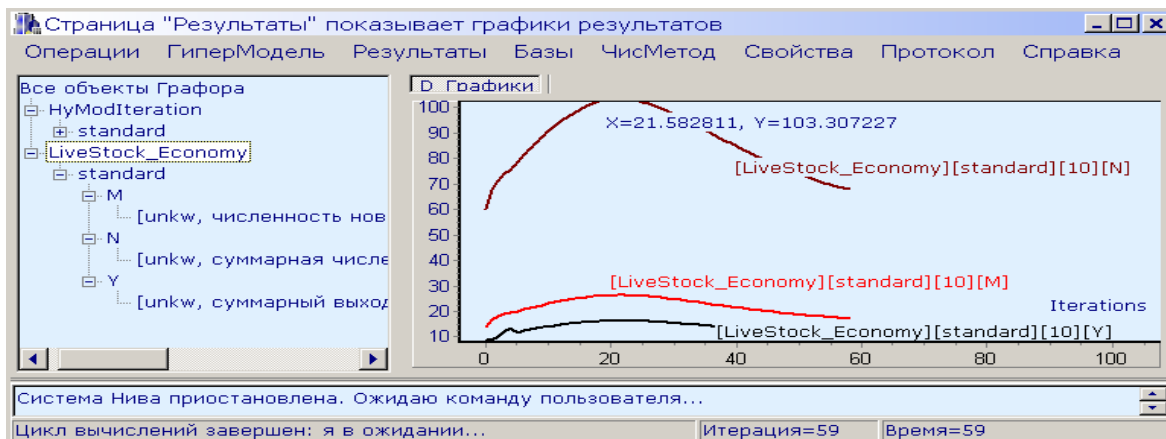


Рисунок 3. Граф работ и грамматики эколого-экономической модели животноводства

В процессе расчета модели последовательными циклами итераций на сервере удаленный пользователь получает результаты в виде графиков (см. рисунок 3), числовых рядов или слайдов. Между циклами он может изменять параметры расчета, например его шаг.

Гибкость и мощность библиотеке придает декомпозиция моделей на МодОбъекты сценариев. МодОбъекты могут быть практически произвольной программной сложности, в том числе и для системной поддержки моделей. Библиотека позволяет рассчитывать модели на основе систем в частных производных. Она легко пополняется новыми компонентами.

Сетевые библиотеки-сервисы и их графические интерфейсы обеспечивают будущее современных трудоемких вычислимых моделей, предоставляя всем легкий доступ к вычислительным и информационным услугам без передачи программного кода моделей.

Литература

- Воротынцев А.В. К концепции сетевых информационно-вычислительных библиотек. // Сборник научных трудов МФТИ «Моделирование и обработка информации».- М.: МФТИ, 2008.- С. 258-266.982.
- Таненбаум Э., ван Стеен М. Распределенные системы. Принципы и парадигмы.- СПб.: Питер, 2003.- 877с.

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ НАД ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ ТЕХНОГЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ В ВОДНОЙ И ВОЗДУШНОЙ СРЕДАХ

Вульфсон А.Н., Бородин О.О.

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Российская федерация
vulfson@ipng.ru, borodin@ipng.ru

Аннотация: на основе гидродинамической модели нестационарной тепловой конвективной струи вычислены концентрации загрязняющих примесей в окружающем воздухе и мощности поверхностных источников выбросов нагретых поллютантов. Приемлемое соответствие результатов вычислений и наблюдений позволяет использовать предложенную модель в практике научно-технических расчетов загрязнения над тепловыми источниками пассивной примеси, в том числе, сопровождающимися процессами горения.

Известно, что широкий класс задач техногенного загрязнения атмосферы, связанный с производственными процессами на промышленных объектах, сопровождается тепловыми выбросами поллютантов. Подобные явления реализуются при эксплуатации коллекторов сгорания, термических печей и теплоэлектростанций, оснащенных газомазутными горелками, при некоторых режимах разработки газоконденсатных месторождений, а также в случае возникновения различных внештатных ситуаций и аварий на производственных объектах. В условиях горения, локализованного вблизи поверхности земли, в окружающем воздухе над тепловым источником формируется конвективная циркуляция, имеющая форму плавучей струи. Аналогичная струя формируется и в водной среде в случае, когда повреждение трубопровода сопровождается пузырьковым режимом истечения газоконденсата.

Очевидно, что распространение верхней границы конвективной струи однозначно связано с мощностью источника плавучести на подстилающей поверхности. В случае интенсивного горения, когда струя окрашена поллютантом, прямые оптические наблюдения над распространением ее верхней границы позволяют определить мощность источника выброса. В случае разрыва трубопровода наблюдение над площадью пятна, распространяющегося по поверхности воды, также позволяет определить мощность источника выброса. Таким образом, исследование нестационарного развития конвективной струи представляет практический интерес, как для задач расчета распространения примесей, так и для задач дистанционного определения мощности источника выброса по оптическим наблюдениям в атмосфере и гидросфере.

В настоящей работе в рамках интегральной гидродинамической модели предложено описание распространения нестационарной плавучей струи в нейтральной среде, связанной с произвольно изменяющимся со временем потоком плавучести на подстилающей поверхности, подробнее см. (Вульфсон, 2001; Вульфсон, Бородин, 2001, 2003; Vul'fson, 2006; Vul'fson, Borodin, 2007).

Численные расчеты изолиний пассивной примеси в нестационарной конвективной струе, распространяющейся от точечного источника постоянной мощности, представлены на рис. 1, подробнее см. (Вульфсон, Бородин, 2003). Приемлемое соответствие теории и наблюдений позволяет использовать предложенную гидродинамическую модель в практике научно-технических расчетов развития нестационарных конвективных струй и термиком над тепловыми источниками, связанными с горением.

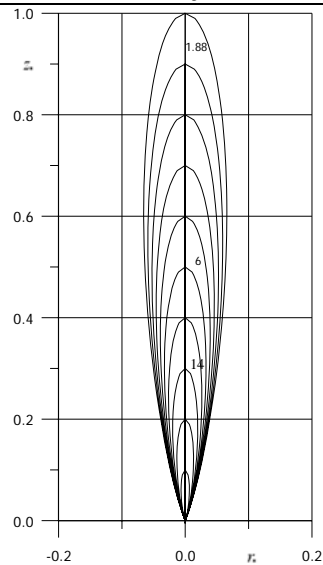


Рисунок 1. Изолинии пассивной примеси в нестационарной конвективной струе, распространяющейся от точечного источника постоянной мощности

Универсальное уравнение распространения конвективного фронта позволяет определять мощность тепловых выбросов по оптическим наблюдениям за распространением конвективной струи.

Литература

- Вульфсон А.Н. Нестационарная автомодельная конвекция в нейтральной атмосфере над точечными источниками тепла и пассивной примеси // *Метеорология и гидрология*.- 2001.- N 1.- С. 34–49.
- Вульфсон А.Н. Численно-аналитическое исследование автомодельных режимов распространения нестационарных конвективных струй и термиков в однородной среде над точечным источником тепла // *Инженерно физический журнал НАНБ*.- 2001.- Т. 74.- N 3.- С. 92–99.
- Вульфсон А.Н. О распространении верхней границы конвективной области в однородной среде при воздействии точечных, линейных и плоских источников тепла и импульса // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*.- 2001.- Т. 37.- N 3.- С. 90–101.
- Вульфсон А.Н., Бородин О.О. Автомодельные режимы распространения нестационарной высокотемпературной конвективной струи в адиабатической атмосфере // *Журнал прикладной механики и технической физики РАН*.- 2001.- Т. 42.- N 2.- С. 81–87.
- Вульфсон А.Н. Пограничный слой и автомодельные режимы нестационарной турбулентной конвекции над точечным источником тепла // *Математическое моделирование РАН*.- 2001.- Т. 13, N 10.
- Вульфсон А.Н., Бородин О.О. К интегральной теории нестационарной турбулентной струи над точечным источником тепла постоянной мощности // *Инженерно физический журнал НАНБ*.- 2003.- Т. 76, N 5.- С. 187–192.
- Vul'fson A. N. – Convective Thermals in the Atmospheric Boundary Layer // Edit. Borisov A. V., Kozlov V. V., Mamaev T. S., Sokolovskiy M. A. Proceeding of IUTAM Symposium on Hamilton Dynamics, Vortex Structures, Turbulence. August 25–30 2006. Moscow, Russia. Steklov Mathematical Institute of RAS. Springer Verlag.- 2007.- P. 147–154.
- Vul'fson A. N., Borodin O. O. – Size Distribution of Convective Thermals in an Unstable Stratified Layer // XVIII-ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 août 2007.

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ЧИСЛЕННОСТЬЮ ПОПУЛЯЦИИ ИКСОДОВЫХ КЛЕЩЕЙ В ЭКОСИСТЕМЕ

Вшивкова О.А.^{1,2}, Хлебопрос Р.Г.^{1,2}

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Международный научный центр исследований экстремальных состояний организма при Президиуме Красноярского научного центра СО РАН, Красноярск, Россия

oavshivkova@mail.ru

Аннотация: в последнее десятилетие наблюдается рост заболеваемости клещевым энцефалитом, болезнью Лайма, чаще среди жителей крупных городов. Ареалы обитания клеща расширяются: их границы все ближе к городам. Решение этой проблемы важно для таких областей знаний, как экологии, с другой стороны решение важно для охраны здоровья населения, а также связано с рисками для населения, которое контактирует с этими экосистемами.

Присутствие в экосистеме какого-либо нежелательного вида обусловлено целым рядом биотических и абиотических факторов. Возможным решением проблемы может стать поиск одного или нескольких факторов, посредством изменения которых можно управлять численностью популяции нежелательного вида, не затрагивая при этом экосистему в целом. Такой подход позволяет осуществить очень важное в социальном отношении мероприятие – целенаправленную элиминацию иксодового клеща (основного переносчика таких заболеваний, как энцефалит и боррелиоз и др.) из экосистем Евразии.

Существующие методы борьбы с эпидемиями клещевого энцефалита сводятся к профилактическим мерам, позволяющим либо избежать контакта с клещом (ношение специальной одежды, применение репеллентов), либо выработать иммунитет путем прививки. Все это не дает стопроцентной гарантии от инфицирования. Наш подход к решению этой проблемы – принципиально иной.

Один из способов контроля численности популяции иксодового клеща в экосистеме может быть основан на том, что взаимодействие теплокровных и клеща имеет узкое звено: на ранних фазах развития клеща доминирующую роль в его питании играет кровь мелких лесных грызунов.

Пусть вероятность отложить N яиц в подстилку для самки клеща равна η_1 , η_2 –вероятность превращения яйца в личинку; η_3 –вероятность перехода «личинка–имаго», $\eta_i(n)$ –вероятность перехода «нимфа–имаго», где i , в зависимости от экологических условий местности, =4 или 5 ($0 < \eta_i < 1$). Наличие и отсутствие иксодового клеща в экосистеме определяется коэффициентом размножения. Пусть x – плотность клещей в экосистеме, которую рассчитывают как количество особей клеща на единице площади в экосистеме.

Тогда коэффициент размножения клещей $K = \frac{x_{j+1}}{x_j}$, где j – номер генерации клеща.

При $x \rightarrow 0$ $K \rightarrow \alpha$ рис. 4, где α – мальтузианский параметр размножения (удельная скорость роста) клещей, зависящий от влияния различных биотических и абиотических факторов в экосистеме:

$$\alpha = \phi(n, y_1, y_2, \dots, y_v), \quad (1)$$

где n – плотность грызунов в экосистеме, y_v – биотические и абиотические компоненты экосистемы ($v=1,2,\dots$).

При заданных значениях y_v в экосистеме выражение (1) принимает вид $\alpha = \varphi(n)$.

Пусть γ – доля самок в популяции клеща. Тогда

$$\alpha(n) = N \gamma \eta_1 \eta_2 \dots \eta_i, \quad (2)$$

где N – объем кладки, η_1 – вероятность того, что самка отложит яйца в подстилку, η_2 , η_3 , η_4 – вероятности переходов яйцо-личинка, личинка-нимфа, нимфа-имаго, соответственно.

В силу (2) зависимость мальтузианского параметра α от плотности мышевидных грызунов n можно выразить кривыми, представленными на рисунке 1.

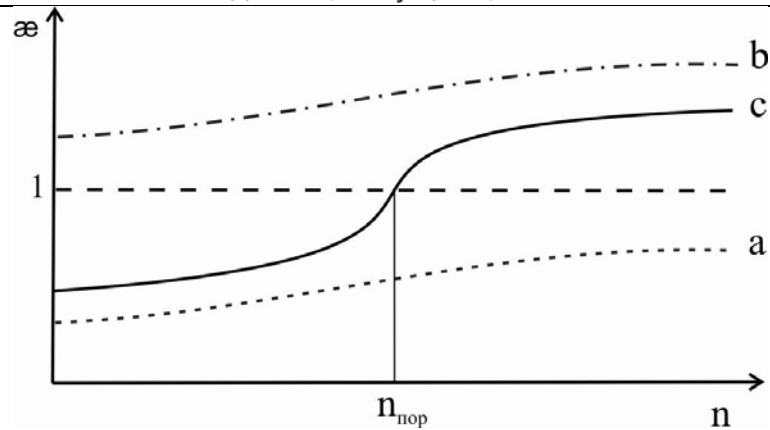


Рисунок 1. Зависимость величины мальтузианского параметра популяции клещей α от плотности мышевидных грызунов в экосистеме. По оси абсцисс – плотность популяции грызунов; по оси ординат – мальтузианский параметр

Из рисунка 1 следует, что если мальтузианский параметр популяции клеща представлен кривой a , то использовать предлагаемый метод нет необходимости, т.к. клещ в этих экосистемах отсутствует; если решение можно получить в виде кривой b , то способ элиминации клеща путем регулирования численности мышей осуществить невозможно; кривая c иллюстрирует случай, когда наш подход приведет к положительному результату – практически полному исчезновению популяции клеща: достаточно перевести плотность мышей в экосистеме в область левее $n_{\text{пор}}$. Если $n < n_{\text{пор}}$, тогда $\alpha(n) < 1$ – и клещ из экосистемы элиминирован.

Другим способом контроля численности популяции иксодового клеща может стать поиск и использование их потенциальных врагов, например, увеличение численности муравьев, чьи особенности питания и хищническая активность оказывают на всю экосистему существенное влияние. Благодаря этому уничтожается большое количество вредных насекомых. На насекомых многочисленных видов муравьи «охотятся» целенаправленно, а нападение на представителей других видов определяется вероятностью встречи муравья и «жертвы». «Жертвой» муравья-фуражира может стать и иксодовый клещ на начальных стадиях развития (яйцо, личинка, нимфа).

Пусть $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – соответственно, доли яиц, личинок, нимф, съеденных муравьями ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 < 1$). Тогда при заданных значениях u_v и n , α' – мальтузианский параметр размножения клеща в условиях влияния муравьев:

$$\alpha' = \alpha(n, m) = N\gamma\eta_1(1 - \alpha_1 m)\eta_2(1 - \alpha_2 m)\eta_3(1 - \alpha_3 m)\dots \eta_i, \quad (3)$$

причем $\alpha' < \alpha$.

Таким образом, увеличивая численность муравьев в экосистеме, можно снижать мальтузианский параметр размножения иксодовых клещей, если этот параметр становится меньше 1 – значит, популяция клещей элиминируется из экосистемы.

Соответственно, исходя из условий каждой конкретной экосистемы (плотности популяции муравьев, плотности популяции грызунов, биотических и абиотических компонентов экосистемы), можно подбирать такие значения численностей популяций грызунов и/или муравьев, при которых численность популяции иксодовых клещей может стать минимальной.

СЕКЦИОННАЯ СТРУКТУРА И ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БИОМАССЫ ДЕРЕВА

Галицкий В.В.

Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

galvv@yandex.ru

Аннотация: модель дерева, на макушке которого ритмически появляются виртуальные деревья, вложенные друг в друга и порождающие секции – элемент структуры реального дерева. Динамика биомассы секции отличается от динамики виртуального дерева. Анализ показывает наблюдаемое в природе акропетальное оголение ствола и возможность получения различных вертикальных распределений биомассы, которые могут ассоциироваться с биологическими видами деревьев.

В работах (Галицкий, 2006; 2008) предложен способ развертывания динамики биомассы дерева в упорядоченную по высоте систему динамик составляющих его секций. В обзоре (Bartelemy, Caraglio, 2007) среди других секция как элемент морфологической структуры дерева не упоминается. Каждая секция ассоциируется с общей биомассой одновозрастных ветвей (включая ветви второго и следующего порядка, – ярус ветвей) на годичном междоузлии ствола дерева (годичный побег главной оси). Термин биомасса определяет физиологически активную и фотосинтезирующую часть полной массы (яруса ветвей) дерева.

Используя как пример ель (рисунок 1), представим образ виртуального i -дерева, образуемого ритмически с шагом Δ_i на макушке реального дерева ($i=0,1,2,\dots$). Тогда порождаемая двумя смежными виртуальными деревьями с биомассами B_i и B_{i+1} биомасса i -секции b_i в момент t есть

$$b_i(t) = B_i(t) - B_{i+1}(t - \Delta_i). \quad (1)$$

Легко проверить, что сумма $b_i(t)$ по всем секциям дает $B_0(t)=B(t)$.

И.А. Полетаев (1966) описал простую модель роста дерева в высоту

$$H(t) = H_m \operatorname{th}(t / A_2), \quad (2)$$

которой можно сопоставить аллометрическое выражение для динамики биомассы дерева

$$B(t) = B_m \operatorname{th}^\mu(t / A_1). \quad (3)$$

Функции типа (2) и (3) являются монотонными и ограниченными, что позволяет из (1) получить некоторые следствия.

Во-первых, динамика биомассы секции имеет колоколообразную форму (рисунок 2, штриховые), т.е. качественно отличается от динамики дерева. При одинаковых и сдвинутых на Δ_i функциях $B_i(t)$ это приводит к акропетальному оголению ствола дерева, которое обычно наблюдается в природе. Такое оголение ствола с учетом формулы (2) дает с возрастом распределение биомассы дерева по высоте в форме зонтика (рисунок 3), примеры которого имеются в природе (деревья в саванне). Как известно, биомасса является источником физиологически пассивной фитомассы и связана с ней интегральным выражением и, как следствие этого и выражения (3), динамику фитомассы дерева можно с большой уверенностью полагать имеющей форму монотонно растущей функции.

Наблюдения форм деревьев многих лиственных (и не только) видов деревьев зрелого возраста показывают, что акропетальное оголение стебля значительно замедляется, если не заканчивается на некоторой высоте, т.е. динамика биомассы секций с большим номером i , сохраняя форму "колокола", не обязательно стремится к нулю с увеличением возраста секции (рисунок 2, сплошные). Для этого достаточно в (3) для виртуального i -дерева ввести зависимость $B_{m,i}(H_i)$

$$B_i(T, H_i) = B_{m,i}(H_i) \operatorname{th}^\mu(T / A_1) = B_m f_0(x), \quad x = H_i / H_m, \quad (4)$$

где $f_0(x)$ невозрастающая функция, $f_0(0)=1$, $f_0(1)=0$. Выбирая различные имитационные функции $f_0(x)$ можно, кроме того, также получать распределения биомассы дерева по высоте, которые могут ассоциироваться с различными биоморфами и видами деревьев. Разнообразие

видов распределения биомассы по высоте может быть увеличено варьированием соотношения между временными масштабами A_1 и A_2 в (2) и (3) (Галицкий, 2008).

На рисунке 4 для некоторых функций $f_0(x)$ (Галицкий, 2008) приведены примеры распределения биомассы по высоте дерева, которые ассоциируются с профилями реальных деревьев (ель, липа, пальма, Серебрякова и др. 2006), представленными на рисунке 5.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант №06-04-49366.

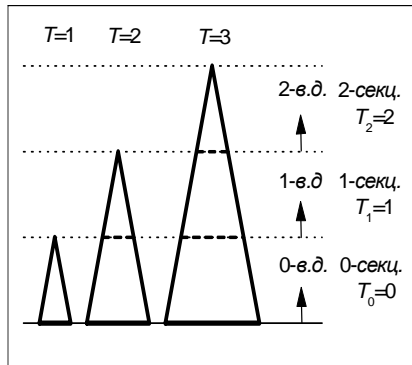


Рисунок 1

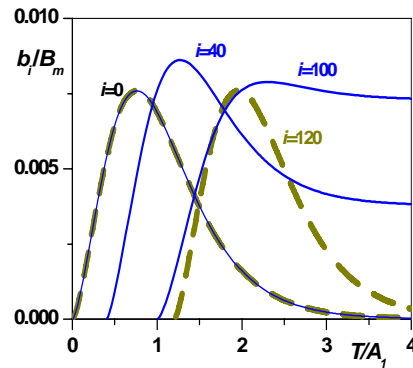


Рисунок 2

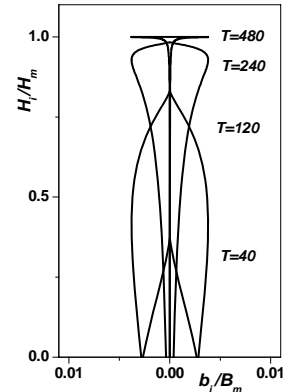


Рисунок 3

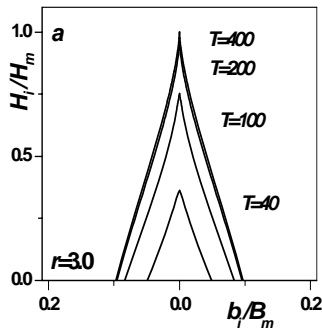


Рисунок 4а



Рисунок 5а

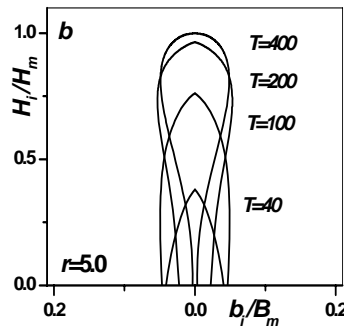


Рисунок 4б



Рисунок 5б

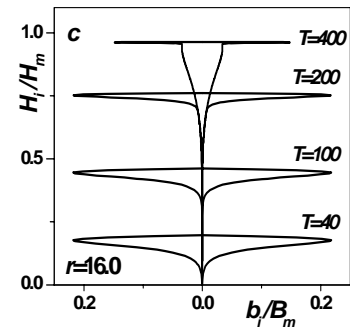


Рисунок 4с



Рисунок 5с

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 // Исследовано в России. 2008, №3, 594-605. <http://zhurnal.apelarn.ru/articles/2008/053.pdf>
- Полетаев И.А. О математических моделях биогеоэкологических процессов // Проблемы кибернетики. Вып.16.- М.: Наука, 1966.- С. 171-190.
- Серебрякова Т.И., Воронин Н.С., Еленевский А.Г., Батыгина Т.Б., Шорина Н.И., Савиных Н.П. Ботаника с основами фитоценологии: Анатомия и морфология растений.- М.: Академкнига. 2006.- 543 с.
- Barthélémy D., Caraglio Y. Plant Architecture: A Dynamic, Multilevel and Comprehensive Approach to Plant Form, Structure and Ontogeny // Ann. Bot. 2007.V. 99. P. 375-407.

СИНХРОННАЯ КВАЗИТРЕХМЕРНАЯ (q3D) СЕКЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ БИОМАССЫ СООБЩЕСТВА ДЕРЕВЬЕВ

Галицкий В.В.

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

Аннотация: в q3D-модели сообщества дереву сопоставлен полигон Вороного, учитываются секционная и азимутальная (секторы) структуры. Биомасса сектора описывается модифицированным уравнением из 2D-модели растения. Динамика биомассы q3D-дерева S-образна при любом полигоне. В описываемой модели сообщества рост деревьев в высоту синхронен. Используется эмпирический критерий отмирания дерева. Полигон отмершего дерева делится между его соседями.

В работе (Galitskii, 2003) представлены двумерные модели растения и сообщества растений и некоторые результаты их анализа. Элементы этих моделей вместе со способом разложения динамики биомассы дерева в пространственную систему динамик секций (Галицкий, 2008) используются в секционных q3D-моделях динамики биомассы дерева и сообщества деревьев (Галицкий, 2006а; 2006б).

q3D-дерево в модели сообщества растет на полигоне Вороного. Для учета азимутальной структуры дерева полигон и секции разбиваются на n_s секторов (рисунок 1). Биомасса j -сектора i -секции $b_{i,j}$ описывается балансовым уравнением (аналогично 2D-модели дерева, Galitskii, 2003; Галицкий, 2006а)

$$db_{ij} / dt = \kappa(t - t_i)(b_{i,j} / \tau(B, t) + f_1(b_{i,j} / b_{F,ij}))db_{F,ij} / dt - b_{i,j} / \tau(B, t), \quad (1)$$

где

$$\kappa(t - t_i) = \min(1, a_{i,j}(t - t_i) / a_{F,ij}(t - t_i)), \quad (2)$$

$$\tau^{-1}(B, t) = (b_{i,j} \alpha B^{k-1} + \tau_M^{-1}) / (1 + c_G(1 - \kappa(t - t_i))), \quad (3)$$

$$f_1(b_{i,j} / b_{F,ij}) = (b_{i,j} / b_{F,ij})^y / (1 + c_G(1 - \kappa(t - t_i))), \quad (4)$$

$a_{i,j}$ и $a_{F,ij}$ – доступная и необходимая площади роста для j -сектора, τ_M – интенсивность образования фитомассы, биомасса i -секции $b_i = \sum_j b_{i,j}$, биомасса всего дерева $B = \sum_i b_i$, t_i – момент появления i -секции ($t_{i+1} = t_i + \Delta t$), $i=0, 1, \dots, j=1, \dots, n_s$.

На рисунке 2 представлены полигон (штриховая) и динамика годографа биомассы 0-секции. Форма годографа изменяется в соответствии с возрастом секции и размером и формой полигона.

На рисунке 3 показана динамика биомассы дерева B для различных значений k_s масштаба линейных размеров полигона. В случае двумерной модели дерева (Galitskii, 2003) недостаток площади приводит к непосредственной и неминуемой гибели модельного дерева. В трехмерном случае отмирают нижние секции его биомассы, но прирастают верхние, вновь появляющиеся. Если высота дерева не играет никакой роли в его росте, то биомасса модельного дерева выходит на стационарный уровень и дерево не отмирает при любом малом полигоне. Этот эффект т.н. роста “в цилиндре” показывает, что отмирание деревьев в сообществе происходит не непосредственно из-за недостатка площади для роста, а из-за вызванного этим недостатком замедления роста в высоту и дополнительного и постоянного уменьшения получаемой деревом энергии, если соседние деревья имеют возможность расти быстрее. Таким образом, для описания и изучения механизма конкуренции в сообществе необходимо не только использование трехмерной модели, но и адекватной зависимости роста высоты дерева от площади роста, которая обеспечила бы асинхронный рост деревьев в сообществе в отличие от синхронного, реализованного в данной модели сообщества.

На рисунке 4 для двух моментов времени приведены состояния мозаики Вороного и системы годографов биомасс деревьев в одновозрастном однородном сообществе, каждое из

которых описывается моделью (1)-(4). Как критерий отмирания дерева использовалось $B_i \leq \varepsilon_M B_{n,i}$, где B_i – биомасса i -того дерева, $B_{n,i}$ – величина средней биомассы деревьев, соседних по полигону к отмирающему фокальному i -тому дереву, $\varepsilon_M \leq 1$. Подобные соотношения используются в качестве эмпирических индексов конкуренции (Weigelt, Jolliffe, 2003). Очевиден “граничный эффект” и особенности отмирания внутренних деревьев, связанные с однородностью сообщества и выбранным критерием отмирания. Модель может быть использована для анализа и “настройки” таких критериев.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант №06-04-49366.

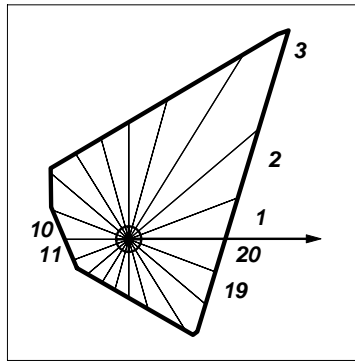


Рисунок 1

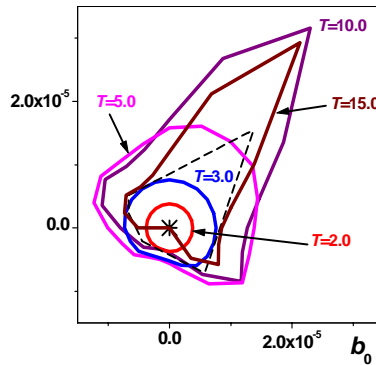


Рисунок 2

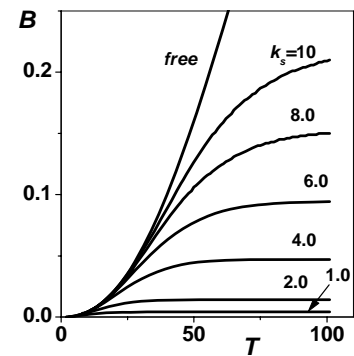


Рисунок 3

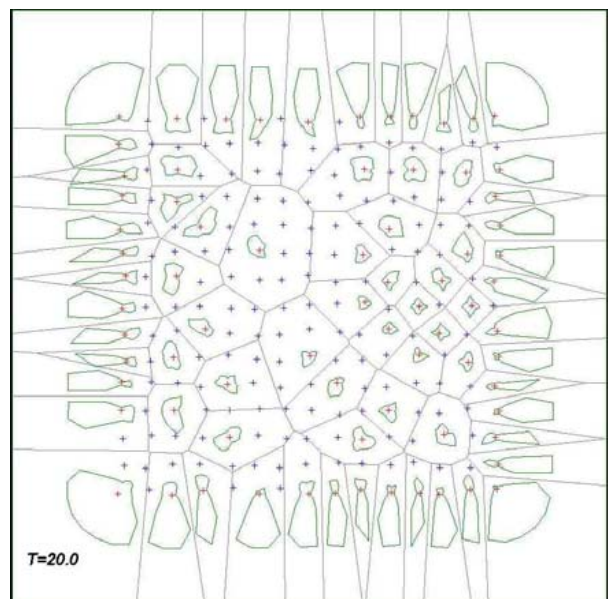
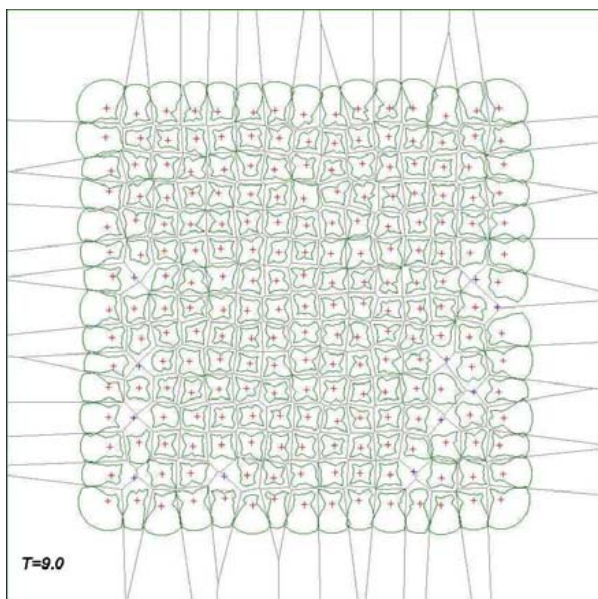


Рисунок 4

Литература

- Галицкий В.В. Несвободный рост дерева. q3D-модель // Исследовано в России, 2006а, №019, 191-199. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/019.pdf>
- Галицкий В.В. Синхронная квазитрехмерная секционная модель динамики биомассы сообщества деревьев // Исследовано в России, 2006б, №158, 1464-1471. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/158.pdf>
- Галицкий В.В. Секционная структура дерева. Модельный анализ вертикального распределения биомассы // Исследовано в России, 2008, №053, 594-605. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2008/053.pdf>
- Galitskii V.V. The 2D Modeling of Tree Community: From “Microscopic” Description to Macroscopic Behavior // Forest Ecology and Management. 2003, V. 183 (1-3) 95-111.
- Weigelt, A., Jolliffe P. Indices of plant competition // J. Ecol. 2003, V.91, 707-720.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ЗОНЕ АЭРАЦИИ С УЧЕТОМ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА И ИСПАРЕНИЯ

Гишкелюк И.А., Кундас С.П.

*Международный государственный экологический университет имени А.Д. Сахарова,
Минск, Беларусь*
gishkeluk@iseu.by

Аннотация: предложена математическая модель и проведены численные исследования переноса загрязняющих веществ в зоне аэрации, с учетом изменения влагосодержания среды за счет процессов испарения и переконденсации водяного пара.

Введение

В настоящее время решение о размещении предприятия с вредными выбросами или захоронении отходов принимается с учетом влияния этих объектов на окружающую среду. Как правило, оценка этого влияния сводится к расчету распространения загрязняющего вещества от заданного объекта и анализу возможности его попадания в грунтовые воды в концентрациях превышающих допустимые.

С этой целью разработаны специальные системы математического моделирования движения влаги в насыщенных и ненасыщенных средах и переноса загрязняющих веществ: Groundwater Modelling System, FeFlow, HYDRUS и т. п. В тоже время математические модели, реализованные в этих программных средствах, базируются на использовании уравнений конвективной диффузии и движения влаги, в которых не учитываются фазовые переходы и поток водяного пара в среде (Bear, 1991), (Simunek, 2005). Однако изменение влагосодержания среды, которое существенно влияет на перенос загрязняющих веществ, может быть вызвано не только капиллярным движением влаги, но и переконденсацией водяного пара. Поэтому использование такого подхода может приводить к значительным погрешностям при расчете конвективной диффузии загрязняющих веществ в неизотермических условиях. Кроме этого в случае использования уравнений влагопереноса без учета фазовых переходов и потока водяного пара не возможно корректно описать испарение влаги с поверхности среды, так как в эти уравнения не входит давление водяного пара.

В связи с этим в настоящей работе авторами ставилась цель создание математической модели переноса загрязняющих веществ в зоне аэрации с учетом неизотермического влагопереноса и испарения водяного пара с поверхности среды.

1. Математическая модель переноса загрязняющих веществ

Разработанная математическая модель основана на уравнениях конвективной диффузии (Кундас, 2007):

$$\theta_{\text{liq}} \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial \theta_{\text{liq}}}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial a}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta_{\text{liq}} \mathbf{D} \nabla C - v_{\text{liq}} C) - F, \quad (1)$$

и кинетики сорбции:

$$\rho_b \frac{\partial a}{\partial t} = \beta \rho_b (K_d C - a), \quad (2)$$

где θ_{liq} – объемное влагосодержание среды, м³/м³; C – объемная концентрация загрязняющего вещества в жидкой фазе, кг/м³; t – время, с; ρ_b – плотность твердой фазы пористой среды, кг/м³; a – концентрация адсорбированного средой загрязняющего вещества, кг/кг; \mathbf{D} – тензор гидродинамической дисперсии, м²/с; v_{liq} – скорость движения жидкости, м/с; F – функция стока и истока загрязняющего вещества в среде за счет процессов

химического и радиоактивного превращения, поглощения вещества растениями и т. п., $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; β – скорость сорбции, $1/\text{с}$; K_d – коэффициент распределения между загрязняющим веществом в жидкой и твердой фазе, $\text{м}^3/\text{кг}$.

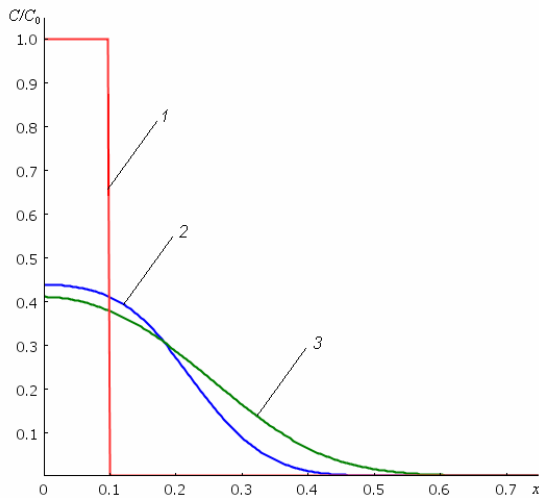


Рисунок 1. Результаты моделирования распределения переноса загрязняющих веществ в зоне аэрации: 1 – начальное распределение, 2 – через 5 дней, 3 – через 10 дней

Как видно из уравнения (1) процесс переноса загрязняющих веществ в зоне аэрации явным образом зависит от ее влагосодержания θ_{liq} , и скорости движения в ней влаги v_{liq} . При этом в естественных условиях в зоне аэрации происходит периодическое изменение температурного и влажностного режимов, которые сложным образом влияют на влагосодержание и скорость движения влаги, что затрудняет их экспериментальное определение. В связи с этим авторами предлагается значения влагосодержание и скорости движения влаги определять с помощью модели неизоэтермического влагопереноса, базирующейся на уравнениях двухфазной фильтрации и теплопроводности (Кундас, 2007). При этом в качестве замыкающих соотношений используются изотермы сорбции-десорбции влаги капиллярно-пористой средой при различных температурах и термодинамические уравнения Кельвина и Клапейрона – Клаузиуса.

2. Результаты моделирования и их анализ

С помощью разработанной математической модели численно исследовалось влияние неизоэтермического влагопереноса на распределение загрязняющих веществ в почве (рисунок 1). С этой целью рассматривалось два случая переноса загрязняющего вещества: при выпадении дождевых осадков на поверхность почвы и испарении влаги с поверхности почвы. Результаты моделирования показали, что во втором случае на перенос загрязняющих веществ в зоне аэрации существенное влияние оказывает переохлаждение водяного пара и термокапиллярные течения. В тоже время, в существующих моделях переноса загрязняющих веществ (Bear, 1991), (Simunek, 2005), при определении скорости движения жидкости не учитываются эти процессы, что может привести к недостоверным результатам прогнозирования распространения загрязняющего вещества.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Всемирной федерацией ученых (World Federation of Scientists).

Литература

- Bear J, Bachmat Y., Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media.– Dordrecht: Kluwer, 1991.– 584 p.
- Simunek J., van Genuchten M. Th., and Sejna M. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 3.0. // Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, 2005.– 250 p.
- Кундас С.П. Гринчик Н.Н., Гишкелюк И.А., Адамович А.Л. Моделирование процессов термовлагопереноса в капиллярно-пористых средах.– Минск: ИТМО НАНБ, 2007.– 292 с.

«СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ» (Ab4) ЭМИССИИ CH₄ ИЗ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Глаголев М.В.¹, Максюттов Ш.Ш.²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
m_glagolev@mail.ru

²National Institute for Environmental Studies, Цукуба, Япония
shamil@nies.go.jp

Аннотация: «Стандартная модель» представляет собой совокупность периодов эмиссии, картографической основы и плотностей распределения вероятностей величин потоков из типичных экосистем. На основе модели Ab4 региональная эмиссия CH₄ из болот Западной Сибири оценивается величиной 2.9 ± 1.4 TgC-CH₄/год.

Введение

В связи с тем, что метан сильно влияет на фотохимию атмосферы и является важным «парниковым» газом, динамика его концентрации в атмосфере учитывается в современных климатических моделях - см., например, (Крупчатников и Крылова, 2004) и ссылки там. Очевидно, что в такие модели обязательно должен входить в той или иной форме член, описывающий поверхностный источник метана. Среди всех возможных источников метана главную роль играют болота (Заварзин, 1995). Особый интерес в этом отношении представляют болотные экосистемы России (занимающие вместе с заболоченными мелкоотторфованными землями примерно 21.6% ее территории (Вомперский с соавт., 2005). Однако невозможно провести измерения в каждой географической точке, поэтому особое значение приобретают вычислительные подходы, позволяющие экстраполировать величины потоков на неисследованные территории.

Математическое моделирование эмиссии CH₄ из почв развивалось, в основном, в традиционном ключе использования сосредоточенных или распределенных систем дифференциальных уравнений. Конкретно для Западной Сибири первый подход нашел отражение в (Glagolev, 1998), а второй – в (Крупчатников и Крылова, 2004). Однако подобные модели содержат значительное число параметров, определить которые в региональном масштабе с достаточной степенью подробности пока не представляется возможным (хотя при описании отдельных хорошо изученных экосистем были получены неплохие результаты). Задача данной работы состояла в обобщении результатов мониторинга региональной эмиссии метана с территории Западной Сибири в рамках иного подхода, называемого нами «стандартной моделью» (далее - CM).

Региональная «стандартная модель» эмиссии CH₄

На основании экспериментальных данных для каждой типичной экосистемы всех природных зон Западной Сибири методами Розенблатта-Парзена и гистограмм на равновероятных интервалах (конкретные алгоритмы и дальнейшие ссылки см. в (Глаголев и Сабреков, 2008) были построены эмпирические плотности распределения вероятностей удельных потоков метана. Квартили этих распределений приведены в Таблице 1. В региональной CM Ab4 использовали электронную картографическую основу (Peregon et al., 2008). Третья составляющая CM Ab4 – характерные периоды эмиссии CH₄ в различных природных зонах (сут.): тундра – 103, лесотундра – 120, северная тайга – 138, средняя тайга – 166, южная тайга – 172, подтайга – 193, лесостепь - 201. Для возможности моделирования сезонного хода эмиссии в модели принимается линейная зависимость эмиссии от температуры предыдущего месяца, что позволяет, в частности, описать явление температурного гистерезиса эмиссии, отмеченное в (Глаголев, 2002).

Методом Монте-Карло на основе CM Ab4 региональный поток CH₄ оценен величиной 2.9 ± 1.4 TgC-CH₄/год. Анализ чувствительности и неопределенности показал, что наибольшую неопределенность в эту оценку вносят озера тундры и северной тайги, а также эвтрофные болота лесостепи, верховые болота средней тайги и приозерные сплавины в

южной тайге. Все эти экосистемы в настоящее время, фактически, должны считаться крайне плохо изученными в плане эмиссии CH_4 .

Может показаться, что СМ дает лишь современный «срез» эмиссии метана и, казалось бы, не позволяет составить прогноз эмиссии в условиях изменения климата. На самом деле это не принципиальное, а, скорее, техническое ограничение, которое в настоящее время может быть снято. Действительно, сейчас появляются работы (например, (Golubyatnikov, 2008), посвященные моделированию смещения природных зон при возможном изменении климата. Таким образом, предсказание эмиссии CH_4 на основе СМ станет возможным при ее соединении с соответствующими биоклиматическими моделями.

Таблица 2 – Типичные величины потоков CH_4 ($\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$) в экосистемах Западной Сибири для летне-осеннего периода (в числителе – медиана, в знаменателе – 1-я и 3-я квартили).

Болотный ландшафт	Природная зона или подзона						
	Тундра	Лесотундра	Тайга			Подтайга	Лесостепь
			Северная	Средняя	Южная		
Мерзлые бугры	$\frac{-0.03}{-0.12,0.01}$	$\frac{0.20}{0.03,0.28}$	$\frac{0.00}{-0.05,0.01}$	Мерзлые бугры в средней и южной тайге, а также в подтайге и лесостепи отсутствуют			
Рямы	Рямы и гряды в тундре и лесотундре отсутствуют		$\frac{0.01}{-0.03,0.44}$	$\frac{0.02}{-0.02,0.27}$	$\frac{1.23}{0.27,2.92}$		$\frac{0.26}{-0.11,0.42}$
Гряды			$\frac{0.45}{0.23,0.65}$	$\frac{1.69}{0.94,2.72}$			
Мочажинны и гальи	верховые	$\frac{0.06}{0.03,0.42}$	$\frac{1.12}{0.77,1.37}$	$\frac{0.34}{0.12,1.53}$	$\frac{0.80}{0.15,1.90}$	$\frac{2.98}{1.80,4.30}$	$\frac{2.68}{1.88,3.46}$
	переходные	$\frac{0.47}{0.07,1.82}$	$\frac{1.28}{0.70,2.52}$	$\frac{0.68}{0.13,4.64}$	$\frac{0.91}{0.21,2.10}$	$\frac{4.00}{2.48,7.50}$	$\frac{8.53}{2.47,16.3}$
	низинные			$\frac{1.97}{0.82,2.47}$			
Приозерные сплавины	$\frac{4.81}{2.73,7.07}$			$\frac{1.64}{0.55, 13.44}$			
Внутриболотные озера	$\frac{0.55}{0.26,1.36}$		$\frac{1.40}{0.14,2.74}$	$\frac{0.33}{0.10,0.96}$	$\frac{5.30}{0.27,23.66}$		

Литература

- Вомперский С.Э., Сиринов А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. географ.- 2005.- №5.- С. 21-33.
- Глаголев М.В. // «Биология – наука XXI века»: 6-я Пущинская школа-конференция молодых учёных (Пущино, 20-24 мая 2002 г.): Сб. тезисов. Том 3. – Тула: Изд-во гос. пед. ун-та им. Л.Н. Толстого, 2002. – с. 97-98.
- Глаголев М.В., Сабреков А.Ф. // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сб. научных трудов каф. ЮНЕСКО ЮГУ. - 2008. – Вып. 1. – Новосибирск: НГУ. – с. 55-83
- Заварзин Г.А. Микробный цикл метана в холодных условиях // Природа.- 1995.- №6.– С. 3-14.
- Крупчатников В.Н., Крылова А.И. Моделирование эмиссии метана от природных избыточно увлажненных почв и гидрологии поверхности с учетом топографии // География и природные ресурсы.– Спец. вып.- 2004. - С. 272-276.
- Glagolev M.V. Modeling of Production, Oxidation and Transportation Processes of Methane // Global Environment Research Fund: Eco-Frontier Fellowship (EFF) in 1997.- Tokyo: Environment Agency. Global Environment Department. Research & Information Office.- 1998.- P. 79-111.
- Golubyatnikov L.L. // Международная конференция «ENVIROMIS-2008» (Томск, 28 июня - 5 июля 2008 г.): Тезисы докладов.- Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2008.- С. 90.
- Peregon A., Maksyutov S., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N. Map-based inventory of wetland biomass and net primary production in western Siberia // J. of Geophys. Res.- 2008.– V. 113.- doi:10.1029/2007JG000441.

ОЦЕНКИ ОТКЛИКА РАСТИТЕЛЬНОСТИ РОССИИ НА ОЖИДАЕМЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Голубятников Л.Л.

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

Аннотация: Проанализированы возможные изменения фитоценозов равнинной территории России при потеплении в XXI в. согласно климатической модели ИФА РАН. Получены оценки изменения продуктивности растительного покрова и отклика ареалов фитоценозов на возможные изменения климата.

Пространственная неоднородность изменений климата предопределяет сложную и неоднозначную реакцию на эти изменения растительного покрова. Изменение климатических характеристик может вызвать серьезные изменения в структуре и видовом составе растительного покрова, что может привести к сокращению и фрагментации ареалов многих видов растений с возникновением новых условий существования для отдельных растительных сообществ.

Данная работа посвящена анализу отклика растительного покрова России на ожидаемые в XXI в. климатические изменения. Получены оценки возможных изменений значений первичной биологической продукции растительного покрова и ареалов зональных фитоценозов рассматриваемой территории при вероятных изменениях климата.

Для оценки отклика растительного покрова на ожидаемые в XXI в. климатические изменения использованы результаты расчетов по климатической модели промежуточной степени сложности КМ ИФА РАН, разработанной в Институте физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН. Расчеты выполнены для антропогенного потепления климата, соответствующего изменению концентрации углекислого газа в атмосфере по сценариям SRES A2 (агрессивный сценарий) и SRES B1 (умеренный сценарий).

Для определения отклика первичной продукции растительного покрова на климатические изменения использовалась модель, разработанная в Лаборатории математической экологии ИФА РАН. В основе этой модели лежит биоклиматическая схема, которая устанавливает зависимость значений биологической продуктивности растительных сообществ от величин радиационного баланса поверхности и суммарного испарения.

По причине отсутствия однозначности в соотношении "климатические параметры – ареал фитоценоза" оценить возможные изменения ареалов фитоценозов при потеплении климата на основе прогноза изменения значений климатических характеристик достаточно проблематично. Для решения поставленной задачи предложено использовать величины изменения NPP фитоценозов при рассматриваемых климатических сценариях в соответствии со следующими правилами изменения состояния фитоценоза при изменении значения его продуктивности:

- если прогнозируется уменьшение значения NPP фитоценоза на величину равную или превышающую ее значение для второй половины XX в., то этот фитоценоз исчезает; если такое снижение ежегодного прироста происходит на части ареала фитоценоза, то фитоценоз исчезает только на этой части;
- если прогнозируется увеличение NPP фитоценоза в 1.5 раза или более по сравнению с ее значением во второй половине XX в., то данный фитоценоз сукцессионно изменяется; если такое увеличение ежегодного прироста происходит на части ареала фитоценоза, то сукцессионным изменениям будет подвержен фитоценоз только на этой части его ареала.

Следует отметить, что в фитоценозах постоянно идут сукцессии, обусловленные различными природно-антропогенными причинами. В данной работе учитываются сукцессии, вызванные только климатическими факторами.

Результаты модельных расчетов изменения первичной продукции растительности и территорий, на которых фитоценозы будут изменяться в результате сукцессионных процессов при ожидаемых климатических изменениях, представлены на рисунках 1 и 2.

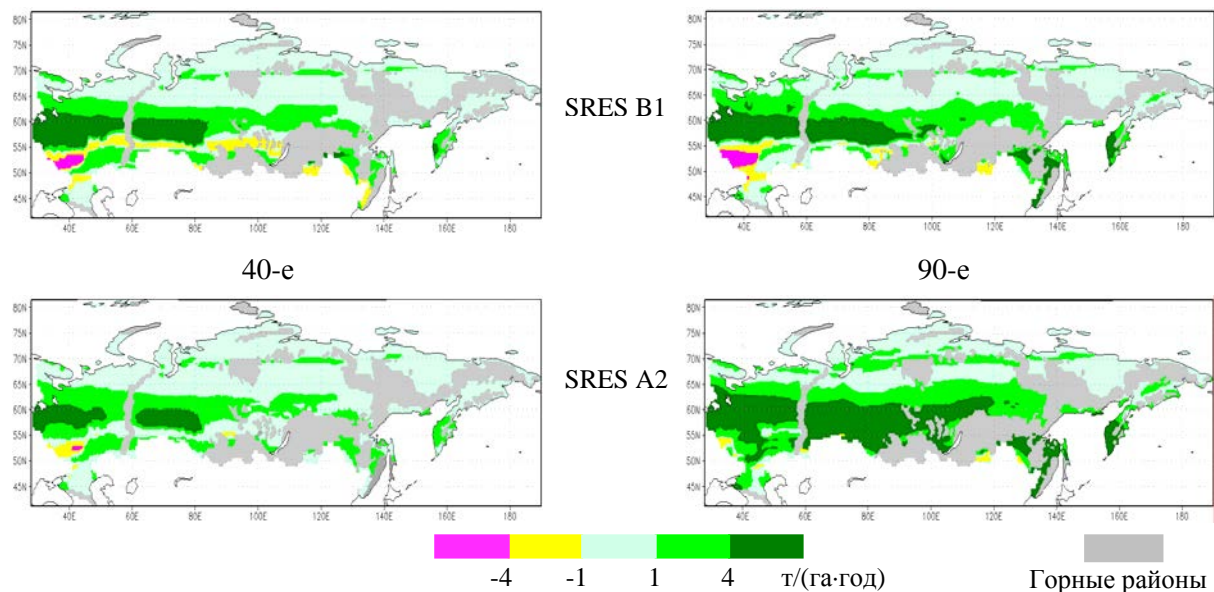


Рисунок 1. Изменения значений первичной биологической продукции в XXI в.

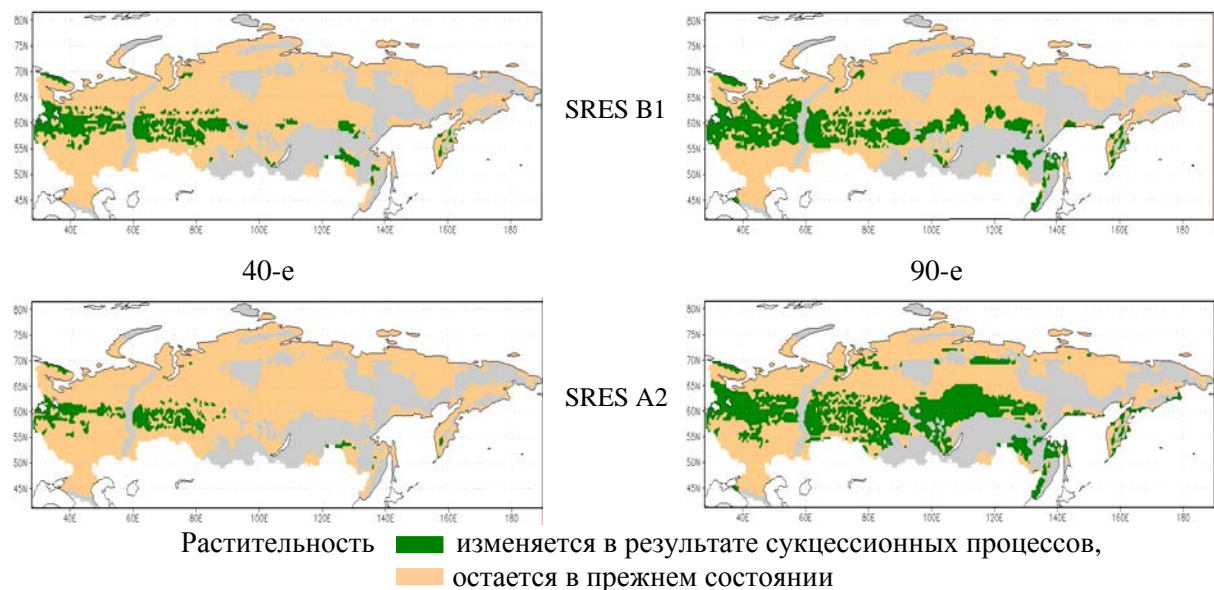


Рисунок 2. Динамика растительности в XXI в.

Модельные расчеты позволяют выявить пространственные тенденции и масштабы вероятных изменений растительного покрова России. Согласно сделанным оценкам можно ожидать заметного увеличения первичной продукции в достаточно протяженном поясе широт для территории России. В то же время следует отметить существенные региональные различия возможных изменений при разных модельных сценариях климатических изменений. Полученные результаты указывают на мозаичный характер возможных изменений фитоценозов внутри их современных ареалов. По этой причине существенного сдвига растительных зон на равнинных территориях России не ожидается.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН "Физические и химические процессы в атмосфере и на земной поверхности, определяющие изменения климата".

МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИММЕТРИЧНОЙ КОНКУРЕНЦИИ МЕЖДУ РАСТЕНИЯМИ

Грбарник П.Я.

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

Аннотация: в докладе обсуждается новый класс моделей гиббсовских точечных процессов, позволяющий учесть несимметричный характер взаимодействия между деревьями.

Пространственные взаимоотношения между деревьями играют важную роль в лесной экосистеме, определяя совместно с другими процессами рост, напряженность конкурентных взаимодействий, отпад и возобновление деревьев (Dieckmann et al., 2000). С точки зрения теоретической биологии пространственная структура является одним из индикаторов развития растительного сообщества. Процессы конкуренции приводят к формированию специфической пространственной структуры в расположении деревьев и могут характеризовать напряженность конкурентных взаимодействий. С точки зрения практики учет пространственной структуры существенен, когда планируются лесоустроительные мероприятия, или в задачах рубок ухода. Кроме того, моделирование размещения деревьев является частью индивидуально-ориентированных имитационных моделей динамики лесных экосистем.

В литературе можно выделить три основных подхода к моделированию пространственной структуры древостоя. Первый связан с построением имитационных моделей динамики растительного сообщества с пространственной привязкой индивидуального дерева. В этом случае размещение деревьев является побочным результатом прогонки модели. Второй класс образуют модели пространственных точечных процессов. Их преимущество состоит в том, что обычно эти модели малопараметрические и требования к данным для надежной оценки параметров не чрезмерны. Третий способ, разработанный относительно недавно (Pommerening, Stoyan, 2008), не требует спецификации модели, что может быть удобно для ограниченного круга задач.

В докладе мы моделируем размещение деревьев с помощью пространственных точечных процессов с локальным взаимодействием. Преимущество данного класса моделей связано с тем, что параметры модели могут быть интерпретированы в терминах конкурентных взаимоотношений между деревьями. В то же время, недостатком классических гиббсовских точечных процессов (Ripley, Kelly, 1977) является предположение, что взаимодействие между соседними объектами симметрично, то есть, если один объект влияет на соседний объект, то точно такое же влияние он испытывает сам со стороны соседа. Однако, взаимодействие между растениями не является симметричным. При моделировании пространственной структуры древостоя мы сталкиваемся с необходимостью учета асимметричного характера взаимодействия между деревьями. Под асимметричным взаимодействием мы понимаем непропорциональный раздел ресурсов соседних деревьев в пользу большего дерева. Типичным примером такого взаимодействия является конкуренция за свет, когда большее дерево перехватывает большую часть световой энергии, что ведет к угнетению и в конечном счете отпаду меньшего соседа.

В отличие от пространственно-временных симуляторов динамики растительного сообщества (Pretzsch, 1997; Bauer et al., 2004; Särkkä, Renshaw, 2006) построение модели чисто пространственного точечного процесса с асимметричной конкуренцией между растениями представляет математические трудности. Мы показываем как это можно сделать, используя так называемый иерархический потенциал (Grabarnik, Särkkä, 2009). Преимущество новой модели случайного точечного процесса с иерархическим взаимодействием, состоит в более точном учете характера взаимодействия. Кроме того, иерархический потенциал позволяет моделировать оба типа взаимодействия: симметричное

(когда соседние деревья имеют сравнимые размеры) и асимметричное (когда одно из соседних деревьев подавляет другое) одновременно. Новая модель с иерархическим потенциалом исследовалась на примере одновозрастного сосняка.

Литература

- Dieckmann U., Law R., Metz J.A.J. (Eds.), *The Geometry of Ecological Interactions. Simplifying Spatial Complexity*, Cambridge Studies in Adaptive Dynamics –C., Cambridge Univ. Press, 2000.– 554p.
- Bauer S., Wyszomirski T., Berger U., Hildenbrandt H., Grimm V., 2004. Asymmetric competition as a natural outcome of neighbourhood interactions among plants: results from the field-of-neighbourhood modelling approach // *Plant Ecol.*- 2004.- V. 170.– P.135–145.
- Grabarnik P., Särkkä A. Modelling the spatial structure of forest stands by multivariate point processes with hierarchical interactions // *Ecological Modelling.*– 2009.– V. 220.- P. 1232–1240.
- Pommerening, A., Stoyan, D., 2008. Reconstructing spatial tree point patterns from nearest neighbour summary statistics measured in small subwindows // *Can. J. For. Res.*– 2008.- V.38.- P. 1110–1122.
- Pretzsch, H., Analysis and modeling of spatial stand structures. Methodological considerations based on mixed beech-larch stands in Lower Saxony // *For. Ecol. Manage.* -1997.– V.97.- P. 237–253.
- Ripley B.D., Kelly F.P. Markov point processes. *J. Lond. Math. Soc.*– 1977.V. 15.- P. 188–192.
- Särkkä A., Renshaw E. The analysis of marked point patterns evolving through space and time // *Comput. Stat. Data Anal.*– 2006.– V. 51.– P.1698–1718.

ТРАВЯНЫЕ КОЛЬЦА. МОРФОЛОГИЯ, ДИНАМИКА, МОДЕЛЬ

Грабовский В.И.

Центр по экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

wgrabo@mail.ru

Аннотация: описаны пространственно-временные структуры в травянистых сообществах пастбищ и суходольных лугов Хмельницкой области (Украина). Это кольца, дуги, спирали и круги более яркой, чем окружающая растительность. Во времени происходит смещение фронта яркой растительности от центра к периферии со скоростью 20 – 60 см в год. При встрече двух волн происходит их взаимное погашение. Предполагается, что в основе лежит автоволновой процесс. Приведена автоволновая модель, имитирующая описанное поведение.

1. Введение

Способность к пространственной самоорганизации - одним из самых интригующих свойств надорганизменных систем. Одним из модельных объектов, удобным для рассмотрения этого аспекта функционирования пространственно подразделенных популяций являются травянистые сообщества, а адекватным для их моделирования инструментом – клеточные автоматы (Komarov et al., 2003). Ниже будет предложен любопытный пример автоволновой активности травянистых сообществ, не отмеченный, насколько известно автору, ранее в литературе. Речь идет о дуго- кольце- и спиралеобразных структурах в травянистом сообществе пастбищ и суходольных лугов.

Впервые травяные кольца и дуги были найдены возле села Рудка Хмельницкой области (48°58'52.29"N, 26°39'28.71"E) в 2007 году. Такие же вещи были обнаружены весной 2005 года в 40 км к ю.-в., на левом берегу р. Днестр (48°34'02.81"N, 26°45'32.97"E). После первых находок были проведены более подробные обследования сопредельных территорий и подобные структуры были найдены во многих других районах области. Например, на северных склонах Днестра и по берегам его притоков, на водораздельных участках вдоль шоссе Хмельницкий - Каменец-Подольский и др. Тем не менее, неоднократно пересекая Украину на авто и ж-д транспорте, я не видел травяных колец за пределами области. Лишь двое из многочисленных опрошенных мной коллег упомянули, что видели подобное в Крыму (Комаров А.С.) и на южных склонах Днестра (Губин С.В.).

Самые яркие кольца найдены возле села Рудка. Они сформированы луговой растительностью с преобладанием пырея (*Elytrigia* sp.). В других местах злак может быть другим. Например, на склонах Днестра это ковыль (*Stipa* sp.).

За несколько экскурсий найдены сотни таких структур. В апреле это ярко зеленые, кольца (простые и концентрические), дуги, спирали и круги (перечислены в порядке встречаемости, рисунок 1 а, б, в, г)¹.

Размеры структур варьируют от нескольких десятков сантиметров («зародыши» колец образуются часто вокруг коровьих лепешек) до нескольких десятков метров. Значительно меньше варьирует толщина кольца, то есть ширина зеленой полосы. Обычно это полоса в 40 – 60 см ширины. Редко встречаются полосы шириной в метр, либо сплошные диски зеленой травы (см. рисунок 1 г). Все описанные структуры встречены либо на пастбищах, либо на лугах, где выпас скота редок или отсутствует (по склонам Днестра). Это преимущественно склоны, хотя кольца были встречены и на относительно ровных лугах.

¹ Фотографии можно найти в интернете по адресу:

<http://picasaweb.google.ru/wgrabo57/GrassRings?authkey=Gv1sRgCP6XkJPgkI3aOQ#5328873779659905746>



Рисунок 1. Примеры пространственных структур травянистых сообществ на лугах



Рисунок 2. Фото растительности в окружении кольца

Различий видового состава зеленой части кольца, его внутренней и внешней частях по визуальным оценкам не найдено (рисунок 2). Как видно, прошлогодние стебли пырея (доминирующий здесь вид) есть как внутри кольца (левая часть изображения), так и во вне его (правая часть изображения). Собственно кольцо, - это лишь участки травянистого сообщества с более ранними сроками начала вегетации. Позже, летом, эти структуры визуальны различимы, как более сочные участки луга.

Многолетняя динамика структуры травянистого покрова отражена на рисунке 3. Здесь представлены кадры одного и того же фрагмента луга снятые с интервалом в 1 год.² Средняя скорость продвижения фронта составляет 20 – 60 см в год. Фронт нарастает от центра к периферии. Существенно, что при встрече двух фронтов происходит взаимное «погашение» волны, что хорошо видно на приведенных рисунках.

² Анимацию можно посмотреть по ссылке <http://www.nature.ok.ru/models/movie1.htm>

Обсуждение результатов

Форма и динамика описанных структур соответствует автоволновому поведению систем. Для иллюстрации была написана клеточно-автоматическая модель. На матрице 100*100 клеток разыграна следующая игра. Условные куртины травы занимают каждую ячейку матрицы и могут находиться в одном из двух состояний: зеленом и белом. Растение становится зеленым тогда, когда

1. концентрация некоторых жизненно важных веществ в почве достигает порогового уровня,
2. либо, когда необходимые вещества присутствуют в меньших концентрациях (но не ниже некоторой минимальной, жизненно необходимой концентрации), но при этом в локальном окружении (3 ряда клеток) плотность «зеленых» соседей выше критической.

Здесь предполагается, что обитание в зеленой дернине каким-то образом облегчает минеральное питание отдельных растений.

Концентрация ресурсов почвы со временем истощается и, когда она падает ниже минимально допустимой, клетка становится белой. Так как скорость восполнения ресурсов почвы постоянна, то процесс через некоторое время повторяется...

Результат симуляции приводит к образованию структур, удивительно похожих по форме и динамике на описанные у реальных трав. Остается найти те ключевые факторы почвы, а также параметры и механизмы взаимодействия реальных трав для проверки правдоподобия модели.



2007



2008



2009

Рисунок 3. Трехлетняя динамика структуры травянистой растительности

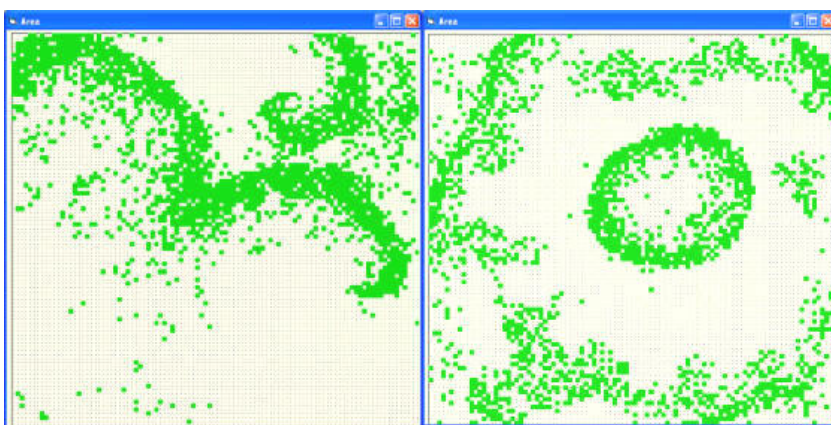


Рисунок 4. Результат имитации травянистых структур на клеточном автомате. 2 независимые симуляции с идентичными параметрами

Литература

Komarov A.S., Palenova M.M., Smirnova O.V. The concept of discrete description of plant ontogenesis and cellular automata models of plant populations // Ecological Modelling. - 2003. - V. 170. - P. 427-439.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИТОМАССЫ ЛИСТВЕННИЧНЫХ ДРЕВОСТОЕВ ЕНИСЕЙСКОГО МЕРИДИАНА

Грешилова Н.В.

СФУ ИФП, г. Красноярск, Россия
Natales2002@mail.ru

Аннотация: в работе обобщены данные лесоустройств по запасам лиственничных древостоев Енисейского меридиана и пробных площадей, содержащих таксационные характеристики конкретных древостоев. Совокупное использование двух источников данных позволило разработать модели возрастной и географической изменчивости фитомассы лиственничников.

Изучение географической изменчивости фитомассы и ее моделирование играет важную роль, так как лесные экосистемы, связывая углекислый газ, аккумулируют углерод в фитомассе на длительный срок, и в то же время подвергаются антропогенному воздействию. Первоочередную актуальность подобные исследования имеют для лиственничников Средней Сибири, занимающих большую часть лесопокрываемых площадей (Грешилова, 2003).

Цель работы заключалась в нахождении географической изменчивости фитомассы лиственничных древостоев Енисейского меридиана и формализации посредством множественных регрессионных моделей.

В работе использовались данные лесоустройств, в которых приведены запасы древесины и пробных площадей включающие таксационную характеристику конкретных древостоев и запасы фитомассы, которые позволили рассчитать связи стволового запаса с общей фитомассой. Сочетание двух независимых баз данных позволило более корректно определить общие запасы фитомассы по группам возраста и интерполировать их на площадь конкретного биома.

Поскольку фитомасса древостоев варьирует из-за различий возраста и условий произрастания, то при разработке моделей географической изменчивости фитомассы лиственничников были рассчитаны переводные коэффициенты *фитомасса: запас стволовой древесины* (Исаев и др., 1995; Швиденко, 2001) и сопоставлены многофакторные регрессионные уравнения (формула 1).

$$M_{ij}/V_j \text{ или } M_i = f(A, H, D, P, V), \quad (1)$$

где M_i – фитомасса в абсолютно сухом состоянии i -й фракции j -й возрастной группы, т/га; M_{st} , M_b , M_{cr} , M_r – соответственно стволов, коры, кроны, корней; V_j – запас стволовой древесины j -й возрастной группы, м³/га; A – возраст, лет; H – высота, м; D – диаметр, см; P – полнота.

Возрастная динамика фитомассы лиственничников Енисейского меридиана (рис. 1) аппроксимирована уравнением (2):

$$M_{\text{фит.}} = b_1 A^{b_2} e^{-b_3 A} \quad (2)$$

где $M_{\text{фит.}}$ – запас фитомассы, т/га; A – возраст, лет, b_1 – b_3 – постоянные коэффициенты уравнений.

Коэффициенты детерминации для уравнения 2 изменяются по зонам от 0,94 до 0,98.

При моделировании выбор независимых переменных определялся по степени их влияния на функцию отклика. Анализ парных корреляций между факторами, такими как: возраст (А), запас (V), средняя высота (Н) и диаметр (D), полнота (Р) и функцией отклика ($M_{\text{общ.}}$) позволил выявить наиболее информативные переменные. Как показал корреляционный анализ, запасы фитомассы в большей степени зависят от запаса древесины (0,95 – 0,99), средней высоты (0,84 – 0,89) и возраста (0,41 – 0,75). Эти показатели, в свою очередь, тесно связаны с возрастом, поэтому в дальнейшем анализе рассматривали совместное влияние запаса и возраста. Достаточно высокие коэффициенты корреляции между полнотой и общей фитомассой (0,56) и массой фракций (0,49 – 0,61) (Грешилова, 2003).

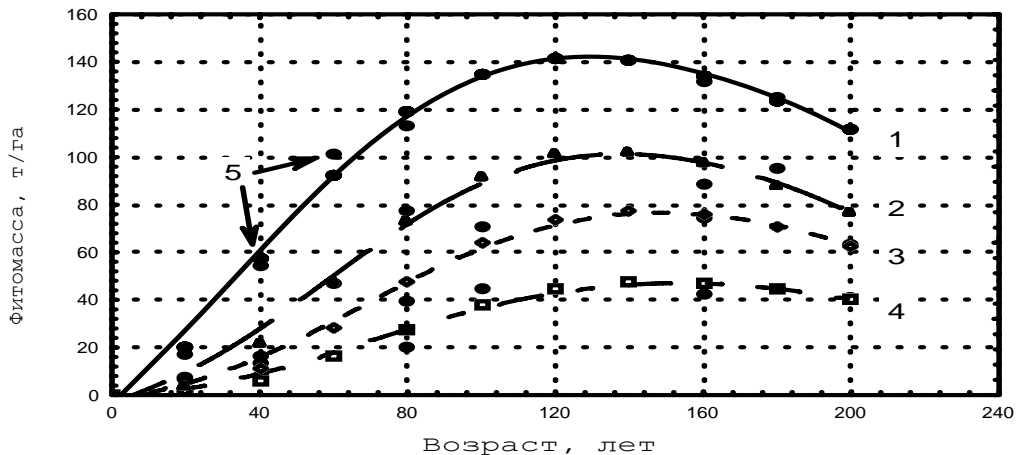


Рисунок. Возрастная динамика запасов фитомассы лиственничных древостоев Енисейского меридиана: 1 – южная тайга; 2 – средняя; 3 – северная; 4 – притундровая зона; 5 – лесоинвентаризационные данные

При моделировании отношения общей фитомассы к запасу древесины проводилась проверка значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента, которая показала, что влияние средних высоты и диаметра не существенно, поэтому в дальнейшем анализе эти показатели не использовали. Регрессионные уравнения, объясняющие изменчивость переводных коэффициентов общей фитомассы в пределах региона посредством включенных в них переменных, имеет вид:

$$M_{\text{общ.}}/V = a_0 + a_2 \ln V + a_3 \ln A \ln V + a_4 \ln P \quad (3)$$

где $a_0 - a_4$ – постоянные коэффициенты уравнений; $M_{\text{общ.}}$ – общая фитомасса, т/га; V – запас древесины, $\text{м}^3/\text{га}$; A – возраст, лет; P – полнота. Ошибки уравнений не превышают 20 %. Соотношения между фактическими и расчетными значениями для переводных коэффициентов говорят о достаточно хорошей аппроксимации фактических данных уравнением и отсутствии корреляции остатков.

Полученные регрессионные модели географической изменчивости фитомассы лиственничных древостоев Енисейского меридиана позволяют с погрешностью до 20 % определять фитомассу в возрастном ряду и могут быть использованы в экологическом прогнозировании.

Литература

- Грешилова Н.В. Моделирование географической изменчивости фитомассы и годичной продукции лесов Енисейского меридиана (на примере светлохвойных пород). Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, - 2003, - 18 с.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И., Титов С.П., Уткин А.И., Голуб А.А., Замолдчиков Д.Г., Пряжников А.А. Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России. – М., 1995. – 156 с.
- Швиденко А.З., Нильссон С., Щепашенко Д.Г. Агрегированные модели фитомассы насаждений основных лесобразующих пород России. // Лесная таксация и лесостроительство. Вып. 1 (30). - 2001. - С. 50 – 57.

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ВОДНОГО И УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСОВ ЭКОСИСТЕМЫ ХВОЙНОГО ЛЕСА

Гусев Е.М., Насонова О.Н.

Институт водных проблем РАН Россия, Москва, ул. Губкина 3
gusev@aqualaser.ru

Физико-математическое моделирование является эффективным инструментом для изучения взаимодействия углеродного и гидрологического циклов с климатической системой, поскольку, с одной стороны, позволяет осуществить совместное описание физических, биохимических, физиологических и биологических процессов, происходящих в сложной и многофакторной системе почва – растительный/снежный покров – атмосфера, а с другой стороны, использовать большое количество данных наблюдений, полученных в результате как стандартных измерений, так и лабораторных и полевых экспериментов в различных областях науки о Земле. В данной работе разработан методический инструментарий оценки изменения составляющих водного и углеродного балансов хвойных экосистем в результате возможных антропогенных изменений климата.

Выбор в качестве объекта изучения экосистемы хвойного леса обусловлен тем, что хвойные леса доминируют в экосистемах бореальной зоны планеты, а результаты многих исследований по изменению климата показывают, что именно в бореальной зоне, играющей важную роль в формировании углеродного баланса планеты, можно ожидать значительных последствий климатических изменений.

Основу разработанного метода оценки динамики водного и углеродного балансов экосистемы хвойного леса составляют разработанная авторами физико-математическая модель теплового, водного и углеродного обмена в хвойных экосистемах — SWAP, а также генератор климатических сценариев для различных районов Земли MAGICC/SCENGEN. Модель SWAP включает в себя описание следующих процессов: перехвата жидких и твердых атмосферных осадков растительным покровом, а также их последующее испарение и таяние (в случае твердых осадков и положительных температур воздуха); формирования снежного покрова под пологом леса и на открытых участках в холодный период года; впитывание воды в почву и формирования поверхностного и подземного стоков; формирования водного баланса зоны аэрации (включающего транспирацию, физическое испарения воды почвой, водообмен с грунтовыми водами и изменение почвенных влагозапасов); формирования теплового баланса системы «почва – растительный покров – приземный слой атмосферы» и ее термического режима; промерзания и оттаивания почвы; динамики основных компонентов углеродного баланса фитоценоза - фотосинтеза и дыхания. Последнее включает в себя две составляющие: автотрофную и гетеротрофную. Автотрофная связана с дыханием фотосинтезирующих фитоэлементов (хвои, листьев), древесины (веток, стволов) и подземной части растительной биомассы (корней, клубней, луковиц и т.д). Гетеротрофное дыхание определяется, во-первых, дыханием микрофлоры, разлагающей отмершую органику лесной подстилки и детрита в органическое вещество почвы (гумус), во-вторых, дыханием почвенных микроорганизмов, осуществляющих минерализацию гумуса.

Была проведена апробация разработанной методики, в результате чего были получены оценки изменения суммарного испарения и углеродного баланса развивающейся экосистемы хвойного леса в районе экспериментального полигона Лубос (Нидерланды) в 21-ом веке (по сравнению с суммарным испарением и углеродным балансом аналогичной экосистемы в 20-ом веке) в связи с ожидаемым увеличением антропогенной эмиссии парниковых газов в атмосферу в соответствии с IPCC-сценарием IS92a экономического, технологического, политического и демографического развития человеческой цивилизации до 2100 года. Следует отметить, что сценарий IS92a взят в качестве примера; При применении

разработанной методики возможно использование и любых других сценариев социально-экономического развития (если аргументация их реализации достаточно убедительна), в том числе включающих и управление антропогенными выбросами.

Суммарная за 21-ый век плотность выбросов углерода (общий объем поступившего в атмосферу углерода в связи со сжиганием ископаемого топлива и сокращением площади лесов, деленный на площадь поверхности Земли) в соответствии со сценарием IS92a равна 2.7 кгС/м^2 . Полученные результаты показывают, что для развивающихся хвойных экосистем в районе площадки Лубос для указанного периода даже приращение стока углерода по сравнению с его значением за аналогичный период 20-го века, равное 4.1 кгС/м^2 , превышает плотность его выбросов в атмосферу вследствие антропогенного воздействия. Абсолютное же значение плотности стока углерода в рассмотренной экосистеме за 21-ый век (13.3 кгС/м^2) превышает среднюю по Земле плотность антропогенных выбросов за этот период почти в 5 раз. Таким образом, можно сделать вывод, что развивающиеся экосистемы, в которых доминируют хвойные породы, являются одним из лучших компенсаторов увеличения содержания CO_2 в атмосфере.

Полученные результаты показали, что при принятии указанного сценария элементы водного баланса растущей экосистемы хвойного леса в выбранном районе (осадки, суммарное испарение) в 21-ом веке практически не отличаются от элементов водного баланса такой же экосистемы в 20-ом веке. Абсолютное же значение углеродного баланса экосистемы (являющейся в обоих случаях значительным стоком атмосферного углерода) в 21-ом веке окажется на 44 % выше, чем в 20-ом.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Давлетшина М.Р.

Башкирский Государственный Аграрный Университет, г. Уфа, Россия
davletshina@yandex.ru

Аннотация: предложена методика оценки устойчивости органического вещества почвы, основанная на методах математического моделирования и системном анализе почвенных систем. Методика позволяет рассчитать критерии устойчивости для различных типов почв и провести прогноз.

Одна из главных задач почвоведения - поддержание стабильного уровня баланса гумуса. Исследования баланса органического вещества в почвах заключается в количественном определении потоков органического вещества с целью прогнозирования устойчивости гумуса.

Объектом исследования являются черноземы выщелоченные Южной лесостепи Республики Башкортостан (РБ). В данном регионе темпы дегумификации пахотных земель возрастают, текущий дефицит гумуса в черноземах республики составляет 1 т/га в год (Гарифуллин и др., 2008 г.). Гумусное состояние почв характеризуется большим набором показателей, отражающих уровни накопления гумуса в почве, его профильное распределение и др. Оценка устойчивости системы гумусовых веществ можно провести различными методами, наиболее эффективным из них является математическое моделирование.

В почвоведении получили распространение два основных способа построения моделей: материально-аналоговое воспроизведение объекта в лабораторном, вегетационном, полевом или производственном опыте и концептуальное описание взаимосвязей между наблюдаемыми явлениями и процессами. По способу реализации концептуальные модели подразделяются на математические и информационные. Математические формализуют качественные или количественные зависимости между измеряемыми величинами или интегральными показателями, построенными на их основе. Информационные модели представляют совокупность сведений об исследуемом объекте в информационной системе, посредством знаков, символов, логических взаимосвязей или графических образов.

Статистические модели строятся при допущении, что исследуемый процесс случаен и может быть изучен с помощью статистических методов анализа систем. Они включают: эмпирические- и динамические статистические модели, корреляционный и факторный анализ, многомерное шкалирование, анализ временных рядов.

Динамические модели предназначены для прогнозирования и оперативного управления продукционным процессом с учетом складывающейся агрометеорологической обстановки. В основе динамического моделирования - описание системы с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных, параметры которых определяют по эмпирическим данным. В почвенных исследованиях используются динамические модели формирования урожая Г.Е. Листопада, А.А. Климова, О.Д. Сиротенко и др., диагностики минерального питания растений, накопления и распада поллютантов в агроэкосистемах (пестицидов, нефтепродуктов, радионуклидов) и др.

"Диффузные" модели используют аппарат уравнений переноса (диффузии) и применяются для расчета потоков вещества и энергии. В почвоведении уравнения диффузии используются для расчета температурных, концентрационных и иных полей в почвенной массе (Пачепский, 1992, Пегов, Хомяков, 1991, Петросян Н.А., Захаров В.В., 1986, Рыжова И.М., 1991).

Для оценки устойчивости гумуса используются линейные модели, балансовые модели, модели круговорота углерода (Рыжова, 1993, Морозов, Самойлова, 1993). Анализ результатов моделирования показал, что эти модели имеют существенный недостаток: невозможность управления по типу обратной связи. Расчеты показывают, что для оценки

динамики гумуса необходимо использовать нелинейные функции, т.к. процессы гумусообразования, гумусонакопления и трансформации гумуса носят нелинейный характер. Средствами графического и математического анализа установлена экспоненциальная зависимость процесса гумусонакопления от времени. Один из возможных вариантов – нелинейная модель круговорота углерода, основанная на аппарате теории катастроф (Давлетшина, 2003).

При построении моделей почвенной системы регионального уровня наибольший эффект достигается использованием таких свойств сложных систем, как скачкообразное изменение поведения с переходами из одного квазистационарного состояния в другое, характеристика сложной системы путем оценки системообразующих факторов. Их количественные оценки будут интегральными показателями основных, наиболее важных свойств системы, характеризующих ее состояние в целом. Разработанная математическая модель круговорота органического вещества с учетом особенностей данной почвы позволяет оценить области устойчивости системы гумуса, найти аппроксимирующие зависимости пределов устойчивости. На примере черноземов Южной лесостепи Башкортостана определены критические значения параметров углерода и соответственно индексы устойчивости этих почв, характеризующие запас прочности к минерализации гумуса. В наиболее устойчивых почвах - черноземах выщелоченных и типичных индексы устойчивости отличаются от критических в более чем в 35 раз. Это свидетельствует о большом запасе прочности к потерям углерода в результате минерализации гумуса.

Практическая ценность модели значительно возрастает, поскольку реализуется возможность оценить реакцию агроэкологической системы на воздействия в широком диапазоне условий среды, что не позволяют осуществить данные индивидуальных экспериментов.

Эти разработки можно использовать в системе регионального экологического прогноза плодородия почв РБ. На основании таких данных дается краткосрочный и среднесрочный прогнозы состояния ресурсов и оценивается перспектива развития ситуации. Количественное описание динамики гумуса связано с трудностями различного характера. Методические проблемы вызваны несовершенством средств и методов агроэкологических исследований. Информационные проблемы связаны с трудностями обобщения экспериментальных данных. Использование агроэкологических моделей имеет ряд особенностей: экстраполяция прогнозных оценок часто затруднена, в то время как интерполяция может выполняться с требуемой точностью. Предъявляются особые требования к экспериментальному обеспечению: данные должны быть собраны за сравнительно короткий срок по единой методике. Все это заставляет совершенствовать средства прогнозирования и принципы интерпретации его результатов.

Литература

- Давлетшина М.Р. Анализ устойчивости почв методами математического моделирования. Дис. на соиск. канд. с.-х. н., Уфа, 2003.– 137 с.
- Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Шахмедов Ш.А. Программирование урожая с помощью динамических моделей // Вестник с.-х. науки, 1987, № 8.—С. 55—59.
- Морозов А.И., Самойлова Е.М. О Методах математического моделирования динамики гумуса. // Почвоведение, 1993, N 6. -С. 24-32.
- Образцов А.С. Системный метод: применение в земледелии.- М.: Агропромиздат, 1990.- 303 с.
- Пачепский Я.А. Математические модели физико-химических процессов в почвах.- М.: Наука, 1992.- 120 с.
- Пегов С.А., Хомяков П.М. Моделирование развития экологических систем.- Л.: Гидрометеиздат, 1991.- 217 с.
- Рыжова И.М. Анализ чувствительности системы почва-растительность к изменениям параметров круговорота углерода на основе математической модели // Почвоведение, 1993, N 10.- С. 52-56.
- Смагин А.В. К теории устойчивости почв // Почвоведение, N 12.- С. 26-34.
- Гарифуллин Ф.Ш., Акбаров Р. А., Хабиров И.К. Агрофизические свойства черноземов Предуралья Башкортостана и пути их оптимизации. Уфа: Издательство БГАУ, 2008.- 304 с.

ПРИНЦИП НАИХУДШЕГО СЦЕНАРИЯ И МИНИМАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ БИОСФЕРЫ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Дегерменджи А.Г., Барцев С.И.

Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
ibp@ibp.ru

Аннотация: предложен новый подход в биосферном моделировании – принцип «наихудшего сценария», учитывающий только ключевые процессы с учетом наиболее «пессимистических», но возможных параметров и процессов. Верификация модели по динамике CO_2 адекватна прошлым данным, включая объяснение похолодания в Малый Ледниковый Период XIII века. Теоретически показана возможность необратимости подъема температуры даже при полном прекращении сжигания топлив.

Система "биосфера-климат" подвержена различным воздействиям (приток антропогенных CO_2 и загрязняющих веществ, вырубка лесов, разрушающее землепользование и т.д.). Поэтому возникает актуальный вопрос: "Могут ли эти воздействия привести к необратимым негативным изменениям в системе "биосфера-климат" или другими словами к глобальной экологической катастрофе?". Вероятность необратимых катастрофических изменений может быть малой, но ее нельзя игнорировать. Поэтому главная цель работы заключается в оценке возможности необратимых изменений биосферы вследствие антропогенного воздействия.

Предлагаемый в работе подход на основе "принципа наихудшего сценария" позволяет снизить остроту проблемы многомерных биосферных моделей. Минимизация математической модели в соответствии с этим принципом приводит к исследованию предельного (но возможного) варианта модели, в которой вклад возможных компенсаторных механизмов минимален.

Самые опасные варианты биосферной динамики могут реализовываться, если в системе "биосфера-климат" усилятся присутствующие положительные обратные связи. Наблюдаемое с середины XX столетия повышение глобальных средних температур с вероятностью $>90\%$ большей частью, вызвано наблюдаемым увеличением концентраций антропогенных парниковых газов. Поэтому в контексте принципа наихудшего сценария был рассмотрена одна из наиболее быстрых петель обратной связи выделения CO_2 : "антропогенная эмиссия CO_2 – рост температуры – дополнительная эмиссия CO_2 вследствие разложения почвенной органики – рост температуры".

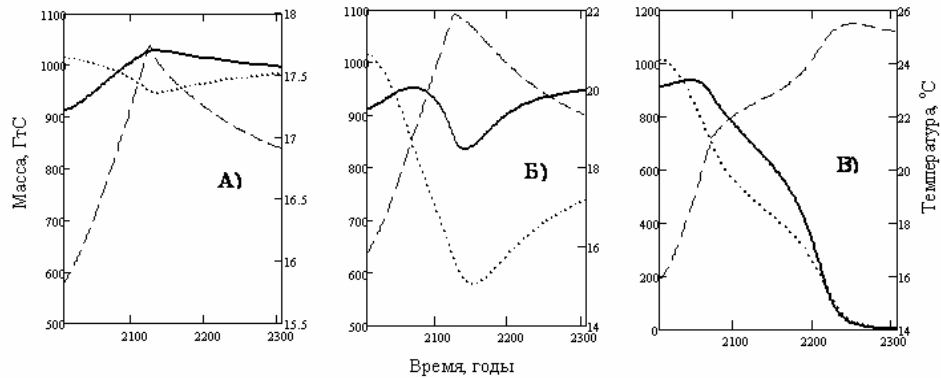
Было создано семейство простых математических моделей с учетом и без учета вклада океана. Существенными переменными модели являются количества углерода в атмосфере, наземной и океанической биомассах, в мертвой органике, а также в растворенном состоянии в океанических водах. На этапе оценки параметров модели достигнуто удовлетворительное соответствие между модельной и реальной 300 летней динамикой концентрации углекислого газа в атмосфере.

Основной результат исследования состоит в подтверждении возможности негативных лавиноподобных изменений в системе "биосфера-климат", вызванных рассмотренной обратной связью. На рис.1 приведены варианты сценариев развития биосферы при разных значениях чувствительности климата к удвоению концентрации CO_2 . Для иллюстративности в модели производилось полное отключение антропогенной эмиссии CO_2 , что позволяло оценить степень вовлеченности положительной обратной связи в динамику CO_2 и получить так называемые "даты необратимости". Даты необратимости указывают на начало, уже независимого от антропогенной эмиссии, лавинного процесса выделения CO_2 .

Как и ожидалось, опасность выхода на лавинный режим в значительной степени уменьшается компенсаторной ролью океана. Однако, как показывают результаты моделирования, океан не всегда способен удерживать систему "биосфера-климат" внутри благоприятного для человека диапазона. Более того, учет чисто физического явления –

падения растворимости газов в жидкости при повышении температуры ослабляет компенсаторную функцию океана. Экстраполяция наблюдаемых трендов глобальных параметров в будущее указывает на возможность существенных изменений параметров биосферы и климата Земли (IPCC, 2007. Climate Change, 2007).

Рисунок 1. Варианты сценариев развития биосферы при различных значениях чувствительности климата T_{del} . Графики соответствуют следующим значениям T_{del} : (А) – 2°C ; (Б) – 4.5°C ; (В) – 6°C . На графике сплошная линия описывает динамику биомассы, пунктирная – мертвого органического вещества, штриховая – изменение температуры. Излом на температурной кривой (А) и (Б) соответствует отключению антропогенной эмиссии. На рисунке (В) "дата необратимости" – 2073 г.



Для решения специфических задач и для повышения достоверности прогноза возможна декомпозиция существенных переменных минимальной модели. Так, например, для оценки реалистичности гипотезы об антропогенных причинах Малого Ледникового Периода XIII века была проведена декомпозиция переменной, описывающей количество углерода в наземной биомассе. Эта декомпозиция позволила ввести различие между травянистыми и древесными растениями. Модель показала, что рефорестеризация (зарастание бывших сельскохозяйственных угодий лесами) вызванная сокращением численности населения при Великой Чуме, действительно может приводить к уменьшению концентрации CO_2 в атмосфере и как следствие к падению температуры («обратный» парниковый эффект).

Другим вариантом декомпозиции, проводимой для повышения достоверности минимальной модели, является переход от общего количества углерода в мертвой органике почв к трем переменным, соответствующим известному разделению почвенных компонентов (детрит, мобильная и устойчивая почвы). Целью декомпозиции является оценка влияния детализации модельного описания на динамику интегральных модельных характеристик и сценарий в целом.

В то же время разработка и уточнение минимальной модели сталкиваются с рядом трудностей. В частности в литературе нет единого мнения о зависимости на больших временах почвенного дыхания от температуры, что играет ключевую роль в данном варианте модели. Остается открытым вопрос о закономерностях изменения локальных температуры и влажности при заданном изменении глобальной среднегодовой температуры и об отклике чистой первичной продукции фотосинтеза на эти изменения. Остается неясным как интерпретировать тот факт, что минимальная модель биосферы, построенная в соответствии с принципом наихудшего сценария, удовлетворительно описывает динамику CO_2 в далеком и не очень далеком прошлом. Предложены и другие пути повышения адекватности модели.

Работа поддержана Интеграционным проектом СО РАН №50.

Литература

IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (www.ipcc.ch)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ АВТОХТОННОГО БАКТЕРИОПЛАНКТОНА КРАСНОЯРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Дегерменджи Н.Н.¹, Дегерменджи А.Г.²

¹Красноярский государственный медицинский университет, Красноярск, Россия
nann@newmail.ru

²Институт биофизики СОРАН, Красноярск, Россия
ibpl@ibp.ru

Аннотация: экологическое прогнозирование динамики микроорганизмов и качества воды в Красноярском водохранилище основано на знании зависимости удельной скорости роста (УСР) от лимитирующих субстратов. Объектом исследования является влияние почвенного экстракта материала береговых обрушений - перманганатной окисляемости – ХПК на рост автохтонного бактериопланктона Красноярского водохранилища. Определяется максимальная УСР и константа Михаэлиса-Ментена. Данные параметры использовались в экомодели Красноярского водохранилища для оценки эффективности самоочищения.

1. Введение

Красноярское водохранилище представляет собой глубокий слабопроточный водоем с преимущественно сезонно-контролируемым протоком. В его использовании преобладает гидроэнергетика. Площадь водного зеркала составляет 2000 кв. км., объем - 73.3 куб. км., длина - около 390 км, средняя ширина - 5-6 км, наибольшая ширина - 15 км, средняя глубина - 27 м, максимальная глубина - 105 м. Среднегодовой расход у напорного трубопровода плотины - 80-90 куб. км/год. Особенность водохранилища - значительная переменность уровня водной поверхности - от 234 до 225 м, т.е. диапазон - 18 м. Возраст водохранилища – более 40 лет. Гидробиология водохранилища характеризуется интенсивным “цветением” сине-зеленых водорослей, достигающим до 1.4-3.3 г/куб. м сухого веса. (*Aphanizomenon flos-aquae*, *Melosira granulata* (0.34 г/куб. м) и *Fragilaria crotonensis* (0.31 г/куб. м)).

Микроорганизмы играют основную роль в круговороте углерода, азота, фосфора и серы, а также в минерализации и самоочищении, как в естественных, так и в искусственных аквасистемах. Полное описание микробиологического блока водных экосистем должно основываться не только на стехиометрии элементного цикла, но также на кинетических характеристиках процессов и их зависимости от условий среды во время эксперимента. Основные трудности возникают при выборе субстрата для экспериментов по кинетическим характеристикам. Общепринятое применение добавок органических веществ, таких как углеводороды, органические кислоты, пептон и т.д. - всего лишь модели природных компонентов субстратов. Анализ источников некоторых органических веществ в Красноярском водохранилище показал, что основным компонентом является процесс деструкции прибрежной зоны (за десятилетний период составляет около 40% общего баланса твердого вещества; с созданием Саянского моря (выше по течению) оно поднимется до 73%). Из-за разрушения лесных почв, чернозема идет поступление гумуса и других соединений в море. Все это приводит к необходимости исследования УСР бактериопланктона (В) на почвенных экстрактах материалов разрушения береговой полосы и его поглощения.

2. Материалы и метод

Почвенных экстракт культуральной среды для культивации В готовился из водных вытяжек почв различных горизонтов, обрушающихся в районе водной станции залива Сыда. Микробиологические взятие образцов с целью культивации было проведено на той же водной станции в стерильных условиях на глубине 20 см от поверхности с одновременной фильтрацией фито- и зоопланктона. Из динамики величины В(t) ([В]=кл/мл) во время эксперимента рассчитывалась УСР: $G(S_{ХПК}) = \ln(B2/B1)/(t2-t1)$, где $S_{ХПК}$ - средняя

концентрация ХПК в течение экспериментального периода t_1 , t_2 . По этим данным была рассчитана максимальная УСР ($\mu_{\max} = 0.117 \pm 0.019$ 1/час), константа Михаэлиса-Ментена ($K_s = 7.85 \pm 6.6$ мг ХПК/л), а также коэффициент поглощения органики почвенного экстракта В: $y = 11.74 \pm 1.17$ г ХПК/г биомассы.

3. Модельный расчет динамика бактерий (В)

Расчет динамики В проводился по имитационной модели экосистемы Сыдинского залива. Модель имеет следующие основные блоки: гидрологический блок, блок морфометрии водоема, гидрохимический блок, экологический блок. Расчет динамики В совместно с представлением натуральных полевых данных (+) проводился для вариантов экосистем различной степени сложности (обозначенных на рисунке цифрами 1-8):

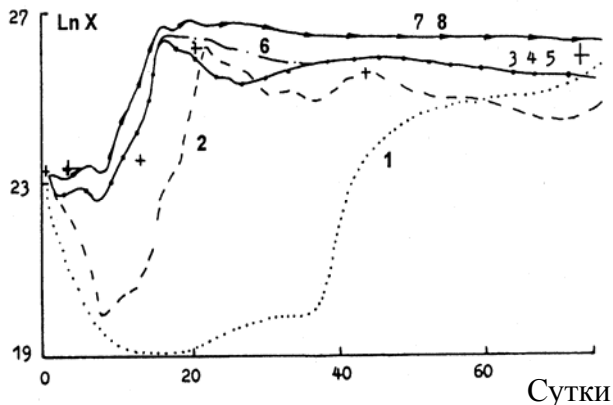


Рисунок. 1. собственно гидрологическая модель, биологические процессы «заморожены»;

2. В ограничено ХПК, остальные компоненты отсутствуют;

3. присутствуют следующие компоненты: диатомовые и сине-зеленые водоросли, бактерии, простейшие, органическое вещество, фосфор, азот, при отсутствии зоопланктона и круговорота; 4. то же, что и вариант 3, но с круговоротом; 5. то же что и вариант 3, за исключением

повышения G_{diatom} и введения зоопланктона; 6. то же что и вариант 5, но с круговоротом; 7. то же что и вариант 6, за исключением еще большего повышения G_{diatom} ; 8. то же что и вариант 3, но с включением каннибализма зоопланктона, и круговоротом, G_{diatom} несколько ниже.

4. Результаты

Установлено, что зависимость УСР неидентифицированной по составу смешанной природной культуры бактериопланктона от уровня ХПК почвенного экстракта описывается уравнением Махаэлиса-Ментена, как и для чистых культур. Математические расчеты динамики общей численности микроорганизмов в сравнении с наблюдениями позволяют сделать следующие выводы: 1) новый метод модельного насыщения кинетическими экспериментальными данными дает возможность рассчитать динамику бактерий существенно более адекватную; 2) более детальное описание экосистемы повышает адекватность прогноза; 3) анализ гидрологических расчетов показывает, что в среднем за сезон и за исключением периодов цветения результаты моделирования качественно, а для некоторых камер и составляющих и количественно приближаются к наблюдаемым. В этой работе мы рассмотрели нетрадиционный подход к моделированию качества воды и динамики бактериопланктона, основанный на цепочке теоретических и экспериментальных исследовательских этапов: синтез экосистемной модели, включающий кинетические характеристики --> проверка модели на основе существующих данных --> прогнозные расчеты. Данный экспериментальный метод получения кинетической информации совместно с моделированием может найти применение в различных сферах водопользования на водохранилищах.

Благодарности

Работа поддержана Интеграционными проектами СОРАН №50 и №95.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНОГО И ВОДНОГО БАЛАНСА ЛЕСОВ ЮЖНОЙ ТАЙГИ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ

Дещеревская О.А.¹, Ольчев А.В.²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
laniel88@mail.ru

²Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Москва, Россия
aoltche@yandex.ru

Аннотация: исследуется изменение компонентов водного и углеродного баланса еловых и смешанных лесов в Центрально-Лесном заповеднике (Тверская область) при климатических изменениях в течение следующих 100 лет по сценарию А1В (IPCC, 2007). При увеличении среднегодовой температуры на 3.4° за 100 лет поглощение CO₂ лесами возрастает в 1.5 раза, испарение и транспирация снижаются.

1. Введение

Изучение углеродного и водного обмена между растительностью и атмосферой в настоящее время является одной из наиболее актуальных задач в свете глобальных изменений климата. Для описания процессов взаимодействия земной поверхности и атмосферы используют модели «Почва – растительность – атмосфера – перенос» (ПРАП, или SVAT), учитывающие как физические процессы в атмосфере, растительности и почве, так и биохимические процессы в растительности.

Углеродный и водный баланс лесов варьирует в зависимости от метеорологических условий и состава древостоя. В контексте глобальных климатических изменений актуально более подробное изучение чувствительности газообмена различных экосистем к климатическим параметрам.

Задачей данной работы является оценка чувствительности составляющих баланса CO₂ и H₂O хвойных и смешанных лесов южной тайги к изменению видового состава древесных пород и возможным будущим климатическим изменениям.

2. Данные и методика

Приводятся результаты моделирования газообмена в еловых и смешанных (ель, береза) лесах, произрастающих на территории Центрально-Лесного Государственного Биосферного Заповедника, ЦЛГБЗ (Валдайская возвышенность, Тверская область, 56°30' с.ш., 32°50' в.д.). В качестве начальных условий взяты метеорологические ряды наблюдений в ЦЛГБЗ за 1999 год (с дискретностью 1 час). 1999 г. отличался очень теплым и достаточно сухим летом (температуры июня и июля близки к максимуму за 34 года измерений, осадки приблизительно в 2 раза меньше средних), большой неоднородностью метеорологического режима. Средняя годовая температура в 1999 г. составила 6.0°. Годовое количество осадков – около 650 мм.

Для оценки воздействия будущих климатических изменений на потоки H₂O и CO₂ были использованы данные численных экспериментов глобальной климатической модели ECHAM5 (Институт Макса Планка, Гамбург, Германия) согласно сценарию изменения климата А1В [IPCC, 2007]. Для ряда метеорологических элементов были рассчитаны разности между осредненными 20-летними значениями в конце 20 века (реанализ, 1980-2000) и через 100 лет (2080-2100). Согласно численным экспериментам ECHAM5, по сценарию А1В за 100 лет температура в ЦЛГБЗ повысится на 3.4° (с 3.4 до 6.8°). Потепление интенсивнее зимой (на 5.3°), слабее летом (приблизительно на 1°). Среднегодовая сумма осадков увеличивается с 645 до 813 мм. Количество прямой солнечной радиации снижается на 17% вследствие увеличения облачности.

Разности метеорологических параметров были наложены на измеренные ряды метеозлементов в ЦГЛБЗ за 1999 г. Метеорологические данные: а) за 1999 г. и б) за 1999 г. с наложенными климатическими трендами - были использованы в качестве начальных данных для модели Mixfor-SVAT, разработанной для описания переноса H₂O и CO₂ между лесными экосистемами и атмосферой (Ольчев и др., 2008). Проведено сравнение сезонной изменчивости полученных потоков водяного пара и углекислого газа в настоящее время и через 100 лет.

3. Результаты и обсуждение

Различие углеродного и водного цикла для смешанных и хвойных лесов в основном обусловлено разницей в процессах транспирации и фотосинтеза у хвойных и лиственных пород. Первичная продукция примерно на 5% выше у березового леса, чем у елового.

Несмотря на значительное (на 25%) увеличение осадков в ЦГЛБЗ, роста испарения не происходит. Напротив, для лесов с преобладанием ели в период апрель-сентябрь ожидается снижение общего потока влаги от экосистемы на 7%, транспирации на 11-12%. В березовом лесу снижение потоков H₂O менее значительно (2% и 5% соответственно) в связи с более ранним началом процессов вегетации в апреле. Отрицательный эффект от уменьшения солнечной радиации оказывается сильнее, чем положительный эффект от роста осадков.

Рост температуры оказывает существенное влияние на процессы фотосинтеза и дыхания. Для всех типов леса первичная продуктивность возрастает быстрее (на 22-23%), чем дыхание (на 14-16%), поэтому нетто-обмен CO₂ возрастает в абсолютных значениях (с -7.2 до -11.8 мкмоль CO₂ м²с⁻¹ для еловых лесов и с -7.0 до -11.6 мкмоль CO₂ м²с⁻¹ для смешанных лесов с 40% березы). Снижение солнечной радиации в период вегетации на 17% не оказывает существенного влияния на продуктивность лесов. Таким образом, при изменении климата согласно сценарию A1B хвойные и смешанные леса Южной тайги более интенсивно поглощают углерод из атмосферы.

4. Выводы

С помощью модели переноса H₂O и CO₂ между растительностью и атмосферой Mixfor-SVAT (Ольчев, 2008) проведены эксперименты по моделированию водного и углеродного баланса лесов южной тайги с учетом будущих изменений климата. Согласно результатам моделирования, при увеличении среднегодовой температуры на 3.4° за 100 лет (по сценарию A1B IPCC, данные модели ECHAM5, Институт Макса Планка) к 2100 году хвойные и смешанные леса Южной тайги будут за год поглощать более чем в 1.5 раза больше углекислого газа, чем за год в настоящее время. При этих же условиях вследствие увеличения облачности годовое испарение в лесах южной тайги снизится на 7%, транспирация - на 11%.

Литература

- Vygodskaya N., Groisman P.Ya., Tchebakova N., Kurbatova J., Panfyorov O., Parfenova E., Sogachev A.. Ecosystem and climate interactions in the boreal zone of northern Eurasia. Environmental Research Letters,- №2,- 2007.
- IPCC 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press.
- Варлагин А., Выгодская Н., Курбатова Ю., Ольчев А. Модельный подход для описания переноса CO₂ между лесными экосистемами и атмосферой.- Лесоведение, 2008,- №3.- С. 3-13.

ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТМ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ ЗОНЫ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ

Дину М.И.

Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

fulva@rambler.ru

Аннотация: Рассматриваются поликомпонентные природные системы, компоненты которых распространяются в различных фазах. Применяются термодинамические расчеты, на основе теории множеств и статистических данных. Основной акцент сделан на реакциях комплексообразования с гумусовыми веществами вод и процессами адсорбции для ионов железа, цинка, свинца.

Реальные водные системы – поликомпонентные системы. Целью проведенных исследований являлось установление последовательности корректировки термодинамических расчетов, на основе теории множеств и применении теории вероятности к природным водным системам (Ягодский, 2005). Важная роль процессов комплексообразования с гумусовыми веществами в природных водах описана в работах многих ученых (Ершова и др., 1996). Также достаточно подробно исследованы взаимодействия с гумусовыми кислотами отдельных металлов (Гранина, Каллендер, 2007.) Используя литературные данные и полученные экспериментальные результаты, также рассматривая систему с точки зрения набора фаз, была проведена систематизация присутствующих компонентов в природных водах зоны тайги (Ахметов, 1988). Применяя определенные допущения, относительно взаимодействия компонентов, описано распределение металлов по формам. (Веницианов, Кочарян, 1994).

Рассмотрены вещественные переменные $X_j(j \in L)$, где $L = 1, 2, 3, \dots, m$ – конечное множество целых индексов (Карпов, 1981). Разбито L на $n(\Phi)$ подмножеств $L_{@}$. Число индексов для $l_{@}$ обозначено через $n(l_{@})$, везде далее $n(Z)$ – число элементов в конечном счетном множестве Z . Так, $n(L) = m$ и ‘+’@. Используются следующие основные определения и обозначения (Карпов, 1981):

[6,7,9]

- | | |
|--|---|
| - $\Phi = 1, 2, 3, \dots, n(\Phi)$, $\Phi_0 = \Phi / \Phi_j$; | - $X_{@} = \sum_j x_j (@ \in \Phi)$; |
| - $S_1 = j / j \in L$, $X_j > e$, $S_2 = l_{@}$,
$n(l_{@} > 1)$, @ $\in \Phi$; | - $S_0 = j / j \in l_{@}$, $n_0(l_{@}) < 0$, $n(l_{@}) > 1$,
@ $\in \Phi$; |
| - $S = S_1 \cap S_2$, $S_2 / S = S_3$, $L_s = L S_3$; | - $I_0 = j / j \in l_{@}$, $n_0(l_{@}) = 1$, $n(l_{@}) = 0$,
@ $\in \Phi$. |
| - $I = j / j \in l_{@}$, $n(l_{@} = 1)$, @ $\in \Phi$; | |
| - $J = S \cup I = S_1$, $L_0 = L / J$; | |

При оценке достоверности результатов расчетов исходили из следующих допущений:

- $x >= 0$ при $x_j >= 0$ для всех j ;
- $x >= 0$ при $x_j >= 0$ и x не равен 0;
- $x > 0$ при $x_j > 0$ для всех j ;
- $x = 0$ - отрицательный вектор;
- $x > 0$ - положительный вектор.

Физико-химическое содержание обозначений следующее:

- Φ - множество из $n(\Phi)$ фаз системы;
- L - множество из $n(L)$ компонентов системы;
- X_j - количество молей компонента j в системе;
- $X_{@}$ число молей компонентов в фазе @;
- S_1 - подмножество тех компонентов системы, мольные количества которых превышают число e (мольную долю);
- S_2 - подмножество тех компонентов системы, которые принадлежат фазам, состоящим более чем из одного компонента при $X_{@} > e$;

- I - подмножество компонентов системы, принадлежащих фазам, состоящих из одного компонента;

- Ls - подмножество компонентов системы, принадлежащих всем фазам.

Для проведения расчета использованы следующие исходные данные (Федоров, Дину, Казакова, 2006):

1. В системе присутствуют ионы Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , гумусовые вещества – фульвокислоты, гуминовые кислоты, гиметомелановые кислоты.

2. Взаимодействуют ионы металлов и гумусовые вещества, также рассматривается адсорбция металлов.

3. Компоненты распределяются по двум фазам – твердой и жидкой, газообразная составляющая не учитывается.

4. Неорганические комплексные соединения металлов не учитываются.

5. Уравнение баланса масс применяется к Me, где $Me=Zn, Cd, Pb$.

В результате расчетов получены следующее распределение:

1. Химический состав:

Me-Гумусовые вещества, $[Me(H_2O)_n]^x$, Me^{2+} , H_2O , гумусовые кислоты.

2. Количество и состав фаз – 2 фазы: твердая фаза – адсорбция металлов на твердых отложениях преобладающих в водах выбранной зоны.

Жидкая фаза - комплексы металлов с гумусовыми кислотами, гидроксокомплексы, H_2O , небольшое количество солей металлов ($x < e$) – Me^{2+} .

3. Действительные компоненты – H_2O , O_2 , $[Me(H_2O)_n]^x$

4. Возможные компоненты – Me^{2+}

Результаты расчетов для трехвалентного железа приведены в таблице 1 (краткий вариант) со следующими условными обозначениями: (+) - $x_j < e$; (-) - $x_j < e$; (!) - $x_j > e$, где x_j - количество компонента j, e – его достоверное содержание в молях (молярное количество).

Таблица 1 Распределение трехвалентного железа по фазам

Компоненты						Подмно- жества
Fe^{3+}	$[Fe(H_2O)_n]^x$	Fe^{3+} -Hum	Fe^{3+} -Ads	O_2	H_2O	
-/+	!/+	+		!/+	!	L
-	!	!		!	!	I*
+	+	-	!	+	!	j

где подмножество L содержит компоненты, принадлежащие все фазам,

I* - компоненты, находящиеся в жидкой фазе,

j – компоненты, содержащиеся в твердой фазе.

Литература

- Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия.- М.: Высшая школа, 1988.
- Веницианов Е.В., Кочарян А.Г. Тяжелые металлы в природных водах.- М.: ИВП РАН, 1994.- С. 299-326.
- Гранина Л.З., Каллендер Е. Элементы круговорота железа и марганца в Байкале// Геохимия. №9.- 2007.- С. 999-1007.
- Ершова Е.Ю., Веницианов Е.В., Кочарян А.Г., Вульфсон Е.К. Тяжелые металлы в донных отложениях Куйбышевского водохранилища // Водные ресурсы.- 1996.- том 23.- №1.
- Карпов И.К., Дорогокупец П.И. Термодинамика природных мультисистем с ограничивающими условиями.- Новосибирск: Наука, 1976.- 110с.
- Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии.- Новосибирск: Наука, 1981.- 250с.
- Федоров А.А., Дину М.И., Казакова Г.Д. Теоретико-множественная интерпретация физико-химических моделей природных мультисистем // В сборнике Ресурсопроизводство и природоохранные технологии освоения недр.- М.: Изд. РУДН 2006.- С. 315-318.
- Ягодский В.Д. Статистическая термодинамика в физической химии.- М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.- 495с.

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ГЛОБАЛЬНОГО ДЕМОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Долгоносов Б.М.

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

Аннотация: цивилизация рассматривается как система, производящая знания. На этой основе разрабатывается модель глобальной демографической динамики, описывающая длительную эпоху гиперболического роста и современный переходный режим, завершающийся установлением гомеостаза в системе цивилизация–биосфера.

Человечество состоит из отдельных взаимодействующих между собой популяций. Традиционный подход к описанию такого сообщества основывается на системе уравнений популяционной динамики, которую можно представить, например, в виде

$$dN_i / dt = F_i^{(1)}(N_i) + \sum_{j \neq i} F_{ij}^{(2)}(N_i, N_j) + \sum_{j, k \neq i} F_{ijk}^{(3)}(N_i, N_j, N_k) + \dots, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где функции F описывают внутривидовые процессы и межвидовые взаимодействия с разной степенью коллективности, N_i – численность i -й популяции. Данный подход требует спецификации вида функций F , а также знания параметров отдельных популяций и характеристик их взаимодействия, что составляет внушительный объем информации. Учитывая ее неточность и неизбежное накопление ошибок, вряд ли стоит ожидать приемлемой точности прогнозов при применении моделей такого рода, и практика моделирования подтверждает этот вывод. Для глобальных прогнозов более уместен другой подход, основанный на агрегированном описании. В этом случае обычные уравнения популяционной динамики могут оказаться непригодными из-за возникновения новых свойств при масштабном переходе. Для построения адекватной агрегированной модели надо рассматривать обобщенные свойства системы, контролирующие ход крупномасштабного демографического процесса. Таким свойством является производство знаний. Это утверждение основано на представлении о цивилизации как о системе, обладающей памятью и производящей знания, необходимые для выживания в сложном мире (Dolgonosov, Naidenov, 2006; Долгоносов, 2009).

Производство знаний осуществляется через рецепцию безусловной информации R , получаемой в виде сигналов из внешнего мира, и ее преобразование в ходе интеллектуальной деятельности в условную информацию q , которая и представляет собой знания. В результате происходит логарифмическое сжатие информации: $q \sim \ln R$ (здесь R и q – меры соответствующей информации). При данном уровне знаний q человечество способно распознавать $R \sim e^q$ состояний внешнего мира. Рост знаний экспоненциально расширяет кругозор цивилизации и ее возможности в развитии жизнеспасающих технологий, индуцирует процессы самоорганизации в обществе, в результате которых цивилизация развивается в направлении увеличения сложности своей структуры.

Условная и безусловная информация накапливается в памяти, которая может быть внутренней (генетическая и нейронная память) и внешней (книги, компьютеры, образцы и пр.). Поскольку $R \gg q$, преобладающая часть памяти любого типа, но особенно внешней памяти на компьютерных носителях, заполнена именно сырой рецептируемой информацией. Оценка объемов памяти показывает, что всю историю человечества преобладала внутренняя память, и только к середине XX века внешняя память достигла уровня внутренней, а затем и превзошла ее. Это стало началом новой – информационной – эпохи. Переход к ней сопровождался качественными изменениями: если раньше суммарный объем памяти цивилизации рос пропорционально ее численности, то с преобладанием внешней памяти этот

закон теряет свою силу. Теперь объем памяти можно быстро наращивать за счет внешних носителей. Ускорился и процесс переработки информации за счет применения компьютеров.

Информационная эпоха длится всего несколько десятилетий. Вся же предшествующая продолжительная эволюция характеризовалась жесткой связью между памятью цивилизации и ее численностью: $R \sim N$. А так как $R \sim e^q$, то и $N \sim e^q$ – значит, всё это время не только объем информации, но и численность росла экспоненциально с накоплением знаний. Скорость производства знаний цивилизацией складывается из интеллектуальной деятельности индивидуумов, поэтому в среднем эта скорость пропорциональна численности цивилизации: $dq/dt \sim N$. Отсюда следует уравнение производства знаний $dq/dt \sim e^q$, которое показывает, что процесс идет с обострением. Он сопровождается ускоренным развитием жизнесберегающих технологий, вызывающим такой же ускоренный рост численности. Исходя из уравнения производства знаний и соотношения $q \sim \ln N$, нетрудно получить уравнение роста численности: $dN/dt \sim N^2$, решение которого $N \sim (t_1 - t)^{-1}$ дает известный гиперболический закон роста численности, с моментом сингулярности t_1 , который по оценкам первооткрывателей этого закона (Foerster, Mora, Amiot, 1960) попадает на 2026 год. Таким образом, оказывается, что гиперболический закон, обнаруженный указанными авторами эмпирически из анализа демографических данных, имеет чисто информационную природу. В принципе, он должен выполняться для любой цивилизации, в которой свойства индивидуумов (объем памяти и скорость переработки информации) сохраняются, а накопление информации идет по внутренним каналам памяти.

Переход к информационной эпохе кардинально меняет ситуацию: информация начинает преимущественно накапливаться во внешней памяти. Характерно, что это происходит при приближении к точке сингулярности и совпадает с началом глобального экологического кризиса. Такое совпадение не случайно: оно связано с критическим явлением – преодолением порога перколяции (т.е. глобализацией), когда разрозненное прежде человечество приобретает связность, главным образом через потоки информации в мировой сети, а также через миграционные, финансовые, энергетические и материальные потоки. При этом связность между разными странами становится сопоставимой по величине со связностью внутри них. Для преодоления порога перколяции надо иметь возможность передавать информацию по каналам связи без ее носителей (людей), а это невозможно без развитой внешней памяти. Именно по этой причине начало информационной эпохи, глобализация и экологический кризис в планетарном масштабе совпадают по времени.

Возникновение экологического кризиса связано с исчерпанием не столько ресурсных, сколько регулятивных возможностей биосферы, обеспечивающей стабильность климата. Это знаменует конец длительной эпохи экстенсивного гиперболического роста цивилизации, переход к интенсивному развитию и снижению численности до уровня N_c , разрушающего биосферу. Использование информационной парадигмы позволяет вывести уравнения, описывающие этот переход:

$$dN/dt = wN^2(1 - N/K), \quad dK/dt = \alpha wNK(1 - K/N_c),$$

где K – мгновенная емкость среды, w – коэффициент роста, α – внутренняя управляемость цивилизации. Рассматривается возможная зависимость N_c от изменяющихся условий среды.

Литература

- Долгоносков Б.М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов.– М.: Либроком/URSS, 2009.– 440 с.
- Dolgonosov B.M., Naidenov V.I. An informational framework for human population dynamics // Ecological Modelling.– 2006.– V. 198.– No. 3–4.– P. 375–386.
- Foerster H. von, Mora P.M., Amiot L.W. Doomsday: Friday, 13 November, A.D. 2026 // Science.– 1960.– V. 132.– P. 1291–1295.

УСЛОВИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ

Дружинина О.В.¹, Масина О.Н.²

¹Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, Москва, Россия
ovdruzh@mail.ru

²Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, Елец, Россия
olga121@inbox.ru

Аннотация: проведен анализ режимов динамического поведения в трехмерной модели динамики популяций, учитывающей конкуренцию видов и разные скорости миграции. Для указанной модели приведено качественное исследование с указанием типов состояний равновесия. Получены условия существования положительных состояний равновесия. Даны достаточные условия глобальной асимптотической устойчивости состояния равновесия, соответствующего режиму сосуществования трех видов.

Одной из важнейших проблем, возникающей в задачах математической биологии при изучении динамики численности взаимодействующих популяций, является проблема исследования устойчивости состояний равновесия систем популяционной динамики (Свирижев, Логофет, 1978; Пых, 1983; Базыкин, 2003).

Свойства моделей, взаимодействия двух конкурирующих видов, описываемых системами двух обыкновенных дифференциальных уравнений, исследованы многими авторами (Свирижев, Логофет, 1978; Базыкин, 2003; Allen, 1983; Takeuchi, 1990) и др. Многомерные модели динамики популяций (с размерностью фазового больше двух) на основе метода функций Ляпунова изучались в работе Ю.А.Пыха (1983) и других работах, на основе индексно-дивергентного метода – в работах (Масина, Дружинина, 2007; Дружинина, 2007).

В работе (Zhang Xin-an, Chen, 2007) качественные свойства и устойчивость изучены для моделей, учитывающих конкуренцию и миграцию видов и задаваемых системами трех обыкновенных дифференциальных уравнений. Настоящая работа посвящена качественному анализу трехмерной модели динамики популяций с учетом конкуренции видов и разных скоростей миграции, причем изучаемая модель является обобщением модели вышеуказанной статьи (Zhang Xin-an, Chen, 2007). А именно, рассматривается модель, описываемая системой трех дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_1 - x_1^2 - qx_1 y_1 + \mu x_2 - \gamma x_1, \\ \dot{x}_2 &= x_2 - x_2^2 + \gamma x_1 - \mu x_2, \\ \dot{y}_1 &= y_1 - rx_1 y_1 - y_1^2,\end{aligned}\tag{1}$$

где x_1, y_1 – численность конкурирующих видов, заполняющих ареал 1, x_2 – численность вида в ареале 2, $q > 0, r > 0$ – коэффициенты, характеризующие конкуренцию, $\mu > 0$ и $\gamma > 0$ – разные скорости миграции между ареалами 1 и 2, причем ареал 2 является убежищем для вида x_1 , $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{y}_1$ – производные по времени от соответствующих фазовых переменных. Для системы (1) найдены четыре состояния равновесия: $O(0, 0, 0)$, $A_1(0, 0, 1)$, $A_2(\bar{x}_1, \bar{x}_2, 0)$, $A_3(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{y}_1)$. Компоненты $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{y}_1$ найдены с помощью системы компьютерной алгебры Mathematica 4.1.

Доказано, что если выполняется одно из следующих условий:

$$0 < r < 1, 0 < q < 1, 0 < \mu < 1, \gamma > (\mu - 1)(q - 1),$$

$$0 < r < 1, 0 < q < 1, \mu > 1, 0 < \gamma < q(\mu - 1)(1 - r),$$

$$0 < r \leq 1/q, q \geq 1, \mu > 1, \gamma > (\mu - 1)(q - 1), (q - 1)^2 + (r - 1)^2 \neq 0,$$

то система (1) имеет положительное состояние равновесия A_3 .

Установлено, что если выполняется одно из следующих условий:

$$0 < \mu < 1, \gamma > 1 - \mu, \\ \mu > 1, \gamma > 0,$$

то система (1) имеет положительное состояние равновесия A_2 .

Если выполняется одно из следующих условий:

$$0 < q < 1, 0 < \mu < 1, \gamma > (\mu - 1)(q - 1), \\ q \geq 1, \mu > 1, \gamma > (\mu - 1)(q - 1),$$

то состояние равновесия A_1 является седлом. Если же $q > 1, \mu > 1, 0 < \gamma < (\mu - 1)(q - 1)$, то A_1 – устойчивым узлом. Состояние равновесия A_2 будет седлом при любых положительных значениях μ и γ . С помощью теоремы Рауса–Гурвица установлено, что положительное состояние равновесия локально асимптотически устойчиво.

Для получения условий глобальной асимптотической устойчивости состояния равновесия A_3 использована функция Ляпунова вида

$$V = \sum_{i=1}^2 k_i (x_i - \hat{x}_i - \hat{x}_i \ln(x_i / \hat{x}_i)) + k_3 (y_1 - \hat{y}_1 - \hat{y}_1 \ln(y_1 / \hat{y}_1)),$$

где $k_i, i = 1, 2, 3$ – положительные постоянные.

Доказано, что если для системы (1) выполняется одно из условий:

$$0 < r < 1, 0 < q < 1, 0 < \mu < 1, \gamma > (\mu - 1)(q - 1), \\ 0 < r < 1, 0 < q < 1, \mu > 1, 0 < \gamma < q(\mu - 1)(1 - r), \\ 0 < r \leq 1/q, q \geq 1, \mu > 1, \gamma > (\mu - 1)(q - 1), (q - 1)^2 + (r - 1)^2 \neq 0,$$

то положение равновесия A_3 глобально асимптотически устойчиво.

Проведенный в работе качественный анализ трехмерной модели (1) динамики популяций показал, что миграция приводит к процессу, когда существование исчезающего вида является устойчивым, и, кроме того, приводит к асимптотически устойчивому сосуществованию всех трех видов.

Работа поддержана Фондом содействия отечественной науке и РФФИ (проект № 07-01-00473).

Литература

- Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций.– Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.– 368 с.
- Дружинина О.В. Индексно-дивергентный метод исследования устойчивости нелинейных динамических систем.– М.: ВЦ РАН, 2007.– 188 с.
- Масина О.Н., Дружинина О.В. Существование устойчивых состояний равновесия и предельные свойства решений обобщенных систем Лотки–Вольтерра // Вестник Воронежского гос. ун-та. Сер. «Физика. Математика».- 2007. № 1. С. 55–57.
- Пых Ю.А. Равновесие и устойчивость в моделях популяционной динамики.– М.: Наука, 1983.–184 с.
- Свирижев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ.– М.: Наука, 1978.– 362 с.
- Allen L.J. Persistence and extinction in single-species reaction-diffusion models // Bull. Math. Biol. 1983. V. 45. P. 209–227.
- Takeuchi Y. Conflict between the need to forage and the need to avoid competition: persistence of two-species models // Math. Biosci. 1990. V. 120. P. 181–194.
- Zhang Xin-an, Chen L. The linear and nonlinear diffusion of the competitive Lotka–Volterra model // Nonlinear Analysis. 2007. V. 66. P. 2767–2776.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ДЕНДРОЦЕНОЗОВ СОСНЫ

Ермакова М.В.

Ботанический сад Уральского отделения РАН, г.Екатеринбург, Россия

M58_07E@mail.ru; maer58@rambler.ru

Аннотация: Рассмотрены особенности формирования искусственных дендроценозов сосны при сопутствующем естественном возобновлении. Установлено, что, в рядах культур происходит формирование сложных по видовому, морфологическому составу и происхождению насаждений.

В основе понятия лесного сообщества как организованной системы лежит ее многомерная пространственно-динамическая и функциональная структура. Уровень влияния на данную структуру как отдельных особей, так и их совокупности во многом определяется их численностью, размещением и сопряженностью в пространстве.

В Уральском регионе значительные площади искусственных дендроценозов сосны создаются в условиях, где имеются хорошие перспективы для успешного естественного возобновления. Объясняется это целым комплексом причин. В результате сложившейся ситуации процесс искусственных дендроценозов сосны сопровождается процессами естественного возобновления хвойных и лиственных пород, в том числе и в самих рядах культур (на месте выпавших). Интенсивность возобновления определяется лесорастительными условиями и наличием источников обсеменения (Колесников и др., 1974). Кроме того, при значительном отпаде высаженных растений проводятся дополнительные посадки, иногда неоднократные.

Нами было установлено (Ермакова, 2008), что в дендроценозах сосны независимо от их происхождения, в результате воздействия биотических и абиотических факторов, встречается достаточно значительное количество деревьев с различными морфологическими отклонениями от архитектурной модели рода *Pinus*. Наибольшее отрицательное влияние на изменение базисной плотности древесины в продольном направлении (рисунок 1) оказывает нарушение одноствольности в центральной части ствола (морфологическая группа А). Оно чаще всего оказывается стабильным и в последующем сохраняется. Меньшее на характеристики древесины ствола оказывает влияние смена осевого побега (единичное нарушение моноподиальности) или нарушение одноствольности в нижней или самой верхней части ствола, которые впоследствии трансформируется в нарушение моноподиальности (морфологическая группа Нс). Такие деревья по своим характеристикам внешнего облика и древесины ствола более близки к особям, у которых отсутствуют морфологические нарушения (т.е. нормальным – группе Н).

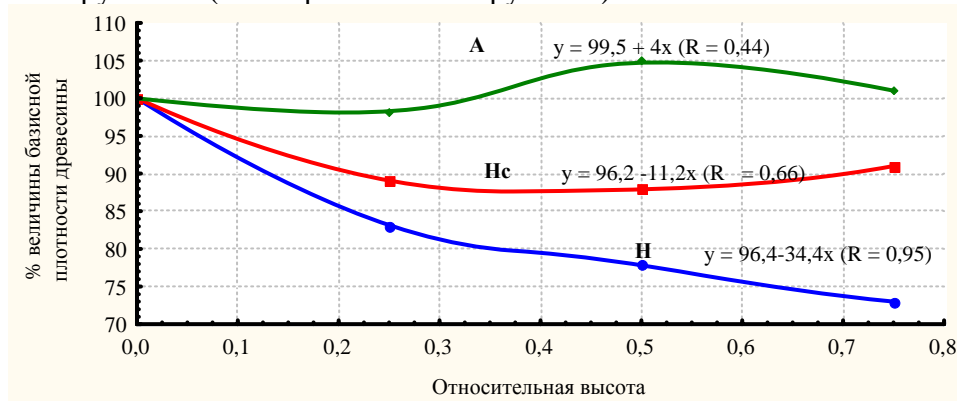


Рисунок 1. Изменение базисной плотности древесины от основания к вершине по относительным высотам (величина базисной плотности принята за 100%)

Особенности формирования подобных искусственных дендроценозов сосны рассмотрены нами на примере трех участков 9-12-летних лесных культур сосны (таблица), созданных в условиях антропогенных экотопов: вырубка и гарь-вырубка (Санников, 1970) южнотаежного округа Зауральской холмисто-предгорной провинции (Колесников и др.,

1974). Окружающий спелый древостой представлен сосной с примесью хвойных и лиственных пород.

Таблица – Характеристика объектов исследования

П / Тип леса	возраст, лет	Кол-во ширины междурядий (min – max), м	Высаженных деревьев, тыс.шт. на 1 га	Сохранилось, тыс. шт. на 1 га		Естественное возобновление в бороздах	
				всего	дополнения	Древесные виды	количество, тыс. шт. на 1 га
/ С тр.		3,0 - 4,0	5,8 0	3,47	0,40	Сосна	0,2 3
/ С бр.	2	1,7 - 4,2	4,8 0	2,68	-	Сосна, лиственница	0,9 4
/ С тр.	2	5,0 - 8,7	2,6 7	1,17	-	Сосна, береза, осина, ива	0,9 3

Представленная на рисунке 2 структура размещения деревьев показывает, что среди сохранившихся от посадки деревьев сосны в пространстве, взаимное размещения особей различного морфологического состояния носит случайный характер. Деревья естественного возобновления, независимо от породы, приурочены к местам, где произошел отпад высаженных.

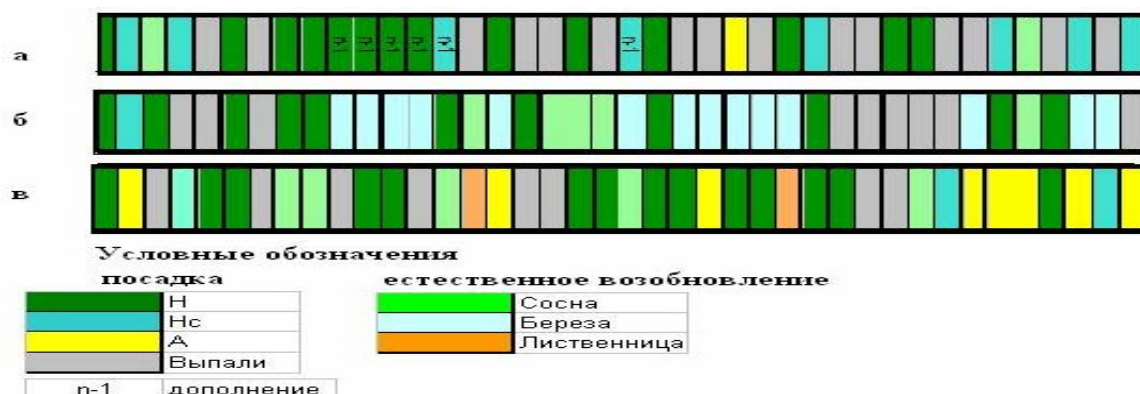


Рисунок 2. Пространственное размещение деревьев в рядах (а, б, с ряды соответственно ПП 1,2 и 3). Шаг посадки 0,5 м

Таким образом, можно сделать вывод, что на лесокультурных площадях, созданных в условиях, где возможно успешное естественное возобновление, в посадочных бороздах происходит формирование насаждений, сложных по видовому, морфологическому составу и происхождению. Можно сказать, что на процесс искусственного восстановления чисто соснового насаждения частично накладывается процесс естественного возобновления, соответствующий коренному типу леса. Все это оказывает специфическое влияние на формирование структуры насаждения. Подобные особенности необходимо учитывать как в научном, так и в практическом плане.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН «Биологическое разнообразие»

Литература

- Колесников Б.П., Р.С. Зубарева, Е.П.Смолоногов Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Практическое руководство. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1974. – 176 с.
- Ермакова М.В. Характеристика деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) I класса возраста с пороками формы ствола/ Аграрный вестник Урала, 2008 г., № 12. С. 81-84.
- Санников С.Н Об экологических рядах возобновления и развития насаждений в пределах типов леса //Лесообразовательные процессы на Урале. Тр. Ин-та экологии растений и животных, вып.67, 1970. С.175 – 181.

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ОНТОГЕНЕЗА НА ХАРАКТЕР ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ПОПУЛЯЦИИ

Жданова О.Л.¹, Фрисман Е.Я.²

¹ИАПУ ДВО РАН, Владивосток, Россия
axanka@iacp.dvo.ru

²ИКАРП ДВО РАН, Владивосток, Россия
frisman@mail.ru

Аннотация: проведен модельный анализ связи между продолжительностью и сложностью онтогенеза и характером динамического поведения биологического сообщества. Показано, что в процессе естественной эволюции природной популяции с выраженной сезонностью жизненного цикла должен происходить закономерный переход от устойчивых режимов динамики численности к колебаниям и хаосу. Увеличение продолжительности и сложности онтогенеза «в среднем» увеличивает степень хаотизации аттракторов. Вместе с тем, выявлены резонансные значения репродуктивного потенциала при продолжительном онтогенезе, которые обеспечивают окна регуляризации в хаотической динамике.

Особенностями возрастной структуры определяются многие свойства популяции. Популяция, включающая в себя несколько возрастных групп, в меньшей степени подвержена влиянию факторов внешней среды, например, таких, которые определяют успешность размножения в конкретном году. Даже крайне неблагоприятные условия размножения, способные приводить к полной гибели приплода того или иного года, не являются катастрофическими для популяции сложной структуры, т.к. одни и те же родительские пары участвуют в воспроизводстве не один раз. Одна и та же самка трески, например, может нереститься ежегодно в течение девяти лет, начиная с шестилетнего до пятнадцатилетнего возраста. Самка горбуши нерестится в возрасте примерно двух лет и сразу же после нереста погибает. Очевидно, что возникновение неблагоприятных условий для нереста горбуши сразу же вызовет значительное сокращение численности всей популяции. Это произойдет в силу того, что большая часть особей популяции представлена молодыми рыбами, появившимися на свет в текущем году. Следовательно, много-возрастные популяции гораздо менее чувствительны по отношению к кратковременным изменениям таких факторов, которые способны оказывать воздействия на отдельные популяционные подгруппы. Вместе с тем, любые воздействия, приводящие к заметному изменению величины численности отдельного возрастного класса, остаются заметными и влияют на состав многовозрастной популяции в течение гораздо более длительного времени.

С другой стороны влияние внешних факторов на динамику численности популяции может быть сопоставимо или даже уступать по величине другому фактору -

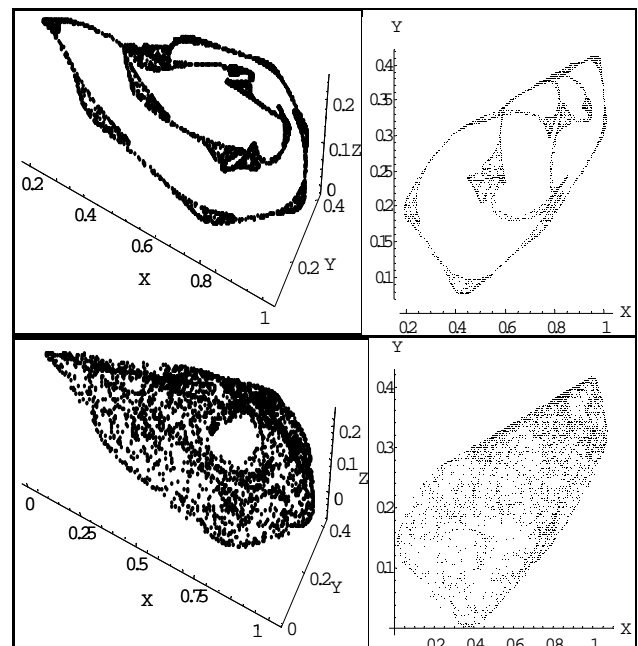


Рисунок 1. Предельные инвариантные кривые модели трех-возрастной популяции в трехмерном фазовом пространстве переменных (слева) и двухмерном (справа). Репродуктивный потенциал (а) увеличивается сверху вниз: 2.45 и 2.57

внутрипопуляционным механизмам регуляции роста численности. Глубокое понимание результатов действия внутрипопуляционных механизмов самоорганизации необходимо для дальнейшего исследования того, что происходит с биологической популяцией при изменении факторов внешней среды. В данной работе мы проведем модельный анализ связи между продолжительностью и сложностью онтогенеза и характером динамического поведения биологического сообщества, учитывая сугубо внутрипопуляционные механизмы регуляции роста численности.

В нашей работе проведен модельный анализ связи между продолжительностью и сложностью онтогенеза и характером динамического поведения биологического сообщества (структурой и размерностью возникающих хаотических аттракторов). На примере однородной популяции показано, что в процессе естественной эволюции должен происходить закономерный переход от устойчивых режимов динамики численности к колебаниям и хаосу (псевдостохастическому поведению), т.е. переход от равновесных режимов динамики к неравновесным. Для более сложных нелинейных моделей динамики популяций с возрастной структурой (продолжительным онтогенезом) увеличение средней индивидуальной приспособленности приводит к возникновению хаотических аттракторов, структура и размерность которых меняются при изменении параметров модели (рисунок 1). Увеличение продолжительности и сложности онтогенеза «в среднем» увеличивает степень хаотизации аттракторов. Вместе с тем, выявлены резонансные значения репродуктивного потенциала при продолжительном онтогенезе, которые обеспечивают окна регуляризации в хаотической динамике (рисунок 2). Можно сказать, что удлинение и усложнение онтогенеза, увеличивая «в среднем» хаотизацию, в конечном итоге способно обеспечить переход «от хаоса к порядку» и даже привести к устойчивым динамическим режимам.

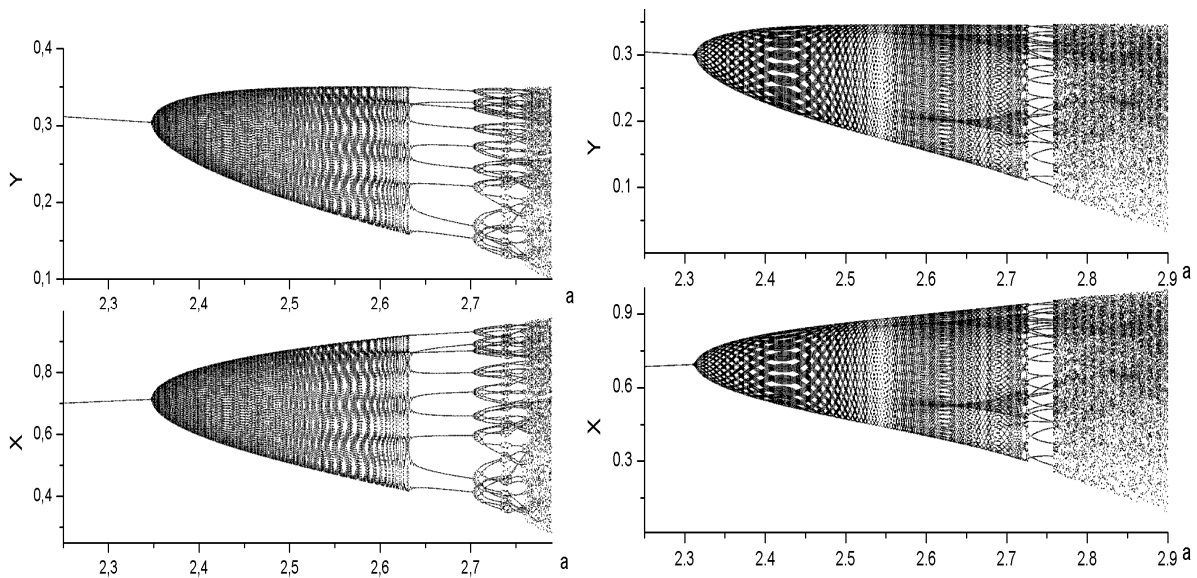


Рисунок 2. Распределение численности младшей (x) и старшей (y) возрастной группы в предельных траекториях (аттракторах) модели двух возрастной популяции (слева) и трех возрастной (справа) в зависимости от величины репродуктивного потенциала

Работа выполнена при финансовой поддержке ДВО РАН (гранты ДВО РАН 09-III-B-01-014, 09-II-SB-06-006), Программы Президиума РАН (грант ДВО РАН 09-I-P15-01), а также Фонда содействия отечественной науке.

МИНИМАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ РЕАКЦИИ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ РОССИИ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ И АНТРОПОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Завалишин Н.Н.

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

Аннотация: рассматриваются минимальные модели круговорота углерода в экосистемах олиготрофных, мезотрофных и эвтрофных болот с элементами азотного и гидрологического циклов. Переход через границы устойчивости равновесных состояний в пространстве параметров, отвечающих интенсивностям ассимиляции углерода растительностью из атмосферы, торфообразования, разложения мертвой органики животными и микроорганизмами, соответствует смене типа болотной экосистемы и может происходить при климатических изменениях и антропогенных воздействиях. Расширение данных локальных моделей на площади типов болот, можно получить оценку изменений относительной доли, занимаемой каждым типом болот в нескольких болотных провинциях Европейской части России и Западной Сибири, при изменениях климата, соответствующих удвоению атмосферного содержания CO_2 .

Порождаемые глобальным потеплением климатические изменения вызывают ответные изменения в динамике экосистем суши, отражающиеся на функционировании их биогеохимических циклов. Эта реакция может привести к серьезным последствиям для окружающей среды, вызвать масштабную смену типов экосистем в течение коротких промежутков времени. Экосистемы болот чувствительны как по отношению к климатическим воздействиям, так и к антропогенным воздействиям, связанным с хозяйственной деятельностью. Климатические и антропогенные влияния отражаются на характеристиках биогеохимического цикла углерода болотной экосистемы, функционирование которого является ключевой характеристикой жизнедеятельности экосистемы и принадлежности ее к тому или иному типу. Задачей настоящей работы является моделирование динамики биогеохимического цикла углерода верховых, переходных и низинных болот при изменении климата и исследование его реакции на антропогенные воздействия.

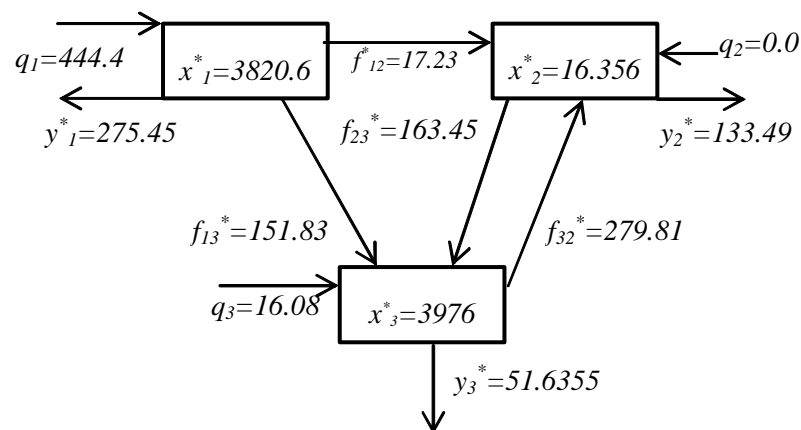


Рисунок 1. Круговорот углерода в экосистемах переходного и низинного ($q_3 \neq 0$), верхового болот ($q_3 = 0$). Данные для переходного болота Европейской России. Резервуары: x_1 – растительность, x_2 – животные и редуценты (грибы, бактерии), x_3 – подстилка и опад. Потоки: q_1 – ассимиляция из атмосферы в процессе фотосинтеза, q_3 – приток из соседних экосистем, y_1, y_2 – дыхание растительности, животных и редуцентов, y_3 – сток, торфообразование и абиотическое окисление, f_{12} – потребление фитофагами, f_{13} – растительный опад, f_{23} – отмирание консументов и редуцентов, f_{32} – разложение мертвой органики редуцентами

Для этой цели построена локальная (на единице площади) минимальная динамическая блоковая модель круговорота углерода для этих типов болот, основанная на простейшей блоковой схеме с тремя резервуарами (рисунок 1). Зависимости потоков от запасов называются потоковыми функциями, и их форма выбирается на основе экспертного знания о механизмах взаимодействия компонентов экосистемы. Для моделирования углеродного цикла пригодны линейные зависимости донорного и реципиентного типа, нелинейные функции вольтеровского типа и с насыщением по одному или обоим запасам (Zavalishin, 2008). Связь азотного и углеродного круговоротов основана на зависимости величин растительного опада и скорости разложения мертвого органического вещества от содержания азота в зеленых частях растений и C/N-коэффициентов. Обнуление притока углерода из внешних источников отвечает состоянию верхового болота. Состояния равновесия динамической модели соответствуют лесному, лесо-топяному и топяному состояниям каждого типа болот. Используя методы теории бифуркаций, можно построить границы областей устойчивости стационарных состояний в пространстве трех параметров, отвечающих интенсивностям ассимиляции углерода растительностью из атмосферы, торфообразования и выноса его из почвы или подстилки, разложения мертвой органики животными и микроорганизмами. Эти параметры зависят от климатических величин – среднегодовой температуры, суммы осадков, влагосодержания почвенного слоя, а также уровня болотных вод. Наряду с равновесиями оказываются возможными колебательные режимы функционирования круговорота, связанные с неравномерностью потребления углерода почвы различными группами редуцентов. Повышение содержания CO₂ в атмосфере ведет к потере устойчивости переходного болота, появлению колебаний запасов в резервуарах или переходу к более бедному равновесному состоянию в зависимости от значений двух других параметров. Скорость разложения мертвой органики и ассимиляция углерода из атмосферы зависят от переменных гидрологического цикла, построенного на основе балансовых соотношений. Численный анализ параметрических портретов показывает границы устойчивости типов болот и позволяет асимптотически установить пределы внешних нагрузок, при которых сохраняется устойчивое функционирование круговорота углерода. Изменение климатических параметров порождает перемещение в параметрическом пространстве, соответствующее эволюции режима функционирования круговорота углерода в болотной экосистеме и как следствие, возможному изменению типа болотной экосистемы. Калибровка коэффициентов семейства модели, а также оценочное соотношение площадей типов болот для некоторых болотных провинций России (Вомперский и др., 2005) позволяют рассчитать динамику круговоротов при удвоении содержания CO₂ в атмосфере по нескольким сценариям для XXI века. Расширяя данные локальных моделей на площади типов болот, можно получить оценку изменений относительной доли, занимаемой каждым типом болот в нескольких болотных провинциях Европейской части России (южная тайга, Тверская обл.) и Западной Сибири (часть Большого Васюганского болота).

Работа поддержана в рамках Программы 12 Отделения наук о Земле РАН.

Литература

- Вомперский С.Э., Сирин А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А., Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия. Известия РАН, серия географическая, - 2005, - №5, - с. 39-50.
- Zavalishin N.N., Dynamic compartment approach for modeling regimes of carbon cycle functioning in bog ecosystems. Ecological Modelling, 2008, v. 213, p. 16-32.

ОЦЕНКА ОБИЛИЯ МЕЛКОРАЗМЕРНОГО НЕКТОНА ПО ДАННЫМ ПИЩЕВЫХ СПЕКТРОВ РЫБ И СОСТАВУ ЗООПЛАНКТОНА

Заволокин А.В.

Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр (ТИНРО-Центр),
Владивосток, Россия

zavolokin@tinro.ru

Аннотация: на основе предложенного ранее метода (Суханов, Заволокин, 2006) по данным пищевых спектров крупных пелагических хищников и по количественному составу зоопланктона оценена биомасса мелкоразмерных рыб и кальмаров в российских водах Берингова моря.

Тихоокеанские лососи обладают высокой пищевой пластичностью. В разных районах качественный и количественный состав их пищи может существенно различаться (Андриевская, 1966; Волков и др., 1997; Карпенко, 1998; Чучукало, 2007; и мн. др.). Как правило, чавыча, кижуч и сима питаются преимущественно рыбой и кальмаром, в то время как горбуша, кета и нерка потребляют в большей степени зоопланктон. Вместе с тем, для всех этих видов общеизвестны случаи переключения питания от зоопланктона к нектону и наоборот, связанные с региональной изменчивостью состава и количества кормовых объектов во внешней среде.

Исходя из этого, обилие недостающих компонентов кормовой базы лососей (личинок и молоди рыб и кальмаров) помимо прямых учетов можно оценить на основе информации об их пищевых спектрах и количественном составе зоопланктона. Решение этой задачи было реализовано с помощью математической модели селективного питания (Суханов, Заволокин, 2006).

На рисунке отражена общая схема алгоритма программы, предназначенной для оценки неизвестных долей пищевых объектов в кормовой базе рыб. На входе программы находятся: (1) пищевые спектры всех хищников, используемых для оценки кормовой базы (в долях), (2) биомассы или доли зоопланктона, входящего в питание рыб (в нашем случае это планктеры крупной фракции), (3) начальные значения оцениваемых параметров — элективностей и неизвестных компонентов кормовой базы.

Рабочая часть программы включает в себя модель селективного питания, ограничения на входящие в ее состав параметры и ряд процедур подгонки параметров (см. рисунок). Результаты расчетов выводятся во внешний файл. Помимо самих значений параметров он содержит их стандартные ошибки, а также другие результирующие показатели, отражающие качество подгонки: финальное значение целевой функции, поправку Марквардта, корреляционную матрицу ошибок параметров и др.

С помощью предложенной модели было оценено обилие мелкоразмерных кальмаров и рыб, входящих в кормовую базу лососей, в западной части Берингова моря в летне-осенний период 2002-2006 гг. Видовой состав нектона существенно различался в разных районах. Среди рыб на шельфе Анадырского залива доминировали в основном молодь минтая *Theragra chalcogramma*, мойва *Mallotus villosus* и песчанка *Ammodytes hexapterus*. Их средняя плотность здесь в отдельные годы доходила соответственно до 104, 96 и 71 мг/м³. В состав кормовой базы лососей входили также сельдь *Clupea pallasii*, молодь северного одноперого терпуга *Pleurogrammus monopterygius*, сайка *Boreogadus saida*, светлоперый стенобрах *Stenobranchius leucopsarus* и лептоклин *Leptoclinus maculatus*. Сравнительно высокой (до 59 мг/м³) была плотность личинок рыб неопределенной видовой принадлежности.

В глубоководных районах Берингова моря основа рыбной составляющей кормовой базы лососей была представлена миктофидами и молодь северного одноперого терпуга. Их обилие здесь находилось в пределах соответственно 1–77 и 0,1–125 мг/м³. Среди основных компонентов в этих районах также выделялись личинки рыб, среди которых, как правило,

преобладал *Sebastes* sp. Их плотность доходила до 126 мг/м³. Молодь шельфовых видов (песчанка, мойва, минтай, камбалы), выносимая течениями в глубоководные районы, также нередко входила в состав кормовой базы лососей.

Среди кальмаров в кормовой базе лососей преобладали два вида — камчатский *Gonatus kamtschaticus* и северный *Gonatopsis borealis* кальмары. Их плотность достигала соответственно 96 и 54 мг/м³. Помимо этих двух видов кальмаров были отмечены *Berryteuthis magister*, *Gonatus madokai*, *G. onyx*, *G. tinro* и *G. berryi*.

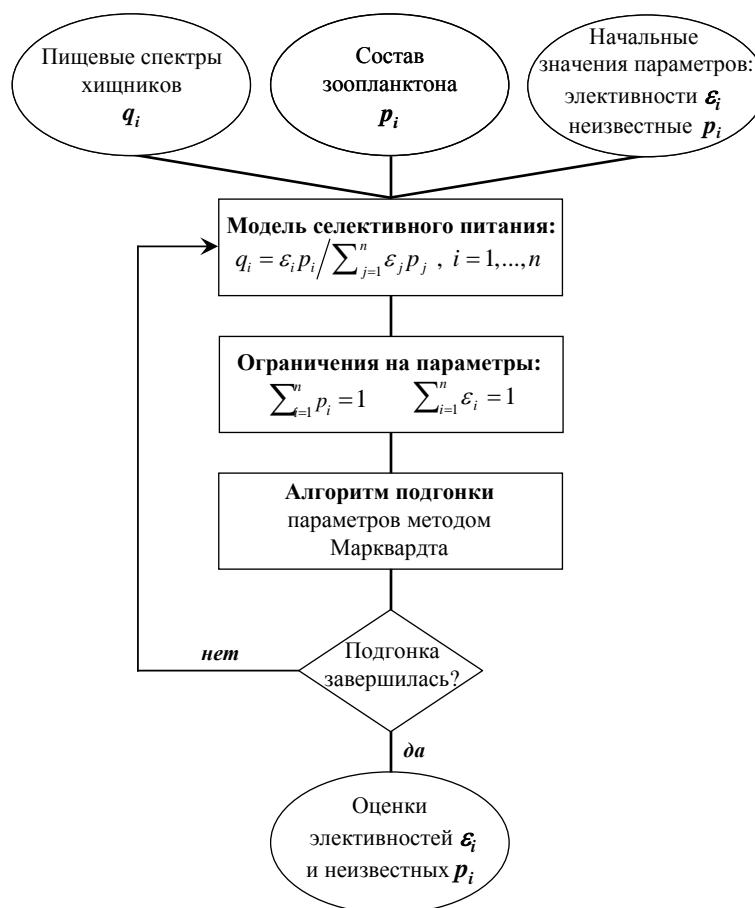


Схема алгоритма модели для оценки неизвестных компонентов в кормовой базе тихоокеанских лососей

Литература

- Андреевская Л.Д. Питание и пищевые взаимоотношения тихоокеанских лососей в море // Вопр. ихтиол.- 1966.- Т. 6, вып. 1 (38).- С. 84-90.
- Волков А.Ф., Ефимкин А.Я., Чучукало В.И. Региональные особенности питания азиатских лососей в летний период // Изв. ТИНРО.- 1997.- Т. 122.- С. 324-341.
- Карпенко В.И. Ранний морской период жизни тихоокеанских лососей.- М.: ВНИРО, 1998.- 165 с.
- Суханов В.В., Заволокин А.В. Оценивание параметров селективности в питании рыб при неполных данных // Вопр. ихтиол.- 2006.- Т. 46, №9.- С. 815-818.
- Чучукало В.И. Питание и пищевые отношения нектона и нектобентоса в дальневосточных морях.- Владивосток: ТИНРО-центр, 2007.- 511 с.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И РЕАЛЬНОСТЬ

Зилов Е.А., Мокрый АВ.

Научно-исследовательский институт биологии при Иркутском государственном университете, Иркутск, Россия
eugenasilow@hotmail.com

Аннотация: рассматриваются прогнозы, полученные в 1990-е годы с помощью размерной модели, точечной модели возмущений и камерной модели возмущений планктонной экосистемы озера Байкал. Предсказывался рост биомассы летнего фитопланктона, снижение биомассы подледного фитопланктона, увеличение биомассы летнего зоопланктона и снижение – подледного. Анализ современного состояния планктона озера Байкал указывает на то, что экосистема ведет себя в соответствии с прогнозами.

Введение

Экологическая система озера Байкал была в числе первых объектов математического моделирования экосистем в стране (см. обзоры Зилов, 1989, 2006). В 1970-е и начале 1980-х годов прошлого столетия было построено достаточно много моделей экосистемы Байкала. Лишь для немногих из них были опубликованы результаты прогнозирования, и совсем уж никогда не поднимался вопрос о том, сбылись эти прогнозы или нет.

Не касаясь чужих моделей, мы решили посмотреть – насколько сбылись прогнозы, полученные с помощью моделей, разработанных одним из авторов в 1980-е – 1990-е годы.

Модельные прогнозы

Размерная статическая модель, построенная на основе аппарата, предложенного У. Боргманном (Borgmann, 1982), исходившего из предположения о том, что размер организма служит грубым указанием его принадлежности к определенному трофическому уровню. На основе рационов, биомасс, продукции и размеров организмов были получены коэффициенты модели, которая достаточно хорошо описывала экосистему озера Байкал (Зилов, 1990, Silow, 1999). Полученные биомассы существенно не отличались от реальных, сохраняя те же соотношения биомасс для разных трофических уровней.

Затем гипотетически предположили присутствие в экосистеме некоего токсиканта, действие которого заключается в том, что для получения того же прироста биомассы «хищнику» требуется проглотить в 1,5 раза большую массу «жертв». Примером такого токсиканта можно считать дизельное топливо, которое в наших лабораторных экспериментах вызывало в концентрации 0,05 мг л⁻¹ увеличение фильтрационной активности зоопланктона в 1,5 раза при той же биомассе, что и в контроле (Спивак и др., 1990). Рассчитанная структура системы в присутствии токсиканта отличалась от реальной гораздо сильнее, чем рассчитанная для «нормы». Наибольшее снижение биомассы имело место в высших трофических уровнях (рыб и нерпы). Возросли биомассы водорослей (существенно) и растительного зоопланктона (незначительно).

Вторая модель – точечная модель возмущений экосистемы пелагиали озера Байкал (Зилов, 1990, Silow et al., 1995, Silow, 1997, 1999). Моделирование поступления извне фенольных соединений, азота и фосфора в планктонную экосистему приводило к снижению биомассы подледного фитопланктона, росту биомассы летних фитопланктона и зоопланктона.

Третья рассматриваемая модель – многокамерная модель возмущений экосистемы пелагиали озера Байкал (Зилов, 1990, Зилов, Стом, 1991, Silow et al., 2001). При моделировании продолжения существовавшего на середину 1980-х – начало 1990-х годов антропогенного давления на экосистему озера в виде поступления биогенов, фенолов, тяжелых металлов, нефтепродуктов, аллохтонной органики и роста минерализации вод

притоков было показано, что экосистема реагирует на возрастание биомассы летнего и снижением биомассы зимнего фитопланктона, некоторым ростом биомассы летнего зоопланктона.

Поведение реальной экосистемы

Анализ современного состояния экосистемы пелагиали озера (Hampton et al., 2008, Moore et al., 2009) показал существенное увеличение биомассы летнего мелкоклеточного фитопланктона, тенденции снижения биомассы подледных эндемичных крупноклеточных водорослей, рост биомассы космополитных видов (циклопа, летнего комплекса коловраток, кладоцер) при неизменности (для эпишуры) или снижении (подледный комплекс коловраток) биомассы эндемиков в зоопланктоне.

Наблюдаемые изменения можно считать, с одной стороны, подтверждением прогнозов трех моделей, а можно – последствиями изменений температурного режима региона в результате глобальных изменений климата, не учитывавшихся моделями. В то же время, это может служить еще одной иллюстрацией положения о схожести реакции экологических систем на стрессовые воздействия разной природы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке контракта № 44-1-2008 с Институтом глобального климата и экологии Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Российской академии наук и аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» по теме № 2.1.1/1359.

Литература

- Зилов Е. А. Математические модели экосистемы озера Байкал; Гидробиологический журнал.– Киев, 1989.– 32 с. – Деп. в ВИНТИ № 5098–В 89 от 01.08.89.
- Зилов Е. А. Модельный эксперимент в водной экотоксикологии (на примере оз. Байкал): Дис. ... канд. биол. наук.– Иркутск, 1990.– 150 с.
- Зилов Е. А. Математическое моделирование экосистемы озера Байкал: вчера, сегодня, завтра / Е. А. Зилов // Известия Самарского НЦ РАН.– 2006.– Т. 8, № 3.– С. 58–64.
- Зилов Е. А., Стом Д. И. Использование физического, математического и комплексного моделирования в прогнозировании поведения водных экосистем под действием антропогенных факторов // Мониторинг состояния озера Байкал.– Л.: Гидрометеоздат, 1991.– С. 233 – 238.
- Спивак А. И., Зилов Е. А., Зубков Д. И., Стом Д. И. Исследование влияния токсикантов на компоненты планктона озера Байкал с применением радиоуглеродного метода // Биология внутренних вод.– 1990.– № 88.– С. 17 – 20.
- Hampton S. E., Izmet'eva L. R., Moore M. V., Katz S. L., Dennis B., Silow E. A. Sixty years of environmental change in the in the world's largest freshwater lake – Lake Baikal, Siberia // *Global Change Biology*.– 2008.– Vol.14. – P. 1947-1958.
- Moore M. V., Hampton S. E., Izmet'eva L. R., Silow E. A., Peshkova E. V., Pavlov B. K. Climate Change and the World's "Sacred Sea"—Lake Baikal, Siberia // *BioScience*.– 2009.– Vol. 59, N 5.– P. 1–13.
- Silow E. A., Gurman V. J., Stom D. J., Rosenraukh D. M., Baturin V. I. Mathematical models of lake Baikal ecosystem // *Ecological Modelling*.– 1995.– Vol. 82.– P. 27 – 39.
- Silow E. A. Mathematical model of ecosystem perturbation // *Handbook of environmental and ecological models*. – Baton Rouge: Lewis Publishers, 1997.– P. 50–51.
- Silow E. A. The use of two lumped models for the analysis of consequences of external influences on the lake Baikal ecosystem // *Ecological Modelling*. – 1999.– Vol. 121.– P. 103 – 113.
- Silow E. A., Baturin V. I., Stom D. J. Prediction of Lake Baikal ecosystem behaviour using an ecosystem disturbance model // *Lakes & Reservoirs: Research and Management*.– 2001.– Vol. 6, N 1.– P. 33–36.

ДИНАМИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕНОБИОНТНЫХ ВИДОВ РАЗНЫХ ЭКОЛОГО-ЦЕНОТИЧЕСКИХ ГРУПП ПО СТАДИЯМ СУКЦЕССИИ

Зубкова Е.В.

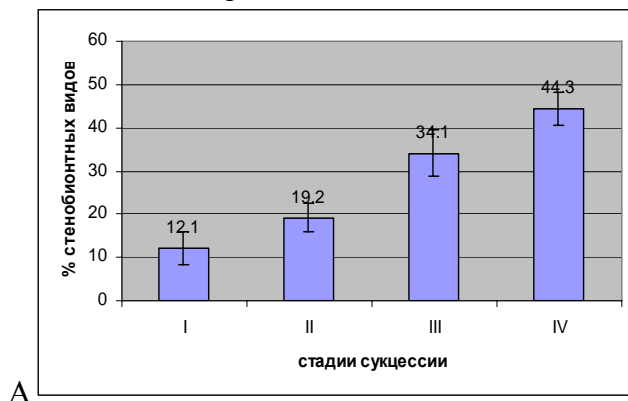
Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН Институтская ул. 2, Пущино, Московская область, Россия
elenazubkova@rambler.ru

Аннотация: показана динамика распределения по эколого-ценотическим группам стенобионтных видов растений в ходе сукцессии на территории задровых местностей Неруссо-Деснянского полесья. Результаты получены с помощью программной системы специализированной обработки геоботанических описаний EcoScaleWin. Результаты составляют основу для разработки моделей динамики лесного напочвенного покрова.

Ранее с помощью программной системы специализированной обработки геоботанических описаний EcoScaleWin (Грохлина и др., 2006, Зубкова и др., 2008) были проанализированы геоботанические описания растительности (ГБО) последовательных сукцессионных стадий задровых местностей Неруссо-Деснянского полесья, сделанные О.И. Евстигнеевым в заповеднике Брянский лес (Евстигнеев, 2004), по отношению к факторам среды по шкалам Д.Н.Цыганова (1983). Были выявлены виды с узкими балловыми диапазонами (стенобионтные виды): по шкале увлажнения почв с шагом до 7 баллов (размах шкалы 23 балла); и по шкале богатства почв азотом с шагом до 5 баллов (размах шкалы 11 баллов).

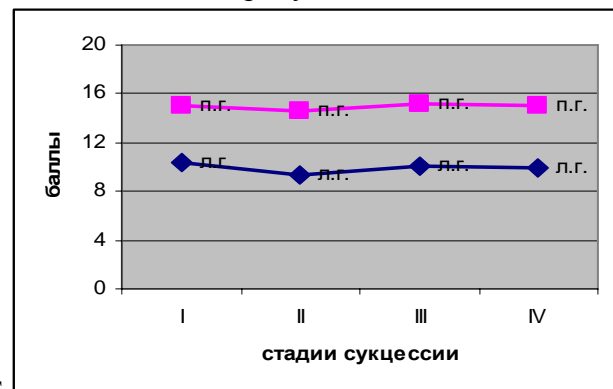
Ранее (Зубкова и др., 2008) было выявлено, что:

1. по ходу сукцессии возрастает абсолютное число видов в ГБО, а также число стенобионтных видов по шкале влажности почв и по шкале богатства почв азотом;
2. по шкале увлажнения почв по ходу сукцессии происходит относительное увеличение доли видов с узкими диапазонами (Рисунок 1А); при этом расположение экологических границ жизни этих видов не смещается по шкале (рисунок 1Б).



А

Рисунок 1А. Участие видов стенобионтных по шкале влажности почв в сообществах: 1-сосняк зеленомошный, 2-сосняк бруснично-зеленомошный с дубом и сосняк чернично-зеленомошный с дубом, 3-березово-дубово-елово-сосновый лес с подростом липы, клена и подлеском лещины, 4-полидоминантный хвойно-широколиственный лес с дубом



Б

Рисунок 1Б. Экологические границы жизни видов стенобионтных по шкале влажности почв: л.г. - левая граница, п.г. - правая граница. Обозначения стадий сукцессии те же, что на рисунке 1А

2. По ходу сукцессии доля стенобионтных видов по фактору богатства почвы оказалась постоянной (Рисунок 2А), однако идет замещение видов на более требовательные к богатству почв, что можно оценить по смещению их экологических границ в сторону увеличения богатства почвы (Рисунок 2Б).

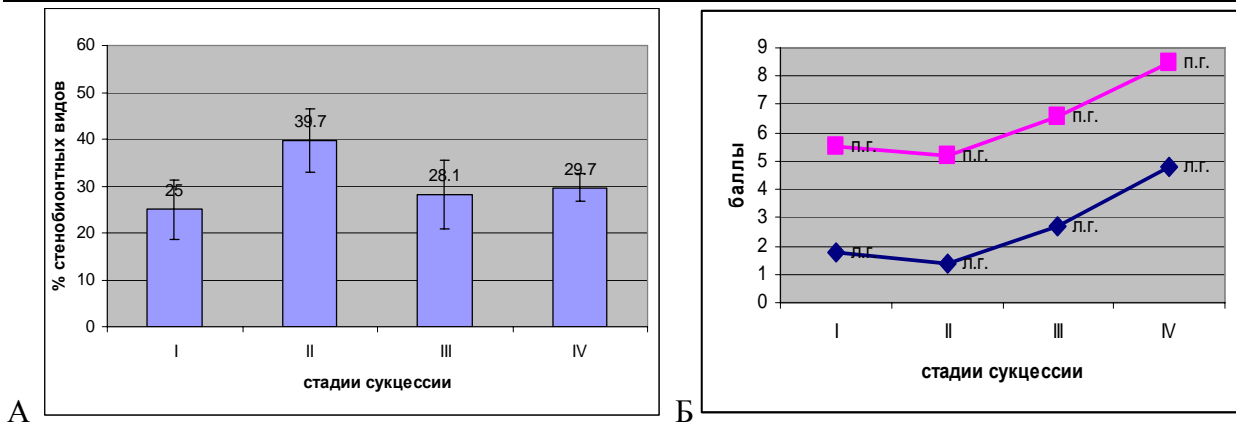


Рисунок 2А. Участие видов стенобионтных по шкале богатства почв азотом. Обозначения стадий сукцессии те же, что на рисунке 1А

Рисунок 2Б. Экологические границы жизни видов стенобионтных по шкале богатства почв азотом: л.г. - левая граница, п.г. - правая граница. Обозначения стадий сукцессии те же, что на рисунке 1А

В настоящей работе рассмотрена принадлежность стенобионтных видов по этим факторам к разным эколого-ценотическим группам (Ханина и др., 2006).

Выявленные изменения показывают уменьшение участия видов боровой и бореальной групп растений, что связано с усилением конкуренции с вновь внедряющимися видами, приходящими на участки более богатых почв, формирующихся в ходе жизнедеятельности биогеоценоза; свидетельством и следствием чего является увеличение участия растений неморальной и нейтрофильной групп. Увеличение доли участия луговых видов на второй и третьей стадии сукцессии можно связать с улучшением почвенных условий (от очень бедных (3 балла) до достаточно обеспеченных азотом (7 баллов) и с более редким пологом (в среднем 5-20% покрытия верхнего яруса на II и 30-40% покрытия на III стадии по сравнению с 40-60% покрытия на I и почти 100% покрытием на IV стадии сукцессии). Уменьшение луговых видов на IV стадии можно объяснить увеличением сомкнутости полога.

Все результаты обработки демонстрируют очень уверенные закономерности изменения структуры растительных сообществ при изменениях факторов среды в процессе сукцессии и могут быть использованы при создании модели динамики лесного напочвенного покрова.

Работа поддержана грантом РФФИ, проект 07-04-00952.

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 заповедных местностей (на примере заповедника «Брянский лес» и окружающих территорий) // Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. М., 2004. Кн. 2. / Ред. О. В. Смирнова. - М.: Наука. - С. 245-260.
- Зубкова Е.В., Евстигнеев О.И., Комаров А.С. О динамике распределения реализованных экологических ниш растений при сукцессии // Математическая биология и биоинформатика: II Международная конф., г. Пущино, 7-13 сентября 2008 г.: Доклады / Под ред. В.Д. Лахно. - С.219-220.
- 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.
- Ханина Л.Г., Бобровский М.В., Комаров А.С., Михайлов А.В., Быховец С.С., Лукьянов А.М. Моделирование динамики разнообразия лесного напочвенного покрова // Лесоведение. - 2006, №1. - С. 70-80.
- Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. - М.: Наука, 1983. - 196 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНО-ВОЗРАСТНОЙ ДИНАМИКИ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ГОРНЫХ ТЕМНОХВОЙНЫХ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ СВЯЗАННЫХ ЛОГИСТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Иванова Н.С.

Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Россия

i.n.s@bk.ru

Аннотация: приведен обзор результатов наших исследований по изучению восстановительно-возрастной динамики лесной растительности после сплошных рубок в горах Южного Урала.

Изучению восстановительно-возрастной динамики лесной растительности посвящены многочисленные исследования. Накоплен обширный материал для разных континентов, климатических зон и лесорастительных условий. Анализ этого материала из-за многообразия и сложности лесных экосистем затруднен. Возникла настоятельная необходимость в формализации данных и количественном описании процессов.

Цель наших исследований: на основе систем связанных логистических уравнений моделирование альтернативных линий развития растительности в пределах одного коренного типа леса с учетом сопряженности динамики ярусов лесной растительности (древесного, травяно-кустарничкового, мохового) и отдельных видов, что является дальнейшим развитием принципов генетической типологии (Колесников, 1956). Основные задачи: определение динамических характеристик экосистем, выявление внутриэкосистемных зависимостей (работа выполнена по Программе Президиума РАН «Биологическое разнообразие»).

Исследования проводились (1991-1996 гг.) на территории лесов Катав-Ивановского лесхоза Челябинской области, которые типичны для западных низкогорий Южного Урала. Изучены преобладающие лесорастительные условия: пологие склоны нижнего высотного пояса. Характеристику района, объектов и методики исследований можно найти в наших работах (Иванова, 2007, 2008). Для моделирования использованы системы из двух, трех, четырех и пяти связанных дифференциальных логистических уравнений. Решение систем дифференциальных уравнений проведено в программе *MathCAD 2001* по методике Г.П. Быстрая с использованием разработанного им программного продукта. Решалась обратная задача. Подробное описание принципов моделирования и методики решения системы дифференциальных уравнений приведены ранее (Иванова, 2009а, б, в).

Нами проанализировано два альтернативных эколого-динамических ряда восстановления и развития лесных фитоценозов после сплошных рубок темнохвойных лесов: коротко-производные березняки (Иванова, 2009а) и длительно-производные березняки (Иванова, 2009б). Выявлено, что системы связанных дифференциальных уравнений хорошо описывают восстановительно-возрастную динамику лесной растительности, позволяют не только определить динамические характеристики экосистем, характер и уровень взаимозависимостей между отдельными подсистемами, но и корректно на количественном уровне сравнивать различные эколого-динамические ряды восстановления и развития сообществ. Также наш подход позволяет разобраться в причинно-следственных связях, выявить и количественно оценить запаздывание восстановления отдельных компонентов экосистем и, в ряде случаев, определить время, необходимое для восстановления исходной структуры сообществ.

Для примера приведем результаты моделирования сопряженности восстановительно-возрастной динамики трех видов древесного яруса (березы, ели, пихты) и трех видов травяно-кустарничкового яруса в процессе формирования длительно-производных березняков (рисунок 1). Решается система из пяти связанных дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_1}{dt} = A_1 x_1 - B_1 x_1^2 + C_{15} x_1 x_5 \end{array} \right.$$

$$\frac{dx_2}{dt} = A_2x_2 - B_2x_2^2 + C_{21}x_1x_2 + C_{23}x_2x_3 + C_{24}x_2x_4 + C_{25}x_2x_5$$

$$\frac{dx_3}{dt} = A_3x_3 - B_3x_3^2 + C_{31}x_3x_1 + C_{32}x_3x_2 + C_{34}x_3x_4 + C_{35}x_3x_5$$

$$\frac{dx_4}{dt} = A_4x_4 - B_4x_4^2 + C_{41}x_4x_1 + C_{42}x_4x_2 + C_{43}x_4x_3 + C_{45}x_4x_5$$

$$\frac{dx_5}{dt} = A_5x_5 - B_5x_5^2 + C_{51}x_5x_1 + C_{52}x_5x_2 + C_{53}x_5x_3 + C_{54}x_5x_4$$

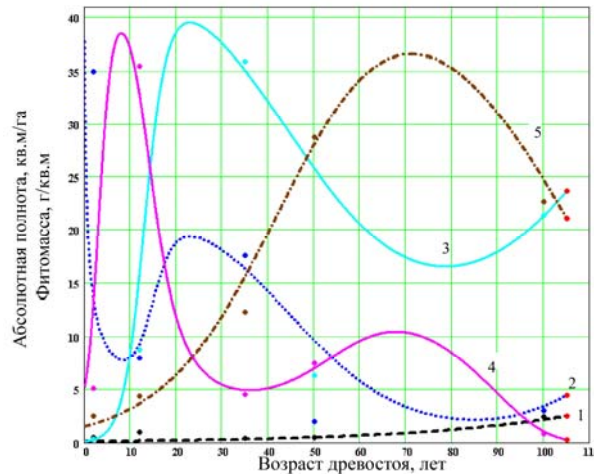


Рисунок 1. Моделирование сопряженной восстановительно-возрастной динамики березы, темной хвойной компоненты древостоя и фитомассы (в абсолютно-сухом состоянии) трех видов трав: *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth., *Carex pilosa* Scop. и *Brachypodium pinnatum* (L.) Beauv. в процессе формирования длительно-производных березняков: 1 - абсолютная полнота ели сибирской и пихты сибирской (кв.м/га), 2 - фитомасса *Calamagrostis arundinacea* (г/кв.м), 3- фитомасса *Carex pilosa* (г/кв.м), 4 – фитомасса *Brachypodium pinnatum* (г/кв.м), 5- абсолютная полнота березы (кв.м/га); точки - статистические данные, линии - результаты решения уравнений (последняя точка на них – прогноз на 5 лет). Коэффициенты уравнений:
 $A_1 = 0.032$; $B_1 = 0.0012$; $C_{15} = -0.000018$; $A_2 = 0.56$; $B_2 = 0.051$; $C_{21} = -0.13$; $C_{23} = 0.015$; $C_{24} = -0.0047$;
 $C_{25} = -0.015$; $A_3 = 0.44$; $B_3 = 0.012$; $C_{31} = -0.0041$; $C_{32} = 0.0041$; $C_{34} = 0$; $C_{35} = -0.0071$; $A_4 = 0.85$; $B_4 = 0.018$;
 $C_{41} = -0.29$; $C_{42} = -0.0088$; $C_{43} = -0.014$; $C_{45} = -0.0041$; $A_5 = 0.82$; $B_5 = 0.0014$; $C_{51} = -0.036$;
 $C_{52} = 0$; $C_{53} = 0$; $C_{54} = -0.0041$.

Литература

- Иванова Н.С. Динамика продуктивности травяно-кустарничкового яруса в лесах западных низкогорий Южного Урала // Ботанический журнал.- 2007.- Т. 92.- № 9.- С.1427-1442.
- Иванова Н.С., Андреев Г.В. Естественное восстановление структуры ценопопуляций ели сибирской и пихты сибирской под пологом коротко-производных березняков в горах Южного Урала // Аграрный вестник Урала.- 2008.- № 7.- С. 75-77 (www.avu.usaca.ru или www.m-avu.narod.ru).
- Иванова Н.С. Исследование сопряженности восстановительно-возрастной динамики древостоя и подчиненных ярусов в коротко-производных березняках западных низкогорий Южного Урала // Аграрный вестник Урала.- 2009а.- № 1.- С. 76-79 (www.avu.usaca.ru или www.m-avu.narod.ru).
- Иванова Н.С. Сопряженность восстановительно-возрастной динамики древостоя и подчиненных ярусов в длительно-производных березняках западных низкогорий Южного Урала // Аграрный вестник Урала.- 2009б.- № 2.- С. 79-82. (www.avu.usaca.ru или www.m-avu.narod.ru).
- Иванова Н.С. Моделирование продуктивности травяно-кустарничкового яруса в коротко-производных березняках западных низкогорий Южного Урала // Аграрный вестник Урала.- 2009в.- № 4.
- Колесников Б.П. Кедровые леса Дальнего Востока // Тр. Дальневост. фил. АН СССР. Сер. ботан.- М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956.- Т.2 (4).- 264 с.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ В ТАЕЖНЫХ ЛЕСАХ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

Исаев А.С.¹, Суховольский В.Г.^{2,3}, Ковалев А.В.³, Овчинникова Т.М.², Тарасова О.В.⁴

¹Центр по проблемам и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

asi@cepl.rssi.ru

²Институт леса им.В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

soukhovolsky@yandex.ru

³Международный научный центр исследований экстремальных состояний человека при Президиуме КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

sunhi.nm.ru

⁴Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

olvitarasova@mail.ru

Аннотация: работа посвящена моделированию процесса организации лесознтомологического мониторинга. Рассмотрены модели, позволяющие найти оптимальные схемы мониторинга при заданном компромиссе между экологической эффективностью мониторинга и затратами на его проведение

Минимизация ущерба от воздействия лесных насекомых на таежные леса Сибири требует разработки схемы лесознтомологического мониторинга и проведения защитных мероприятий. Использование такой сети мониторинга позволяет своевременно провести защитные мероприятия по снижению численности вредителей уже на начальных этапах вспышек массового размножения. Для финансовых структур идеальной схемой мониторинга будет такая система наблюдений за популяциями, при которой минимум экологических рисков повреждения насаждений при достигается минимуме денежных затрат (или вообще без затрат). Однако такая идеальная схема не может быть реализована, и при разработке систем лесознтомологического мониторинга и планировании защитных мероприятий обычно приходится находить некоторые компромиссы между задачей сохранения лесов и ограниченностью финансовых ресурсов, выделяемых для лесозащиты. Такие компромиссы большей частью основаны на достижении определенного уровня экологической эффективности лесозащиты при некотором (обычно заданном) уровне финансовых затрат. В работе рассмотрены некоторые модельные представления, позволяющие находить оптимальные компромиссы между экологическими и экономическими рисками, существующими в лесозащите.

При оценке финансовых рисков мониторинга учитывается связь между текущими затратами на мониторинг и затратами на защитные мероприятия в случае возникновения вспышек массового размножения определенной интенсивности. Денежная оценка экологических рисков включает оценку товарной цены древесины при повреждениях насаждений насекомыми и денежные оценки потерь экологических полезностей леса (депонирования углерода, рекреации и т.п.). В условиях Сибири, где многие леса не имеют экономической ценности вследствие отдаленности от населенных пунктов и невозможности транспортировки заготовленной древесины, товарная стоимость древесины близка к нулевой и, если не учитывать нетоварные полезности леса, экономические стимулы для защиты таких насаждений отсутствуют. Однако при учете экологических полезностей других типов необходимость и эффективность лесознтомологического мониторинга неоспорима.

Разработанная модель включает в себя:

- компьютерную имитационную модель динамики численности популяций насекомых – вредителей для оценки краткосрочных рисков возникновения вспышек их массового размножения с учетом воздействия модифицирующих факторов;
- схему оценки экологической полезности объектов мониторинга – лесных насаждений;
- схему Парето-оптимизации системы лесозащитного мониторинга, позволяющей в целом для региона оценить оптимальные расходы на мониторинг отдельных видов насекомых-вредителей с учетом сопряженности популяционной динамики этих видов;
- модель оптимизации пространственной структуры мониторинга.

Для решения этой задачи используется модификация хорошо известной в экономике схемы диверсификации Марковица при создании оптимального портфеля акций;

- модель принятия решений о проведении истребительных мероприятий на основе имитационной модели динамики численности вида насекомых – вредителей;
- многоуровневая межрегиональная модель распределения бюджетных финансовых ресурсов в системе лесозащиты, позволяющая максимально быстро финансировать защитные мероприятия с учетом конечности (один год) периода возможного использования этих ресурсов.

Использование этих моделей позволяет оптимизировать организацию защиты таежных лесов с учетом экономической и экологической целесообразности.

Работа поддержана РФФИ (грант 08-04-00217).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В ПРЕСНЫХ И СОЛЕННЫХ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Картушинский А.В.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

kartalvas@rambler.ru

Аннотация: представлены результаты численного моделирования на одномерной модели переноса тепла и массы для различных стратификационных условий обусловленных изменениями режима солености и соответствующего распределения клеток фитопланктона. Рассматриваются условия, при которых биомасса фитопланктона с отрицательной и положительной плавучестью, основанных на кинетических показателях роста и отмирания фитопланктона распределяется под действием турбулентного перемешивания, вертикальной адвекции тепла и соли, циклических колебаний вертикальной скорости водных масс. Численные эксперименты показывают важность оценки состояния водных экологических систем по стратификационным условиям, связанным с изменчивостью режима солености под действием осадков и испарения.

1. Введение

Наиболее важными показателями структурной организации распределения фитопланктона можно считать пространственные и временные масштабы изменчивости гидрофизических факторов. Такие факторы, как адвективный и конвективный перенос тепла и массы, интенсивность турбулентной диффузии в водных системах приводят к неоднородному распределению живых организмов, изменяя условия функционирования системы в целом. В механизме эволюции экологических систем специфика внешнего воздействия отражена в цикличности динамических процессов и факторов, которые часто выступают в качестве генератора, обеспечивающего оптимальную настройку трофических связей внутри экосистемы. Одним из важных факторов обуславливающих вертикальную структуру распределения фитопланктона является соленостный режим, который формирует плотностную стратификацию водных экосистем. При исследовании закономерностей формирования вертикального распределения фитопланктона в водных экосистемах основное внимание уделяется плотностной стратификации, обусловленной температурным режимом. Соленостному режиму уделяется недостаточное внимание вследствие сложности проведения инструментальных наблюдений на природных объектах, хотя соленость оказывает значительное влияние на плотностную стратификацию, и на пространственное распределение фитопланктона. Также следует отметить, что существует диспропорция между степенью изученности гидрофизических процессов в пресных и соленых экосистемах. Математическое моделирование факторов воздействия на распределение и функционирование фитопланктона, отражающего суть первичного продуцирования экосистемы, позволяет выявлять динамические особенности влияния факторов внешней среды и проводить анализ связи между изменяющейся средой обитания и пространственно-временными изменениями структуры биотических компонент водной экосистемы.

2. Объекты и методы

В работе показаны результаты математического моделирования динамических процессов в водных экосистемах с различным соленостным режимом, основанных на детерминированном подходе с численной аппроксимацией задач решения дифференциальных уравнений переноса тепла и соли под действием турбулентной диффузии и скорости вертикального переноса воды.

Реализована математическая модель, позволяющая оценивать роль отдельных факторов ответственных за формирование пространственного распределения фитопланктона: - метеорологических факторов (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). Блок-схема модели представлена на рисунке.

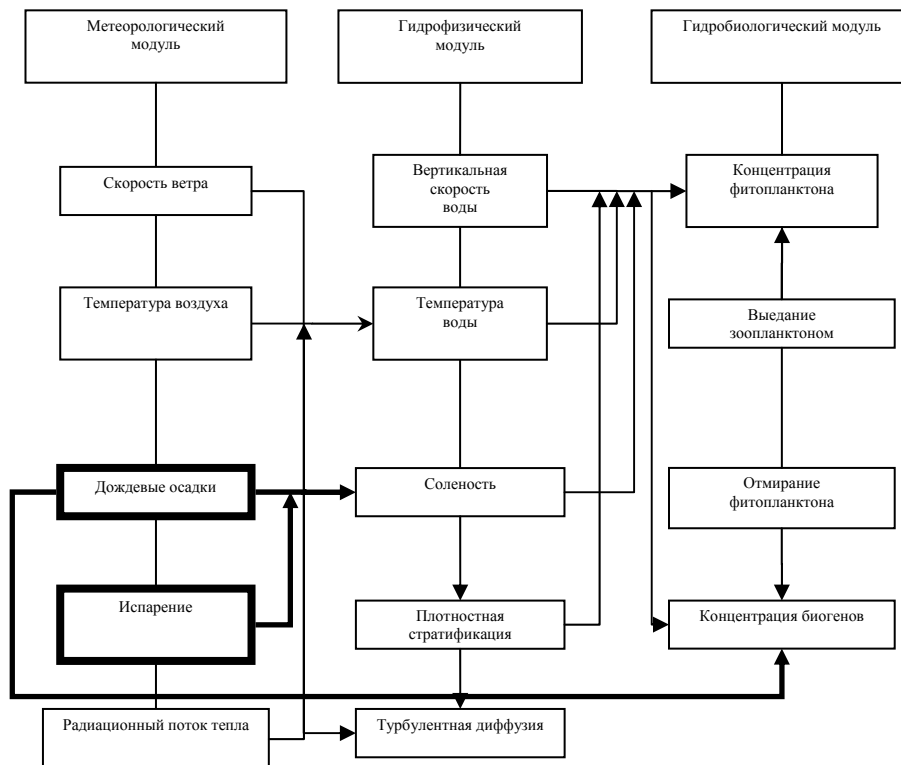


Рисунок. Блок-схема математической модели

Калибровка модели и оценка точности результатов численного моделирования проведена по натурным данным для пресного озера Байкал и солоноватого озера Шира (Хакасия), основанным на измерениях метеорологических, гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров.

3. Выводы

Посредством одномерной математической модели проведены численные эксперименты, направленные на изучение вертикальных динамических процессов в водных экосистемах с различным распределением солености и анализируется следующая связь: структурные изменения параметров среды обитания – пространственно-временные изменения биотических компонент водной экосистемы (биомасса фитопланктона, концентрация лимитирующего биогенного элемента).

Без детального изучения особенностей влияния факторов окружающей среды на биологические объекты, т.е. без исследования кратковременных тенденций развития процессов и поиска взаимосвязей между атмосферными, гидрофизическими, гидрохимическими процессами и живыми организмами во внутрисуточной цикличности, успешное прогнозирование изменчивости состояния водных экологических систем затруднено. Также необходимы знания о характере влияния динамических процессов переноса тепла, массы и количества движения в экосистемах на формирование пространственных неоднородностей фитопланктона при различных стратификационных условиях.

ВЛИЯНИЕ МНОГОЛЕТНИХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ НА ДИНАМИКУ ЧИСЛЕННОСТИ ЯПОНСКОГО ЖУРАВЛЯ И ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО АИСТА

Кастрикин В.А.¹, Парилов М.П.¹, Игнатенко С.Ю.²

¹Государственный природный заповедник «Хинганский», Архара, РФ
kastrikin@hingan.amur.ru

²Государственный природный заповедник «Зейский», Зeya, РФ
tukuringra@mail.ru

Аннотация: сделана попытка объяснить динамику численности японского журавля и дальневосточного аиста в бассейне р. Амур исходя из количества выпадающих здесь осадков.

1. Введение

Японский журавль (*Grus japonensis*) и дальневосточный аист (*Ciconia boyciana*) занесены в Красную Книгу России и Список глобально угрожаемых птиц МСОП как исчезающие. Для их сохранения необходимо знание факторов, оказывающих существенное влияние на размножение и выживание потомства. Так как оба вида являются околоводными и выкармливают своих птенцов гидробионтами, амфибиями и рыбой, логично предположить, что обводненность территории гнездования находится в прямой связи с успешностью размножения этих редких видов птиц. Мы поставили перед собой задачу проверить это предположение и, если оно верно, предложить прогноз динамики численности видов на ближайшие годы на территорию Амурского экорегиона.

2. Объекты и методы

Данные о численности территориальных пар японского журавля и дальневосточного аиста взяты из Летописи Природы Хинганского заповедника за 1980-2007 год (Летопись, 1978-2007) и по материалам других авторов (Дымин, Панькин, 1975; Панькин, Нефельдт, 1976; Винтер, 1978). Данные о количественных характеристиках атмосферных осадков по 16 метеостанциям, расположенным в бассейне Амура на территории РФ и КНР были любезно предоставлены Л.В.Груза и А. Кокориным.

Кроме реальных данных, мы пользовались сглаженными. Для длинных (70-115 лет) рядов с гидрометеостанций мы использовали процедуру 7-и летнего медианного сглаживания, для остальных – 3-х летнего. Оценка силы связи проводилась коэффициентом корреляции Спирмена.

3. Результаты

Водно-болотные угодья (ВБУ) Хинганского заповедника имеют преимущественно дождевое питание и свою многолетнюю динамику, связанную с обилием осадков (Кастрикин, 2006). Мы считаем, что уровень воды на болотах следующей весной, во время сезона размножения журавлей и аистов, определяется дождями, прошедшими с августа по октябрь предыдущего года (Парилов и др., 2006). Снега зимой выпадает мало и он не оказывает влияния на уровень весенней обводненности территории.

Учитывая такое свойство биологических систем высокого порядка как инертность, можно с высокой степенью надежности утверждать о влиянии на успех размножения изучаемых объектов не только осенних осадков прошлого года, но и осадков ряда предыдущих лет. Для проверки такого влияния нами было смоделировано относительное обилие влаги на ВБУ с учетом влияния предыдущих лет (использование разных весов для переменных): $ООВ=1,5*(X_{n-1})+1,2*(X_{n-2})+0,8*(X_{n-3})+0,5*(X_{n-4})$, где ООВ – относительное обилие влаги в год X. Выбор коэффициентов субъективен.

Связь между предложенной моделью и средней величиной слетков аиста оказалась довольно сильной ($R=0,60$, $p=0,003$). Коэффициент корреляции между моделью накопления осадков и количеством размножающихся пар японского журавля в заповеднике также высок ($R=0,63$, $p=0,00056$).

График на рисунке 1 показывает сглаженные стандартизованные динамики численности размножающихся пар японского журавля и гнездящихся пар дальневосточного аиста на фоне сглаженной динамики осадков за август-октябрь. Для удобства восприятия данные по птицам стандартизованы. К непрерывным рядам наблюдений, имеющимся в Летописи природы Хинганского заповедника, добавлены отрывочные сведения из литературных источников. На графике, охватывающем 40-летний период наблюдений, хорошо заметно сходство тенденций изменения числа территориальных пар журавлей, размножающихся пар дальневосточного аиста и количества атмосферных осадков в осенний период.

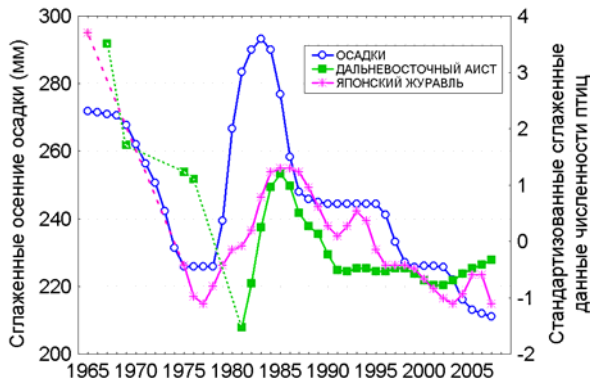


Рисунок 1. Динамика осадков и численности журавлей и аистов



Рисунок 2. Интегрированная кривая динамики осадков в Амурском экорегионе

Материалы литературных источников и результаты собственного анализа данных по 16 ГМС в Амурском экорегионе (рисунок 2) позволяют утверждать, что одни и те же закономерности формирования осадков или стока проявляются здесь одновременно и на огромных пространствах. Сопоставив интегрированную кривую осадков (рисунок 2) со сглаженной динамикой численности журавлей и аистов (рисунок 1), можно заметить, что обе тенденции очень схожи. Из этого следует, что условия для размножения аистов и журавлей периодически меняются на всей материковой территории их обитания. Наиболее выраженные периоды, вероятно, повторяются с периодичностью 22-36 лет.

4. Выводы

Условия размножения обитающих в бассейне Амура японских журавлей и дальневосточных аистов находится в прямой зависимости от количества выпадающих здесь осадков.

Учитывая периодичность процесса, очередной рост численности количества гнездящихся пар журавлей и аистов следует ожидать в 2012-2013 гг.

Литература

- Кастрикин В.А. Предварительный анализ влияния глобального потепления климата на изменение некоторых гидрологических и метеорологических характеристик территории Хинганского заповедника // Влияние изменения климата на экосистемы бассейна реки Амур. – М.: WWF России, 2006. – С. 42-46.
- Парилов М.П., Игнатенко С.Ю., Кастрикин В.А. Гипотеза влияния многолетних гидрологических циклов и глобального изменения климата на динамику численности японского, даурского журавлей и дальневосточного аиста в бассейне реки Амур // Влияние изменения климата на экосистемы бассейна реки Амур. – М.: WWF России, 2006. – С. 92-109.
- Летопись природы Хинганского заповедника: Т. IV-XXXI 1978-2007.
- Дымин В.А., Панькин Н.С. О гнездовании и пролете аистов *Ciconiidae* и журавлей *Gruidae* в Верхнем Приамурье // Орнитологические исследования на Дальнем Востоке. Владивосток. 1975. С. 263-267.
- Винтер С.В. Гнездование черноклювого белого аиста *Ciconia boyciana* Swinhoe, в Среднем Приамурье // Систематика и биология редких и малоизученных птиц АН СССР, Труды Зоологического института, Т.76. Ленинград. 1978. С. 9-23.
- Панькин Н.С., Нейфельдт И.А. Дальневосточный белый аист в Амурской области// Редкие, исчезающие и малоизученные птицы СССР. Тр. Окского гос. заповедника. Вып. XIII 1976. С. 86-92.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АЗОТНЫХ ВЫПАДЕНИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ МОДЕЛЕЙ EFIMOD

Квиткина А.К.¹, Шанин В.Н.²

¹Пущинский государственный университет, Пущино, Россия

²Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, Пущино, Россия

aqvya@mail.ru

Аннотация: индивидуально-ориентированная система моделей EFIMOD была использована для имитации динамики лесной растительности в региональном масштабе, в качестве входных данных использовались материалы лесоустройства. Модельный эксперимент проводился по трем лесохозяйственным сценариям при четырех уровнях поступления соединений азота из атмосферы. Показано влияние уровня азотных выпадений на продуктивность и баланс биогенных элементов в системе «лес-почва».

1. Введение

В 80-х годах XX века в центральной и западной Европе, на севере Европейской части России была отмечена тенденция увеличения темпов роста древостоев (Моделирование..., 2007). Факторы ускорения роста исследовались в рамках проекта «Recognition» (Kahle et al., 2008) с помощью моделей лесных экосистем, в том числе EFIMOD. Все модели определили увеличение поступления соединений азота из атмосферы в качестве основного фактора повышения продуктивности лесов в западной и центральной Европе.

В данной работе анализировалось влияние уровня азотных выпадений на продуктивность и основные характеристики лесных экосистем при различных сценариях ведения хозяйства на примере Данковского лесничества опытного лесного хозяйства «Русский лес» с использованием системы моделей EFIMOD.

2. Объект и методы исследования

Данковское лесничество ОЛХ «Русский лес» Серпуховского района Московской области имеет площадь 6632,2 га. На начало моделирования на его территории преобладали пионерные сообщества – березняки, сосняки, осинники занимали соответственно 51%, 20%, 11% территории. Ельники покрывали 10% территории лесничества. Преобладали средневозрастные (40%) и приспевающие (44%) древостои. По типам лесорастительных условий преобладали мезофильные и мезогигрофильные сложные боры и субори.

Данковское лесничество находится между двумя крупными агломерациями: Московской и Тульской. По данным Роскомгидромета РФ (1994-2004 гг.) на данную территорию ежегодно поступает 11-14 кг азота на га.

На основе материалов лесоустройства 1990 года были генерированы входные данные для модели (Шанин и др., 2008). Продолжительность периода моделирования – 103 года. Результаты моделирования анализировались по следующим показателям: влияние поступления соединений азота из атмосферы на динамику запасов углерода в древостое, сухостое и валеже, в почвенных пулах, на изменение продуктивности древостоев.

Система имитационных моделей EFIMOD, разработанная для анализа сопряженной динамики почвы и растительности в лесных экосистемах бореальной зоны, детально описана в (Моделирование динамики..., 2007). Структура системы моделей позволяет использовать в качестве входных параметров стандартные данные лесоустройства и начальные пулы углерода и азота в почве. Выходными переменными системы являются данные лесоустройства, пулы углерода и азота в почве, древостое, сухостое и валеже, эмиссия CO₂ и другие характеристики. Модель объединяет популяционный и балансовый подходы и позволяет применить кратко- и долгосрочное прогнозирование на уровне древостоя, совокупности древостоев и для региональных оценок.

3. Анализ результатов моделирования

Под общим запасом углерода экосистемы в данной версии модели мы понимаем совокупность трех пулов: углерода почвы, биомассы древостоя, валежа и сухостоя. Для проведения модельного эксперимента были разработаны 3 сценария: **А** – без рубок; **Б** – с выборочными рубками; **В** – с рубками ухода и последующими сплошными рубками. Нами для каждого сценария использовались четыре варианта поступления азота: 0, 6, 12 и 18 кг азота на га в год. Максимальные значения запаса углерода на окончание моделирования характерны для сценария **А** (от 300 тС/га при отсутствии азотных выпадений до 370 тС/га при поступлении 18 кгN/га в год). В сценарии **Б** запас углерода стабилизируется на уровне 200-240 тС/га. В сценарии **В** запас углерода в экосистеме находится на уровне 180-220 тС/га. В сценарии **Б** и **В** после начала массовых рубок система начинает терять углерод. Увеличение азотных выпадений приводит к сглаживанию потерь углерода при выносе его с рубками. За время моделирования запас углерода при сценарии **Б** уменьшается на 130 тС/га при отсутствии азотных выпадений и на 95 тС/га при 18 кгN/га в год, при сценарии **В** происходит уменьшение запаса углерода, соответственно, на 150 тС/га и 107 тС/га. Только для сценария **А** общий запас углерода увеличивается. Динамика общего запаса углерода на территории следует за динамикой древостоя.

Почвенный пул углерода в модели состоит из четырех фракций: углерода опада, лесной подстилки, лабильного и стабильного гумуса. Пул углерода опада сильно варьирует по годам и не имеет общей тенденции к увеличению или снижению. Углерод накапливается в лесной подстилке, стабильном и лабильном гумусе, причем именно лесная подстилка дает наибольший прирост запаса почвенного углерода. Увеличение уровня азотных выпадений приводит к дополнительному запасанию 1,5-3,5 тС/га в лесной подстилке за время моделирования. Изменение пула углерода стабильного гумуса зависит от уровня азотных выпадений. При отсутствии выпадений азота содержание углерода в стабильном гумусе падает при всех трех сценариях, достигает первоначального уровня при поступлении 6 кг N/га (**А**), 12 кг N/га (**Б**) и 18 кг N/га (**В**). Пул углерода лабильного гумуса при всех уровнях поступления азота увеличивается в сценарии **А**, падает в сценарии **В**, не изменяется в **Б**.

4. Выводы

Динамика общего запаса и отдельных пулов углерода экосистемы будут в большей степени зависеть от сценария лесопользования, нежели от уровня азотных выпадений.

Увеличение поступления соединений азота приводит к вовлечению дополнительного углерода в биологический круговорот, росту первичной продуктивности и эмиссии углекислого газа, увеличению запаса углерода в почвенном и древесном пулах. Уровень азотных выпадений не повлиял на пул углерода валежа и сухостоя. Последовательное увеличение азотных выпадений на каждые 6 кг на га приводит к увеличению суммарной чистой первичной продукции за моделируемый период примерно на 40 тС/га для сценария **А** и на 30 тС/га для сценариев **Б** и **В**, увеличению эмиссии углекислого газа на 5-9 тС/га для всех сценариев.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 16 «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы».

Литература

- Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / (отв. ред. В.Н. Кудеяров).- М.: Наука, 2007.- 380 с.
- Шанин В.Н., Михайлов А.В., Комаров А.С.. Модельный анализ динамики лесных экосистем на основе лесотаксационных данных // Фундаментальные аспекты биологии в решении актуальных экологических проблем: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения К.В.Горбунова. Астрахань, 2008.– С. 285-288.
- Kahle H.-P., Kellomaki S., Karjalainen, T., Mellert K., Schuck, A., Prietzel J., Agren G.L., Rehfuss K.-E., Spiecker H. (Eds), Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe – Results of the RECOGNITION Project, Chapter 3.1. 2008.

КОНСТРУИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕКОМЫХ ВРЕДИТЕЛЕЙ ЛЕСА

Ковалев А.В.¹, Суховольский В.Г.²

¹*Международный научный центр исследования экстремальных состояний организма КНЦ СО РАН*
sunhi@nm.ru

²*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН*
soukhovolsky@yandex.ru

Аннотация: для анализа больших имитационных моделей динамики численности насекомых предложены методы и программные решения для создания и анализа моделей, позволяющие оптимизировать структуру модели, оценить ее параметры, повысить достоверность получаемых результатов.

Стандартной задачей экологического моделирования является изучение поведения таких экологических объектов как популяции, сообщества и экосистемы, выявление факторов, влияющих на состояние и устойчивость таких объектов. Однако решение таких задач существенно осложняется тем, что сообщества и экосистемы характеризуются большим числом взаимодействующих переменных, а их поведение зависит от многих внешних факторов. Все это существенно усложняет построение и особенно анализ математических моделей подобных объектов.

Упрощение моделей может, в частности, достигаться уменьшением числа переменных в модели. Так, в классических моделях Лотки-Вольтерра рассматриваются всего две взаимодействующие популяции. В этом случае возможен детальный анализ поведения такого упрощенного сообщества (правда, без учета влияния модифицирующих факторов), однако экологическая корректность такой чрезмерно упрощенной модели сомнительна.

Второй предельный подход к моделированию сообществ и экосистем – построение больших имитационных моделей (БИМ), включающих в себя десятки переменных и сотни параметров. Достоинством такой модели является то, что в ней учитываются все или, по меньшей мере, большинство компонентов сообщества или экосистемы. Однако для описания взаимодействий всех компонентов системы, учитываемых в модели, требуется такое количество оперативных полевых данных, что достоверность модели и получаемых с ее помощью прогнозов стремится к нулю. Но чаще всего такие детальные данные вообще отсутствуют, что сильно затрудняет построение модели. Кроме того, даже если характер взаимодействия между компонентами моделируемой системы известен, полный параметрический анализ такой БИМ требует (даже если для вычислений используются суперкомпьютеры) времени, сопоставимого с временем существования Вселенной. Поэтому стандартным приемом при анализе БИМ является достаточно произвольный выбор для дальнейшего анализа некоторого малого числа переменных и параметров. Однако в этом случае анализ БИМ превращается в субъективную процедуру, ценность которой невелика.

В связи с этим возникает задача разработки таких методов анализа сообществ и экосистем, которые сочетали бы простоту классических моделей и полноту описания экологического объекта, присущую БИМ. В настоящей работе такой подход обсуждается на примере создания и анализа БИМ динамики численности лесных насекомых в таежных лесах Сибири, изучения роли факторов окружающей среды в формировании вспышек массового размножения и прогнозирование этих вспышек.

Нами предложен компьютеризированный программный подход конструирования моделей динамики численности насекомых из набора готовых блоков. При данном подходе модель собирается из набора переходов, внешних воздействий, хранилищ свойств популяции. При этом на каждой итерации разработки сохраняется работоспособность модели, возможность изучения полученных результатов. Тем самым появляется

возможность включения и исключения из модели изучаемых факторов, и статистического анализа различий временных рядов изменения численности, фазовых портретов.

На базе данного программного комплекса построены модели динамики численности популяций таких насекомых - вредителей сибирских таежных лесов, как сибирский шелкопряд и сосновая пяденица. Для этих видов были получены динамические режимы, соответствующие наблюдаемым в естественных условиях (частота вспышек численности, амплитудный разброс плотности популяции на стадии максимума численности).

Блочность построенной модели позволила оценить ее структурную устойчивость как зависимость характера реализуемых режимов популяционной динамики от особенностей экологии вида и гипотез о характере взаимодействия вида с другими видами и воздействия внешних факторов на динамику популяций. Для упрощения параметрического анализа моделей была введена аналитическая метамодель, в которой вспышка массового размножения описывается как фазовый переход второго рода, а данные имитационного эксперимента представляются как данные наблюдений.

С помощью такого подхода было функционально реализовано и подтверждено, что переход части популяции со стратегии «защиты» на стратегию «роста» является одним из важных механизмов реализации вспышки размножения. Анализ модельных результатов с помощью корреляционного интеграла Гроссбергера позволил выявить общее число значимых параметров моделей. Последующая оценка вклада каждого параметра позволила реализовать численный метод изменения вероятности вспышки размножения при изменениях окружающей среды.

Работа поддержана РФФИ (грант 08-04-00217).

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПОЧВЕ

Коваленко В.И., Кундас С.П.

Международный государственный экологический университет имени А.Д. Сахарова, Минск, Беларусь

kovalenko@iseu.by

Аннотация: предложено использование искусственных нейронных сетей (ИНС) для прогнозирования миграции загрязняющих веществ в почве. Рассматривается новая структура ИНС и методика ее обучения, базирующиеся на алгоритме обратного распространения ошибки.

1. Введение

Анализ процессов (Knatko, 1996; Прохоров, 1981; Abbasi, 2003), влияющих на миграцию химических веществ в почве, показывает, что для осуществления моделирования и прогнозирования в этой области необходимо учитывать большое количество факторов, связанных как с особенностями самих мигрирующих веществ, так и с условиями их распространения. В силу этого, большинство разработанных моделей или значительно упрощают реальные процессы, не учитывая при этом отдельные факторы, что приводит к увеличению погрешности моделирования, или же модели имеют значительную сложность для их практической реализации. В частности, это связано со значительными проблемами в формировании входных данных и граничных условий для строгих феноменологических моделей. Причем, некоторые входные данные в таких моделях можно получить только экспериментальным путём (например, изотерма сорбции водяного пара), или требуется проведение дополнительных расчетов (тепловая задача, расчёт движения влаги) и т.п. Многие из указанных выше проблем могут быть решены при использовании нейросетевых технологий (Кундас, 2008).

2. Разработка нейронной сети

Для прогнозирования миграции загрязняющих веществ в работе предлагается следующая упрощенная структура многослойной нейронной сети (рисунок).

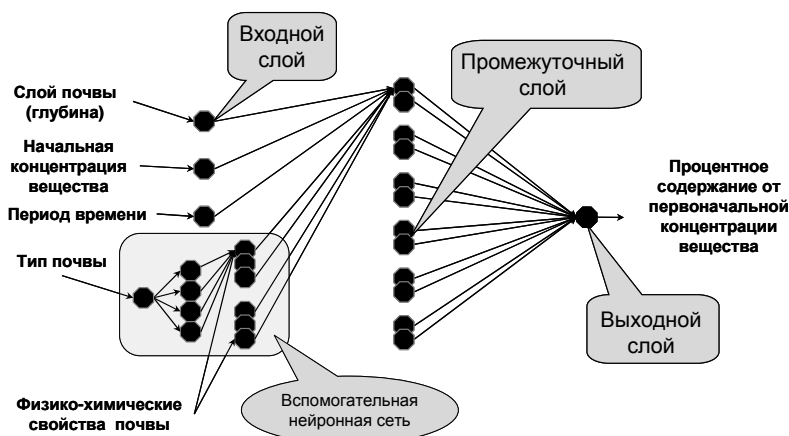


Рисунок. Структура многослойной нейронной сети для прогнозирования миграции загрязняющих веществ в почве

Как показано на рисунке, в упрощённом варианте сети на вход подаётся четыре сигнала. Первый из них – это слой в почве или глубина, измеряемая в метрах, на которой производятся текущие замеры концентрации вещества. Второй – это концентрация веществ на поверхности в начальный момент времени. Третий характеризует период времени, измеряемый в месяцах (годах), прошедший с момента появления первых результатов

измерений концентрации прогнозируемого вещества на поверхности почвы до интересующей даты. Четвертый характеризует тип почвы (например, чернозём, дерново-подзолистая, глеевая и т.п.).

В силу особенности применения ИНС для ее реализации необходимо использовать только алгоритмы, базирующиеся на обучении "с учителем". Наиболее универсальным и жизнеспособным из них является алгоритм обучения на базе обратного распространения ошибки с модификациями (Bishop, 1996), (Kanevski, 1997), (Головко, 2001).

В силу этого, для решения задачи обучения рассматриваемой структуры ИНС предложен следующий метод повышения сходимости обучения. Он заключается в формировании дополнительного сигнала на все веса отдельного слоя, начиная с последнего, как показано в формуле 1:

$$w_k(n+1) = w_k(n) + \Delta w_k + \xi, \quad (1)$$

где $w_k(n)$ – величина весового коэффициента одного из нейронов в предыдущем слое на шаге n до коррекции (индекс k относится к слою, в котором заканчивается данный вес, т. е. с которым он объединен); $w_k(n+1)$ – величина веса на шаге $n + 1$ (после коррекции); ξ – дополнительный сигнал, зависящий от повторяемости величины ошибки слоя.

При этом величина сигнала ξ не случайная и не постоянная. Сигнал инициируется только в тех случаях, если суммарная ошибка сети достаточно велика и незначительно изменяется в пределах нескольких итераций обучения. Такая мера приводит к выходу отдельного слоя из состояния как локального, так и глобального минимума. При нормальной работе величина сигнала равна нулю.

Эта мера приводит к выходу отдельного слоя из состояния локального минимума целевой функции. Величина сигнала после его генерации сохраняется с торможением в течение нескольких итераций, поэтому слой успевает реабилитироваться и войти с большой вероятностью в состояние глобального минимума. Такая адаптивная составляющая позволит избежать попадания в новую зону локального минимума в районах, отдаленных от глобального минимума.

Как показали проведенные исследования (Кундас, 2008), предложенный метод позволяет добиться 100% сходимости при использовании его в задачах прогнозирования миграции загрязняющих веществ в почве.

3. Заключение

Разработана структура нейронной сети, предназначенная для решения задачи прогнозирования миграции загрязняющих веществ в почве, учитывающая большинство факторов окружающей среды (физико-химические, климатические, рельефно-ландшафтные, биологические и другие).

Проведен анализ и выбор методов обучения сети, предложены способы повышения ее сходимости.

Литература

- Головко В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение. Кн. 4.- М.- 2001.- 256 с.
- Кундас С.П., Коваленко В.И. Построение программных средств для прогнозирования миграции радионуклидов в почвах на базе гибридной экспертной системы. Вестник ПГУ.- 2008.- №6.- С. 139-144.
- Прохоров В. М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. Физико-химические механизмы и моделирование.- М.: 1981.- 98 с.
- Abbasi F., Simunek J., van Genuchten M.Th. and others. Overland water flow and solute transport: Model development and field-data analysis. J. of Irrig. and Drainage ASCE.- 2003.- N. 129, Vol. 2.- P. 71-81.
- Bishop C.M. Theoretical foundation of neural networks. Neural computing research group.- 1996. Aston Univ.- 8 p.
- Kanevski M., Demyanov V., Maignan M. Spatial Estimations and Simulations of environment data using geostatistics and artificial neural network. Proceedings of IAMG-97 ed. Pawlowsky-Glahn.- 1997.- Pp. 533-538.
- Knatko V.A. Characteristics of 90Sr, 137Cs and 239,240Pu migration in undisturbed soils of southern Belarus after the Chernobyl accident. J. Environ. Radioactivity.- 1996.- N. 30, Vol. 2.- P. 185-196.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДРЕВЕСНЫХ СООБЩЕСТВ

Колобов А.Н.

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия
alex_0201@mail.ru

Аннотация: рассмотрены результаты построения и исследования имитационной модели, описывающей пространственно-временную динамику древесных сообществ. Проведены вычислительные эксперименты с различными наборами исходных данных. Проанализированы возможные режимы динамики в зависимости от характера межвидовых взаимодействий в древесном сообществе.

1. Описание модели

В данном сообщении приводятся результаты построения и исследования имитационной компьютерной модели динамики сообщества древесных лесных растений. Моделирование динамики древостоя складывается из моделирования роста каждого дерева, входящего в его состав, посредством дифференциальных уравнений и функций, которые позволяют рассчитать основные таксационные характеристики: биомасса, диаметр ствола, кроны, высота. При этом учитывается его пространственное расположение и влияние со стороны окружающих деревьев через изменения, в результате конкуренции, доли внешних ресурсов, приходящихся на данное растение, например количество света. На рисунке 1 показана структурная схема имитационной модели динамики древостоя.

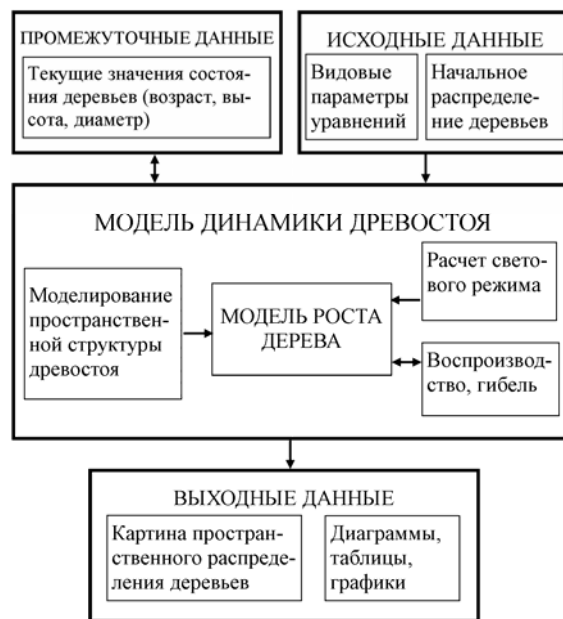


Рисунок 1. Структурная схема имитационной модели динамики древостоя

Основное уравнение роста имеет вид:

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{\alpha_i \cdot I_0 \cdot (1 - \exp(-k_i x_i^2)) \cdot P_{im} \cdot Q(\xi)}{\alpha_i \cdot I_0 \cdot (1 - \exp(-k_i x_i^2)) \cdot Q(\xi) + P_{im}} - \beta_i - \gamma_i \cdot x_i^2$$

где x_i - линейный параметр дерева, I_0 - фотосинтетическая активная солнечная радиация, P_{im} - максимальная интенсивность фотосинтеза единицы площади листьев i -го дерева, k_i - коэффициент затухания светового потока, проходящего сквозь крону, $Q(\xi)$ - доля солнечной радиации при затенении окружающим древостоем, β_i, γ_i - параметры характеризующие расход энергии.

Кроме процессов роста учитывается семенное размножение растений и процессы отмирания деревьев в результате конкуренции за свет и естественных причин. Для реализации модели на ЭВМ, разработано соответствующее программное обеспечение, которое позволяет визуализировать деревья на координатной плоскости, что дает возможность наглядно наблюдать пространственно-временную динамику леса.

2. Результаты

Результаты моделирования показали, что виды, имеющие примерно одинаковую скорость роста и размеры, но разную степень пропускания света, не могут длительное время сосуществовать на одной территории. При взаимодействии двух видов вид, который слабее пропускает свет, постепенно вытесняет второй, при всех остальных равных параметрах. На рисунке 2 показан пример такого взаимодействия.

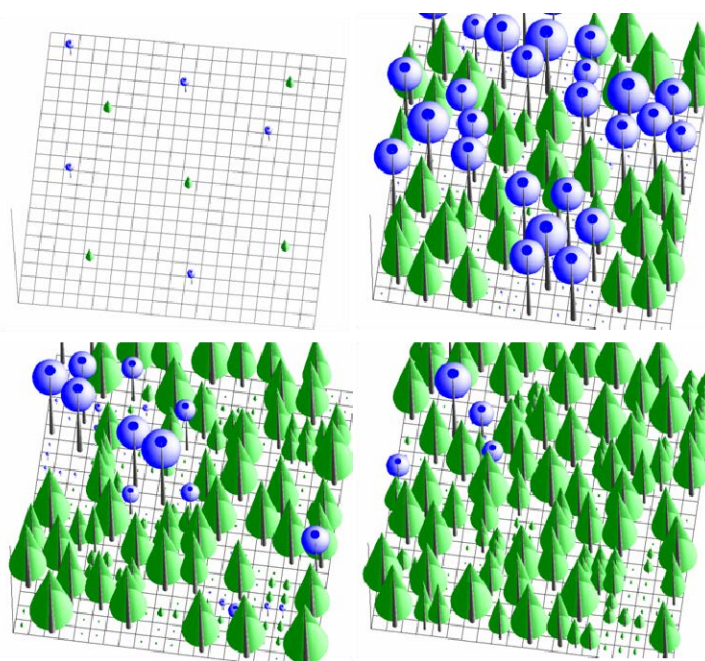


Рисунок 2. Вытеснение одного вида другим в результате конкуренции за свет

Наблюдаемые в процессе моделирования скопления и пустоты, взаимно сменяющие друг друга, вполне соответствуют ярусно-мозаичной концепции, которая рассматривает лесной ценоз как систему пространственных мозаик, состоящих из асинхронно развивающихся пятен, находящихся на разных стадиях развития.

Построенная имитационная модель позволяет проводить вычислительные эксперименты с различными наборами исходных данных (всевозможные комбинации видовой и возрастной структуры древостоя). В качестве результатов моделирования исследователь может получить статистические данные по следующим параметрам: возрастному состоянию; количеству деревьев каждого вида; суммарной площади кроны в каждом ярусе; суммарной биомассе всех видов; высоте, диаметру деревьев и т.д. Модель позволяет строить прогнозные сценарии развития различных лесных участков.

Исследования проведены при финансовой поддержке ДВО РАН (в рамках Программы Президиума РАН № 23 «Биоразнообразие»), проект № 09-И-П23-12 и РФФИ: проект № 09-04-00146-а.

ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗНЫЕ МОДЕЛИ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ПРИ ГЛОБАЛЬНОМ ПОТЕПЛЕНИИ

Коломыц Э.Г., Шарая Л.С.

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, Россия
egk200@mail.ru

Аннотация: опыт применения методов ландшафтной экологии в оценках биотической регуляции углеродного цикла при глобальном потеплении.

Излагаются методы и результаты ландшафтно-экологического подхода к изучению феномена биотической регуляции углеродного цикла. Подход позволяет вскрыть истоки пространственного разнообразия влияния фитобиоты на углеродный обмен земной поверхности с атмосферой и выделить те из них, которые могут обеспечить устойчивость наземных экосистем к изменениям климата в соответствии с принципом Ле Шателье. Стратегия исследования состояла в установлении локальных механизмов биотической регуляции на основе прогнозируемых изменений биологического круговорота в лесных биогеоценозах при заданных сценариях климатического прогноза до 2100 г. (по глобальной модели HadCM3–A2).

Использованы материалы крупномасштабных ландшафтно-экологических съемок, проведенных на экспериментальных полигонах основного водосбора Волжского бассейна. Прогноз осуществлен с помощью: а) разработанных методов эмпирико-статистического моделирования топоекосистем, с использованием дискретных параметров биологического круговорота и б) гидротермической ординации этих параметров в пространстве локальных ландшафтных сопряжений для различных экорегионов. Основным каналом связи метаболических экосистемных параметров с климатическими сигналами служит летнее влагосодержание почвы, динамика которой легла в основу прогнозных моделей углеродного баланса экосистем.

Оценки изменений содержания углерода в различных биотических компонентах и в целом по лесным биогеоценозам проведены по известному лесоводственному методу, основанному на динамике живых и мертвых фитомасс. Изменение массы потока углерода (ΔF_a) над растительным покровом, т.е. углеродный баланс почвенно-растительного комплекса на данный прогнозный срок, рассчитывалось по формуле: $\Delta F_a = \Delta C(WD) + \Delta C(ML) + \Delta C(HU) - \Delta C(BS) - \Delta C(BV) - \Delta C(BR)$, где WD и BV – живая скелетная и зеленая массы; BR – масса корней; ML и HU – массы лесной подстилки и гумуса; ΔC – изменение массы углерода. Параметр ΔF_a определялся для каждой группы биогеоценозов данного экорегиона.

Были получены следующие значения ΔF_a для прогнозных сроков 2030, 2050 и 2100 г.г.:

- 1) дубравы и сосняки южной лесостепи (Жигулевский массив) → -69,91; -77,29; -83,11;
- 2) дубо-липняки и хвойные леса типичной лесостепи (Присурье) → -37,34; -34,42; -23,33;
- 3) смешанные леса неморальнолесной подзоны у Ниж. Новгорода → 30,00; 43,91; 70,90;
- 4) смешанные леса у южной границы подтайги (Среднее Приочье) → -30,77; -29,73; -27,91;
- 5) хвойные леса южной подтайги (Нижегородское Заволжье) → -29,09; -33,24; -31,32.

До конца XXI в. содержание углерода, законсервированного в фитомассе лесов Среднего и Верхнего Поволжья, может измениться на $\pm(20-40)\%$ от базовой величины, что указывает на их существенную роль в биотической регуляции углеродного цикла. Наиболее сильно сократится продуктивность маргинальных лесных сообществ на зональных экотонах

леса и степи, что вместе с усилением разложения древесной мортмассы и гумуса вызовет рост содержания CO_2 в атмосфере. Основную положительную регуляцию углеродного обмена наземных экосистем с атмосферой, направленную на снижение ее парникового эффекта, будут выполнять широколиственно-еловые и темнохвойные леса возвышенных равнин в неморально-лесной подзоне и в южной полосе подтаежной зоны. Второстепенную роль сыграют переувлажненные сосняки низменно-зандровых полесий. Это, пожалуй, единственная группа формаций бореальных лесов, которая окажет существенную поддержку устойчивости континентальной биосферы в условиях глобального потепления.

Для расчета и построения крупномасштабных растровых карт дискретных параметров биологического круговорота (как для базового, так и для прогнозных периодов) применены *новые методы геоморфометрии*, разработанные П.А. Шарым. Картографирование основывалось на предварительно выявленных статистически значимых связях структурных и функциональных характеристик локальных экосистем с морфометрией рельефа. Для этого были использованы спутниковые данные НАСА о рельефе – матрицы высот земной поверхности, полученные в ходе выполнения проекта SRTM30 «США-Италия-Германия» (2000 г.).

Переход от локального уровня прогнозного картографирования на региональный осуществлялся с помощью предложенного нами метода *индукционно-иерархической экстраполяции*. Ниже приводится карта параметра ΔF_a для территории Окского бассейна на прогнозный срок 2050 г.

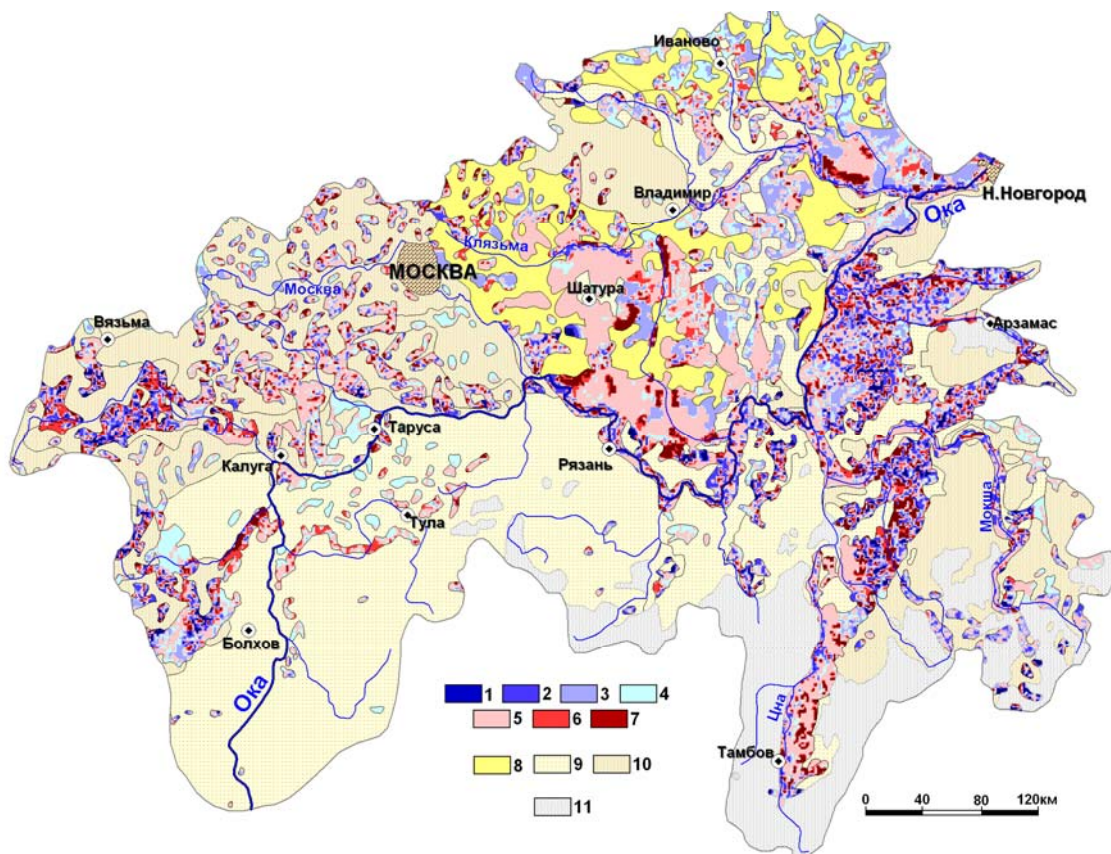


Рисунок. Изменение (т/га) суммарных запасов углерода к 2050 г. по отношению к базовому периоду (до 1985 г.). Для лесных территорий: 1 – $(-136) \div (-89)$; 2 – $(-89) \div (-38)$; 3 – $(-38) \div (-12)$; 4 – $(-12) \div 0$; 5 – $0 \div 38$; 6 – $38 \div 63$; 7 – $63 \div 115$. Для фрагментарных лесов на сельскохозяйственных полях: 8 – $(-1.3) \div 0$; 9 – $0 \div 2.4$; 10 – $2.4 \div 5.5$. 11 – территория северной степи

Уравнения связи ΔF_a с наиболее значимыми факторами среды имеют вид:

- а) еловые и широколиственно-еловые леса – $\Delta F_a = 76,7 \cdot Z + 46,7 \cdot T + 24,0 \cdot Q - 63,8$;
б) сосновые и широколиственно-сосновые леса – $\Delta F_a = -24,0 \cdot Z + 21,0 \cdot MCA - 7,1 \cdot Q + 12,1$;
в) широколиственные леса – $\Delta F_a = -76,2 \cdot T + 42,9 \cdot MCA + 12,1 \cdot GA + 15,1$;
г) вторичные леса на месте сосновых – $\Delta F_a = 83,1 \cdot k_{\max} + 76,6 \cdot MCA + 9,7 \cdot T - 61,6$;
д) все вторичные леса бассейна – $\Delta F_a = 37,5 \cdot MCA - 18,4 \cdot GA - 10,9 \cdot T + 12,7$.

Здесь Z – абс. высота; MCA – площадь водосбора; GA – крутизна склонов; k_{\max} – максимальная кривизна, определяющая «гребневые» формы рельефа; Q – освещенность склонов при положении солнца в южном азимуте; T – средняя температура июля.

Современный лесной покров Окского бассейна должен осуществлять при глобальном потеплении в целом позитивную регуляцию углеродного цикла, однако величина такой регуляции здесь не будет сколько-нибудь значительной. Прогнозная карта вскрывает также резко выраженную контрастность и мелкоконтурную пятнистость положительных и отрицательных значений углеродного баланса, особенно по правобережью р.р. Цны и Нижней Оки.

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВСПЫШКИ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ: «БЕРЕЗА – НЕПАРНЫЙ ШЕЛКОПРЯД»

Колтунов Е.В.

Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия,
kev@uran.ru

Аннотация. изучены основные факторы популяционной динамики в системе: «береза-непарный шелкопряд». На этой основе разработана феноменологическая модель вспышки массового размножения.

Проблема создания адекватных математических моделей популяционной динамики лесных насекомых-филлофагов, формирующих периодические крупномасштабные вспышки массового размножения является одной из наиболее актуальных и достаточно сложных проблем современной популяционной экологии. Это обусловлено как значительным эколого-экономическим ущербом, наносимым вспышками массового размножения (особенно сибирским шелкопрядом) так и отсутствием достаточно адекватных феноменологических моделей вспышек массового размножения. Последнее, по нашему мнению, обусловлено тем, что, несмотря на существование многих гипотез механизмов вспышек массового размножения лесных насекомых-филлофагов (трофическая, метеорологическая, паразитарная, гипотеза стресса, синтетическая и др.), каждая из них не может адекватно объяснить как механизм возникновения вспышек и их затухания, так и то, что при формальном наличии необходимых факторов, вспышка, тем не менее, не возникает. Следовательно, существующие гипотезы не вполне адекватно описывают механизмы вспышек массового размножения и математические модели, разработанные на их основе также не вполне адекватны реальным механизмам, функционирующим в системе: «насекомые – растения». Учитывая это нами проводились многолетние исследования факторов популяционной динамики в системе: «береза-непарный шелкопряд», которые позволили на основе полученных результатов сформулировать основные параметры феноменологической модели вспышек массового размножения для группы эруптивных видов лесных насекомых-фитофагов (Колтунов, 1993, 2006; Колтунов и др., 1998; Колтунов, Хамидуллина, 2009).

Предлагаемая феноменологическая модель совершенно не претендует на адекватность модели популяционной динамики всех видов насекомых, а касается лишь группы видов насекомых, которые относятся к эруптивным видам, т.е. видам, имеющим высокий биотический (вспышечный) потенциал. К ним относятся: сибирский шелкопряд, непарный шелкопряд, зеленая дубовая листовертка, шелкопряд-монашенка и некоторые другие виды. Для этой группы насекомых свойственно периодическое формирование крупномасштабных и панзональных вспышек массового размножения. Все они имеют достаточно близкие особенности, позволяющие за краткий период экологического оптимума (период засухи) реализовать высокий биотический (вспышечный) потенциал. На эти особенности впервые обратил внимание W. Wallner (1987). Он убедительно продемонстрировал, что насекомые-филлофаги, образующие периодические крупномасштабные вспышки значительно отличаются от видов насекомых, не способных к образованию вспышек. Они способны к быстрому отклику на изменения окружающей среды и качество кормового субстрата, обладают значительным потенциалом адаптации к этим изменениям, сильным полиморфизмом, высоким миграционным потенциалом. Следовательно, эта группа насекомых отличается от остальных наличием высокого вспышечного (биотического) потенциала. Мы рассматриваем биотический потенциал как способность к быстрой адаптации к изменению условий среды, что и генерирует быстрый рост биотического (вспышечного) потенциала за счет быстрой адаптации ферментных систем к изменению качества кормового субстрата. Это сопровождается быстрым ростом выживаемости и

численности популяции. Как показали результаты, этот потенциал не является постоянным и стабильным. Он в различные фазы популяционной динамики, колеблется, достигая максимума во вспышечный период и минимума в фазу депрессии (Колтунов, 2006). Активация биотического потенциала происходит в результате воздействия фактора абиотического стресса (возникновение весенне-летних засух, обычно предшествующих вспышке, и синхронизированных с ней) и сильной стрессовой реакции на абиотический фактор части древостоев (Koltunov, Andreeva, 1999). Чем больше в составе древостоев деревьев, реагирующих на стресс (потенциально низкорезистентных), тем выше скорость развития вспышки. Детально изучены количественные параметры весенне-летних засух, детерминирующие интенсивность роста очагов и их площади. Уровень стрессовой реакции древостоев идентифицируется по резкому снижению годичного радиального прироста в год наступления засухи (Колтунов, 2006; Koltunov, Andreeva, 1999). Известно много данных, согласно которым в результате воздействия фактора абиотического стресса (засухи) биохимический состав кормового субстрата (листьев, хвои) значительно изменяется в сторону улучшения кормовых свойств (White, 1984).

Процесс адаптации реализуется в течение 2-3 лет, предшествующих собственно вспышке (Колтунов, 2006). Как показали результаты анализа характера весенне-летних засух, этот параметр имеет исключительно важное значение для успешного возникновения вспышки. Наиболее эффективно инициируют вспышку сильные и полные (без прерывания) весенние и раннелетние (майские и июньские) засухи (Колтунов, 2006; Колтунов, Хамидуллина, 2009). Чем более ранние весенние засухи, тем более чувствительны к ним гусеницы младшего возраста, и наоборот. Поэтому прерывание засух к концу онтогенеза гусениц, или для гусениц старших возрастов не сопровождается затуханием вспышек.

Механизм затухания вспышки, по нашему мнению, обусловлен феноменом популяционного кризиса адаптации. Из-за цикличности климатических условий, период засухи (оптимальных условий) очень короткий и быстро сменяется дождливым периодом. Это сопровождается резким изменением биохимического состава листьев в неблагоприятном для насекомых-фитофагов направлении. Поэтому популяция непарного шелкопряда вынуждена резко изменить направление адаптации. Это сопровождается снижением выживаемости популяции, быстрым снижением ее вспышечного потенциала. По этой причине невозможно искусственное воспроизведение вспышки в фазе депрессии за счет внесения кладок.

Таким образом, в целом предлагаемая феноменологическая модель вспышки включает блок абиотических факторов, которые на количественном уровне контролируют возможность реализации вспышки, ее интенсивность и площади очагов; блок фитоценотический (состав древесного яруса, параметры ожидаемого временного снижения уровня энтоморезистентности), детерминирующие возможность роста и реализации биотического (вспышечного) потенциала популяции; блок популяционный (характеризуется способностью вида к быстрой реализации вспышечного потенциала за счет механизма адаптации) и блок эдафотопический (влажность почвы, ее физико-химические параметры). Эти блоки и определяют возможность модели адекватно прогнозировать развитие вспышки. Как показали многолетние исследования, все другие биотические факторы возникновения и затухания вспышек для насекомых с высоким биотическим потенциалом (паразиты и хищники, инфекционные болезни) менее значимы, по сравнению с фактором абиотического стресса и огромным биотическим (вспышечным) потенциалом эруптивных видов насекомых.

Литература

- Колтунов Е.В. Насекомые-фитофаги лесных биогеоценозов в условиях антропогенного воздействия.- Екатеринбург: Наука, 1993.- 137 с.
Колтунов Е.В., Пономарев В.И., Федоренко С.И. Экология непарного шелкопряда в условиях антропогенного воздействия.- Екатеринбург: Наука, 1998.- 216 с.
Колтунов Е.В. Экология непарного шелкопряда в лесах Евразии.- Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2006.- 260 с.

- Колтунов Е.В., Хамидуллина М.И. Факторы возникновения вспышек массового размножения непарного шелкопряда в лесостепи Зауралья // Агро XXI, № 1-3.- 2009.- С. 23-24.
- Koltunov E.V., Andreeva E.M. The abiotic stress as a factor responsible for gypsy moth outbreaks // J. Appl. Entomol., 1999. Vol. 123, № 10.- P. 633-636.
- Wallner W.E. Factors affecting insect population dynamics: differences between outbreak and non-outbreak species // Ann. Rev. Entomol., 1987. Vol. 32.- P. 317-340.
- White TCR. The abundance of invertebrate herbivores in relation to the availability of nitrogen in stressed food plants. Oecologia 63, 1984.- P. 90–105.

ОБЩАЯ СХЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВЫ: РАСШИРЕНИЕ МОДЕЛИ ROMUL

Комаров А.С.¹, Чертов О.Г.²

¹Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

as_komarov@rambler.ru

²University of Applied Sciences Bingen, Bingen Germany

ochertov@rambler.ru

Аннотация: описана расширенная версия модели динамики органического вещества ROMUL, учитывающая более детальное разделение органического вещества почвы на пулы, указаны модификации скоростей процессов в зависимости от химического состава фракций опада и гидротермических условий.

Введение

Моделирование динамики органического вещества почвы (ОрВП) является единственным способом описания ее возможных изменений при изменении факторов среды или хозяйственного использования территории. Ранее разработанная модель ROMUL (Chertov, Komarov, 1997; Chertov et al., 2001) основана на следующих основных предположениях: свежее органическое вещество, поступившее на/в почву, сначала быстро минерализуется, затем скорость минерализации падает; роль почвенной фауны в процессах трансформации ОрВП значительна и она определяет возникновение новых пулов и скорости их преобразования; имитация динамики ОрВП происходит одновременно для лесной подстилки и ОрВП минеральных горизонтов.

Предыдущие версии модели применялись для прогноза многолетней динамики ОрВП в различных лесных почвах, в том числе и в качестве подмодели в системе моделей продуктивности леса и круговорота элементов питания в лесных экосистемах EFIMOD (Komarov et al., 2003) и в некоторых других моделях, разработанных в Финляндии и Швеции. Модель EFIMOD применялась для оценки влияния лесохозяйственных мероприятий и изменений окружающей среды для лесных территорий России, Европы и Канады. При работе с моделью обнаружился ряд проблем, относящихся к несовершенству модельной структуры, приводящему в ряде ситуаций к отклонениям от реальности. Так, например, часто минерализация лесной подстилки и оторфованных почв происходит в модели быстрее, чем в эксперименте, возникают трудности с инициализацией модели. Более того, за последние годы был получен ряд новых данных, которые необходимо учесть в модели.

Формулировка модели

Задача моделирования динамики ОрВП состоит в его разделении на фракции и определении скоростей минерализации и гумификации для разных фракций. Этот процесс может быть произведен разными способами, что и отражается в моделях разных авторов. Большинство моделей рассматривают разложение ОрВП в зависимости от качества и количества опада (и органических удобрений), температуры и характеристик водного режима. Опад также может быть разделен на различные фракции по химическому составу. Так, например, модель CENTURY (Pastor, Post, 1985) имеет две входных компоненты опада (структурную и метаболическую) с разными скоростями разложения и три пула углерода ОрВП (активный, включая биомассу микроорганизмов, медленный и пассивный). Основной проблемой в таких случаях является инициализация модели, то есть определение начальных содержаний соответствующих пулов по экспериментальным данным.

В модели ROMUL можно выделить следующие пулы органического вещества. Так, лесная подстилка состоит из свежего опада L, частично разложенного опада, пропитанного

гумусовыми веществами F и хорошо разложенного слоя H. Как правило, эти слои хорошо выделяются морфологически, и содержание в них углерода, азота и других элементов определяется известными аналитическими методами.

В новую версию ROMULa добавлены новые пулы ОрВП. Так, мы разделили пул H на две части: хорошо разложившийся пул лесной подстилки H_{above} и пулы стабильного гумуса H_{below} минеральных горизонтов, связанный с полуторными окислами. Мы связываем этот пул с деятельностью дождевых червей, которые, перенося органическое вещество вглубь, формируют минеральные горизонты совместно с механическим переносом ОрВП с водой.

В зависимости от температуры и влажности почвы, и, в первую очередь, от отношения C/N фракций опада мы выделяем пул торфа, который в дальнейшем разлагается со своей скоростью. В модель также добавлен пул высокоуглеродного неразлагающегося органического вещества, возникающего при лесных пожарах. Динамика ОрВП, состоящего из описанных выше пулов, описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Модель пока остается линейной и позволяет простую параметризацию и инициализацию по существующим экспериментальным данным. Динамика азота и других элементов описывается теми же системами уравнений, но для скоростей трансформации используются поправочные коэффициенты (в некоторых условиях возможны функции) и дополнительные пулы (CO_2 для углерода, вторичные минералы для кальция и т.д.).

В новую версию модели включены модифицированные зависимости скоростей трансформации элементов от температуры и влажности почвы, а также их зависимости от pH, содержания азота и лигнина. Отметим, что эти экспериментальные зависимости часто имеют достаточно сложный характер (Быховец и др., 2009).

Заключение

Новая версия модели ROMUL при тестировании и верификации продемонстрировала весьма реалистическое поведение основных переменных. Для ее применения в моделях биологического круговорота в лесных экосистемах необходимо сделать несколько замечаний. Во-первых, при описании круговорота элементов питания, в первую очередь, азота, модель ROMUL оказывается недостаточной, так как описание участия микоризы в питании растений является другой моделью, которая еще не разработана. Во-вторых, большой спецификой обладает описание минерализации и гумификации фракций сухостоя и валежа. Подобные модели еще также не разработаны. В-третьих, большие трудности вызывает моделирование динамики пула торфа как вследствие крайней замедленности процессов и, как следствие, почти полном отсутствии экспериментальных данных по его разложению, так и необходимости, по-видимому, стратифицированности описания температурно-влажностных условий при больших его объемах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 09-04-01209) и Программы фундаментальных исследований РАН № 16.

Литература

- Быховец С.С., Ларионова А.А., Мильхеев Е.Ю. Параметризация зависимости интенсивности минерализации органического вещества почв от гидротермических условий // Настоящий сборник.
- Chertov O.G., Komarov A.S. SOMM – a model of soil organic matter dynamics // Ecological Modelling.- 1997.- Vol. 94.- P. 177-189.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamic as a sustainable tool for forest ecosystem modeling // Ecological Modelling.- 2001.- 138.- P. 289-308.
- Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova E. EFIMOD 2the system of simulation models of forest growth and elements cycles in forest ecosystems // Ecological Modelling.- 2003.- V. 170.- P. 373-392.
- Pastor J. and Post W.M. Development of a Linked Forest Productivity -- Soil Process Model // Oak Ridge National Laboratory ORNL/TM-9519.- 1985.- 168 p.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ EFIMOD ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ПРИ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ И ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Комаров А.С.¹, Чертов О.Г.², Михайлов А.В.¹, Шанин В.Н.¹, Быховец С.С.¹

¹*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия.*

as_komarov@rambler.ru

²*University of Applied Sciences Bingen, Bingen Germany*
ochertov@hotmail.com

Аннотация: кратко описана имитационная модель биологического круговорота углерода и азота EFIMOD и ее применение для анализа динамики углерода в лесных экосистемах при катастрофических воздействиях, таких как лесные пожары, сплошные рубки и ветровалы.

1. Введение

Проблема анализа динамики углерода в лесных экосистемах и распределение элементов между различными экосистемными составляющими при катастрофических воздействиях, таких как лесные пожары, сплошные рубки и ветровалы, является одним из наиболее важных приложений имитационного моделирования. Большое значение имеет моделирование при прогнозе и соответствующем анализе последствий возможных изменений климата. Модели, дающие реалистичные оценки, должны включать в себя модели потенциальной продуктивности, модели конкуренции за свет и за элементы почвенного питания. Такие модели также должны иметь обратную связь с почвой и условиями местообитания: влажностью и почвенным богатством. К настоящему времени моделей, обладающих этими свойствами в полной мере, разработано немного. Как правило, узким местом является модель динамики органического вещества почвы и, соответственно, модели круговорота элементов питания.

2. Модель EFIMOD

Ранее нами были разработаны разные версии системы моделей EFIMOD (Chertov, Komarov, 1997; Chertov et al., 1999, Komarov et al., 2003). EFIMOD имитирует биологический цикл углерода и азота для каждого дерева в древостое вместе с соответствующим дереву участку почвы. Модель роста дерева основана на видоспецифичных экологических параметрах: «максимальная биологическая продуктивность листвы/хвои» и «удельное потребление азота». Почвенная подмодель ROMUL (Chertov et al., 2001) позволяет одновременно вычислять скорость минерализации и гумификации лесного опада и органического вещества почвы (ОрВП). Структура системы моделей позволяет использовать в качестве входных параметров стандартные данные лесной таксации. Входные климатические переменные генерируются имитатором почвенного климата SCLISS (Быховец, Комаров, 2002). Выходными переменными системы являются величины, используемые в лесной таксации, пулы углерода и азота в древостое и почве, эмиссия CO₂ и некоторые другие характеристики. Модель объединяет популяционный и балансовый подходы при моделировании экосистем и позволяет кратко- и долгосрочное прогнозирование на уровне древостоя, совокупности древостоев и для региональных оценок.

Калибровка модели проводится по литературным данным по распределению годичного прироста между органами дерева, содержанию азота и зольности в органах и максимальной (потенциальной) продуктивности вида в данных условиях местообитания и климата. Наиболее трудной задачей при калибровке является установление соответствия между почвой и растительностью в конкретном таксационном выделе. Мы оцениваем

почвенные характеристики косвенными методами, используя конечные значения долговременного моделирования для типов условий местообитания по классификации Воробьева-Погребняка и наборов бонитетов пород, произрастающих в этих условиях. Начальными значениями берутся литературные данные. Такая процедура ведет к минимальным отклонениям от начальных данных при моделировании реальных лесных выделов.

Система моделей EFIMOD применялась для сравнения различных сценариев лесного хозяйства и соответствующей продукции CO₂, (Mikhailov et al., 2004), для региональных оценок динамики углерода в почвах Ленинградской области (Chertov et al., 2002), для объяснения эффекта значительного увеличения годичных приростов основных лесных пород Европы, начиная с 80-х годов. Причины этого возрастания были проанализированы в рамках проекта EU RECOGNITION, в котором было показано, что основным фактором, приводящим к увеличению скорости роста, является возрастание выпадения азота из атмосферы (Kahle et al., 2008).

В последние годы EFIMOD применялся для сравнительного анализа влияния климатических изменений, лесных пожаров и рубок на рост леса в Канаде (Chertov et al., 2009) и России (Комаров, Кубасова, 2007), а также для анализа последствий традиционного природопользования, задач анализа лесного биоразнообразия при климатических изменениях (см статьи в этом сборнике).

Результаты моделирования показывают, что разработанная система моделей может быть применена на разных уровнях от древостоя до регионального или даже континентального для оценки баланса углерода и эмиссии CO₂ на лесных территориях.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 16 «Окружающая среда в условиях изменяющегося климата: экстремальные природные явления и катастрофы».

Литература

- Быховец С.С., Комаров А.С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение.- 2002.- Т. 4.- С. 443-452.
- Комаров А.С., Кубасова Т.С. Моделирование динамики органического вещества в хвойно-широколиственных лесах в разных типах местообитаний при пожарах (вычислительный эксперимент) // Известия РАН, сер. Биологическая,- 2007-, No. 4,- pp. 490–500.
- Chertov, O.G., Komarov A.S. Simulation model of Scots pine, Norway spruce and Silver birch ecosystems. In: Sustainable Development of Boreal Forests. Proc. of 7th Annual Conference of IBFRA. 1997. Moscow. 161-167.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Tsiplianovsky A.M. A combined simulation model of Scots pine, Norway spruce and Silver birch ecosystems in the European boreal zone // Forest Ecology and Management - 1999.- 116.- P. 189-206.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamic as a sustainable tool for forest ecosystem modeling // Ecological Modelling.- 2001.– 138,- P. 289-308.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Bykhovets S.S., Kobak K.I. Simulated soil organic matter dynamics in forests of the Leningrad administrative area, northwestern Russia // *Forest Ecology and Management.*– 2002.- V. 169,- No. 1-2.- P. 29-44.
- Chertov, O., Bhatti, J.S., Komarov, A., Mikhailov, A., Bykhovets, S. Influence of climate change, fire and harvest on the carbon dynamics of black spruce in Central Canada // *Forest Ecology and Management.*- 2009 - 257 (3), - pp. 941-950.
- Kahle H.-P., Kellomaki S., Karjalainen, T., Mellert K., Schuck, A., Prietzel J., Agren G.L., Rehfuss K.-E., Spiecker H. (Eds), Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe – Results of the RECOGNITION Project, - Brill.- 2008.
- Komarov A., Chertov O., Zudin S., Nadporozhskaya M., Mikhailov A., Bykhovets S., Zudina E., Zoubkova E. EFIMOD 2the system of simulation models of forest growth and elements cycles in forest ecosystems // Ecological Modelling.- 2003.- V. 170.- P. 373-392.
- Mikhailov A.V, Komarov A.S., Chertov O.G., Simulation of the carbon budget for different scenarios of forest management // *Eurasian Soil Science.*- vol.37,- Suppl.1,- 2004,- pp.593-596.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ В ГИДРОСФЕРЕ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТАНДАРТ

Корж В.Д.

*Учреждение Российской академии наук Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, 36*
ocean41@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 геохимическая система элементов в гидросфере, которая выявила зависимость между тремя основными геохимическими характеристиками растворенных форм элементов. Она может быть использована в качестве экологического эталона естественного геохимического 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 геохимических циклов, создания моделей глобальных процессов массообмена и трансформации веществ, 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" (Лебедев и др., 1974). 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 кибернетического подхода к изучению закономерностей формирования элементного состава морской воды (Корж, 1990, 1991). При ее использовании оставляют в стороне вопрос о процессах в отдельных частях системы, оперируя только понятиями "вход-выход". моря и океаны мы рассматриваем как сложные 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: геохимическая особенность каждого элемента определяет своеобразие зависимости между его содержанием (средней концентрацией) в океане и интенсивностью процессов его миграции через барьерные зоны гидросферы (Корж, 1990, 1991, 1999). 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 $Ig C_{ок} - Ig \tau_{ок}$ (рисунок), 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.

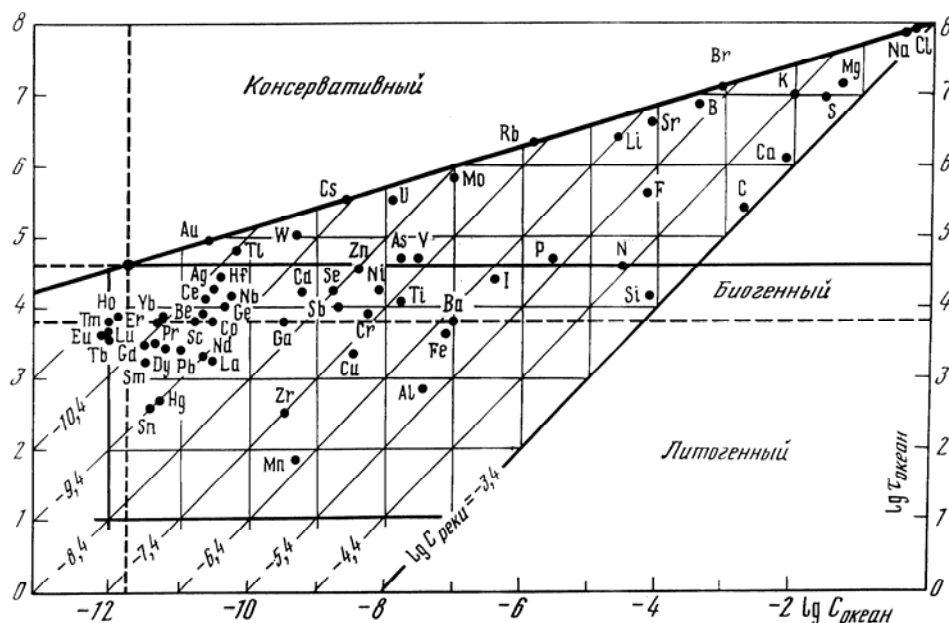


Рисунок. Геохимическая система элементов в гидросфере

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.

Геохимическая 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 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. В дальнейшем будет возрастать ее роль как экологического эталона естественного геохимического состояния гидросферы.

Новая методология геохимических исследований оказалась эффективной и при исследовании эволюции элементного состава биосферы (Корж, 2003).

Литература

- Корж В.Д. Геохимическая система элементов в океане // Океанология.- 1990.- Т. 30.- Вып. 3.- С. 406—416.
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. Специфика формирования элементного состава биосферы // Докл. РАН, -2003.- Т. 392.- № 4.- С. 517-520.
Лебедев В.Л., Т.А. Айзатулин, К.М. Хайлов Океан как динамическая система.- Л.: Гидрометеоздат, 1974.- 200 с.

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИКЛОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АГРОЛАНДШАФТАХ

Кошелева Н.Е.

Географический факультет МГУ, Москва, Россия
natalk@mail.ru

Аннотация: реализована модель динамического баланса Cu, Zn, Pb, Cd в агроландшафтах Мещерской низменности, описывающая функциональные связи между атмосферой, почвой и растениями. Определены особенности накопления металлов в компонентах ландшафта при различных сценариях полива загрязненными водами.

Ведение сельского хозяйства в промышленно развитых районах сопряжено с экологическим риском, обусловленным опасностью накопления тяжелых металлов (ТМ) в почвах и растениях. Для получения достоверной информации о современном состоянии агроэкосистем и опасности их загрязнения ТМ целесообразно использовать математические модели биогеохимических циклов ТМ, отражающие закономерности миграции и аккумуляции ТМ в широком диапазоне условий и факторов внешней среды. Цель данной работы – реализация динамической модели циклов ТМ для агроландшафтов левобережья Окского бассейна. Идентификация параметров и входных функций модели проводилась по данным полевых экспериментов на экополигоне «Мещера», в которых исследовалось воздействие загрязненных Cu, Zn, Pb, Cd поливных вод на состояние дерново-подзолистых супесчаных почв и качество сельскохозяйственных культур (Мажайский и др., 2008).

Структура модели. Основу модели составляют балансовые уравнения, дополненные эмпирическими зависимостями для описания приходных и расходных составляющих (Кошелева, 1997, 2002). Уравнение динамики запасов металла $S(t)$ в пахотном слое почвы мощностью m (м) за многолетний период имеет вид:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{Q(t) - I(t) - P(t)}{m \cdot \rho}, \quad (1)$$

где ρ – плотность почвы ($\text{кг}/\text{м}^3$), t – время (год), $Q(t)$ – поступление металла с атмосферными осадками, пылью и поливной водой ($\text{мг}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$); $I(t)$ – выщелачивание металла из пахотного слоя; $P(t)$ – вынос с растительной продукцией. Реализация модели предполагает непосредственные измерения начального содержания $S(t=0)$ всех интересующих металлов в почве, а также и оценку правой части уравнения (1).

Источниками ТМ в почвах агроландшафтов Мещерской низменности являются атмосферные выпадения техногенного происхождения и поступление с поливной водой:

$$Q(t) = (h \cdot C_1 + V \cdot C_2) \cdot 10^{-4} / \rho + T_s \cdot C_3, \quad (2)$$

где h и V – слой атмосферных осадков и оросительная норма ($\text{м}/\text{год}$); T_s – объем твердых выпадений ($\text{кг}/\text{га} \cdot \text{год}$); C_1 , C_2 и C_3 – содержание ТМ в осадках, поливной воде и пыли ($\text{мг}/\text{кг}$).

Выщелачивание $I(t)$ вниз по почвенному профилю оценивалось по данным лизиметрических опытов в зависимости от концентрации ТМ в корнеобитаемом слое почвы:

$$I(t) = f_1(S). \quad (3)$$

Вынос металлов с растительной продукцией $P(t)$ ($\text{мг}/\text{га}$) рассчитывается по урожайности возделываемой культуры Y ($\text{кг}/\text{га}$) и концентрации C_p в ней элемента ($\text{мг}/\text{кг}$): $P(t) = Y \cdot C_p$. Для конкретной культуры C_p определяется содержанием металла в почве $C_p = f_2(S)$. При орошении и фиксированных агрохимических свойствах почвы урожайность культуры Y также зависит от уровня содержания ТМ в почве: при невысоких концентрациях ТМ в почве урожайность максимальна, с ростом содержания ТМ в почве она снижается в соответствии с кривой, построенной по экспериментальным данным. Некоторое количество ТМ выносятся из почвы сорными растениями.

Оценка параметров и входных функций модели. Поступление ТМ из атмосферы характеризуют метеоданные за 1993-2005 гг. Они указывают на то, что район испытывает значительную техногенную нагрузку от предприятий электроэнергетики, нефтеперерабатывающей промышленности, производства строительных материалов, автотранспорта. Ежегодный привнос ТМ с поливными водами зависел от концентрации в них ТМ (фон, 1, 2, 4, 8, 15 ПДК) и оросительной нормы. Его межгодовая изменчивость определялась не только метеоусловиями, но продолжительностью вегетационного периода у каждой культуры.

Транслокацию Pb, Cd, Zn, Cu из почвы в растения описывают нелинейные эмпирические функции, обобщающие данные мелкоделяночных опытов с горохо-овсяной и вико-овсяной смесями, многолетними травами, морковью, редисом. Влияние загрязнения почв ТМ на урожайность определялось в зависимости от суммарного показателя загрязнения почв Zc. Интенсивность вымывания ТМ из пахотного слоя почвы $I(t)$ оценивалась по данным лизиметрических опытов на эколополигоне в 2001-2005 гг., по которым были установлены статистические связи выноса ТМ почвенными водами с их содержанием в пахотном слое.

Независимые определения всех составляющих баланса в уравнении (1) позволили оценить его точность для каждого варианта опыта. Величины невязок не превысили 9-17 % от общего содержания ТМ в почве при средних значениях 2,01 % для Cd, 3,11 % для Cu, 0,26 % для Pb, 3,17 % для Zn. Это свидетельствует о полноте учета составляющих баланса ТМ и удовлетворительной точности экспериментальных данных, использованных для оценки параметров и входных функций модели.

Результаты моделирования. Приходная часть баланса Cu и Pb в фоновых условиях на 94-98% обеспечивается поступлениями из атмосферы; для Zn этот вклад равен 84%, для Cd – 59%. В других вариантах опыта доминирует привнос ТМ с загрязненными поливными водами. Он определяется концентрацией ТМ в воде и в зависимости от варианта опыта составляет 95-99% от общего поступления металла в почву.

Соотношение расходных статей баланса ТМ в почве зависит от уровня загрязнения поливных вод. С его ростом происходит относительное уменьшение выноса Cd из почвы с урожаем и сорняками – от 71,2 на фоновой делянке до 24,6% на делянке с концентрациями ТМ 15 ПДК, выщелачивания – от 20 до 2% и усиление аккумуляции металла в почве – от 12 до 74%. Еще более контрастные изменения расходной части баланса наблюдаются у Pb и Cu: если в фоновых условиях вынос с урожаем и сорняками для них равен 92,6 и 98,7% соответственно, то при концентрациях ТМ 15 ПДК он составляет всего 9,3 и 0,6 %. Вынос Pb с внутрипочвенным стоком колеблется от 7,4 до 32%, а Cu – от 0,06 до 5,7%. Накопление в почве усиливается при повышении концентрации металлов в поливной воде и достигает у Pb 81%, а у Cu – 99,3% при концентрациях ТМ, равных 15 ПДК. Для Zn характерна большая подвижность в агроландшафте, он интенсивно мигрирует с внутрипочвенными водами. Выщелачивание Zn из почвы в некоторых вариантах опыта достигает 80%, его аккумуляция в почве наблюдается лишь при концентрациях ТМ в поливной воде, равных 8 и 15 ПДК.

Динамика концентраций ТМ в почве свидетельствует о том, что при регулярном поливе загрязненной водой происходит быстрое увеличение содержания Cd, Cu и Zn в корнеобитаемом слое до уровней, близких к ОДК. Следствием этого является ухудшение качества растениеводческой продукции уже в первый год эксперимента. Особенно интенсивно накапливается и прочно закрепляется в почве медь, ее вынос с внутрипочвенным стоком практически отсутствует, а поглощение растениями в вариантах опыта с 4-15 ПДК составляет всего 1-4% от ее прихода. Особенно значительные превышения ПДК в растениеводческой продукции – в 10 и более раз – отмечены по Cd и Pb, загрязнение Zn было не столь высоким – в 2,5 раза в первые два года опыта и в 4 раза в последующие годы.

Выявленные особенности динамики ТМ в компонентах агроландшафта свидетельствуют о повышенной опасности загрязнения почв Cu и Cd, которые активно аккумулируются в почве, урожая Cd и Pb, поглощаемых корнеплодами и кормовыми культурами, и грунтовых вод Zn и Pb, мигрирующих с внутрипочвенным стоком.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ ПРОМЫСЛОВО-БИОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Криксунов Е.А.¹, Бобырев А.Е.², Бурменский В.А.¹

¹*Биологический факультет МГУ, Москва, Россия*
kriksunov@mail.ru

²*Институт проблем экологии и эволюции РАН, Москва, Россия*
abobyrev@mail.ru

Аннотация: изложены основные принципы экосистемного подхода к управлению водными биоресурсами. Возможности применения подхода проиллюстрированы на примере модели биотического сообщества Северного Каспия.

Классические модели теории промыслового рыболовства сформулированы в предположении о постоянстве экологического фона, на котором разворачиваются события в системах «запас-промысел». Несмотря на небольшую прогностическую ценность, модели рыбного промысла сыграли важную роль, дав толчок развитию процедур, необходимых для более или менее точного измерения популяционных систем. В целом, опыт практического применения моделей изолированных популяций говорит о том, что биологические ориентиры управления, разработанные с их помощью, оказываются малопригодными для поддержания режимов устойчивой эксплуатации. Это вновь актуализирует подходы, рассматривающие промысловые популяции рыб как элементы биотических сообществ.

Так называемый экосистемный подход к управлению запасами промысловых гидробионтов расценивается сегодня как одно из главных направлений преодоления кризисной ситуации в мировом рыболовстве. В его рамках промысел рассматривается как конечный потребитель продукции биотического сообщества водоемов, формируемой организмами всех трофических уровней. Становление данного подхода обусловлено развитием представлений о роли биотических взаимоотношений в динамике популяций рыб. В этом смысле родоначальником экосистемного подхода можно считать В. Вольтерра, впервые описавшего сопряженную динамику хищных и мирных рыб Адриатического моря в период первой мировой войны (Volterra, 1926). Однако лишь к 1970-м годам 20 века удалось разработать практически осуществимые способы оценивания рыбных запасов с учетом межвидовых взаимодействий. К этому же времени относятся первые попытки создания многокомпонентных моделей водных биотических сообществ, в которых популяции верхних трофических уровней (рыбы) эксплуатируются промыслом (Меншуткин, 1971; Жаков, Меншуткин, 1974; Platt, Denman, 1978).

На сегодняшний день главным препятствием для широкого использования экосистемных моделей в практике управления биологическими ресурсами водоемов остается проблема неопределенности. Перспективным с этой точки зрения можно считать развитие моделей, отображающих биотические связи между организмами в форме балансовых соотношений, описывающих перенос энергии и вещества с одного трофического уровня на другой.

В качестве иллюстративного примера, демонстрирующего возможности такого подхода к анализу динамики популяций гидробионтов, рассмотрим модель биотического сообщества Северного Каспия.

В качестве инструмента исследования использована модель ECOPATH/ECOSIM (Walters et al., 1997), являющаяся эффективным средством анализа структуры и функционирования эксплуатируемых промыслом водных экосистем и опирающаяся на методологию балансового подхода. Модель в общей сложности содержит описания 20-и структурных компонентов трофической сети сообщества, начиная с бактериопланктона и заканчивая каспийским тюленем. Параметризация модели осуществлена по данным, относящимся к периоду 1996-2004 гг.

Эффективность мер, направленных на восстановление запасов осетровых рыб Северного Каспия, находится в тесной связи с возможностями объективной оценки существующей промысловой нагрузки на их популяции. Исследование модели позволяет получить ориентировочные оценки неучтенного (браконьерского) вылова осетровых рыб в предположении о том, что доля продукции взрослых рыб, не утилизируемая внутри системы, формирует потенциальный ресурс для нелегального промысла. Так, применительно к северюге оценка соотношения между учитываемым и не учитываемым официальной статистикой выловом, вытекающая из результатов реализации модели, составляет примерно 1 : 18. Уточнение этой оценки осуществлено с помощью специально разработанной динамической модели, воспроизводящей процессы популяционных изменений северюги в зависимости от состояния кормовой базы и интенсивности промысла. Оценка соотношения учитываемого и не учитываемого официальной статистикой вылова получена путем подбора значений промысловой смертности, при которых модель демонстрирует снижение биомассы запаса северюги с исходного значения (80 000 т) до современного уровня (порядка 17 000 т), и составляет величину около 1 : 20.

Подходы к оптимизации промыслового использования рыбных ресурсов Северного Каспия исследованы в предположении о наличии четырех рыболовецких флотилий, три из которых работают официально и осуществляют отдельный промысел сельдевых, осетровых и карповых рыб, а четвертая эксплуатирует запасы осетровых рыб на нелегальной основе. Объемы добычи, приходящиеся на долю четвертой (браконьерской) флотилии, в модели многократно (в 20 и более раз) превышают уровень официального вылова. Из результатов имитационных экспериментов следует, что в сложившихся условиях восстановление ресурсного потенциала осетров Северного Каспия возможно только при вовлечении нелегального промысла в общую систему управления рыболовством.

Изучены также эффекты, возникающие в динамике биотического сообщества Северного Каспия вследствие искусственного разведения осетров. Исследование проведено на примере русского осетра как наиболее многочисленного вида каспийских осетровых рыб. При этом полагается, что величина пополнения популяции осетра зависит от темпов потребления пищи производителями. При расчете темпов потребления в свою очередь используется трофическая функция хищника, модифицирующая величину и структуру его удельного потребления в соответствии с изменениями относительного обилия кормовых объектов и их доступностью для потребителя. Показано, что в условиях разветвленной сети трофических взаимодействий, включающей в себя внутри- и межвидовые конкурентные отношения, опосредованные эффекты изменений темпа воспроизводства одного из видов (реализующиеся через изменения состояния кормовой базы) способны превышать по величине прямые последствия рыбозаводных мероприятий.

Литература

- Жаков Л.А., Меншуткин В.В. Математическая модель озерного ихтиоценоза // *Вопр. ихтиологии.*– 1974.– Т. 14. – № 3.– С. 387-395.
- Меншуткин В.В. Математическое моделирование популяций и сообществ водных животных.– Л.: Наука, 1971. – 196 с.
- Platt T., Denman K. The structure of pelagic marine ecosystems // *Rapp. Proc.-Ver. Rйun. Cons. Int. Explor. Mer.* – 1978.– V. 173.– P. 60-65.
- Volterra V. *Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi* // *Mem. Acad. Lincei.*– 1926. – V. 2.– P. 31-113.
- Walters C.J., Christensen V., Pauly D. Structuring dynamic models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments // *Revs Fish Biol. Fish.*– 1997.– V. 7.– P. 139-172.

МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ В СИСТЕМЕ ДВУХ СИММЕТРИЧНО СВЯЗАННЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Кулаков М.П.

ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан, Россия
k_matvey@mail.ru

Аннотация: на основе системы связанных отображений, построенной на основе модифицированной модели запас-пополнение Рикера, показаны некоторые механизмы формирования и разрушения синфазных и противофазных пространственных колебаний неоднородных популяций. Исследованы эффекты мультистабильности, выявлены типичные фрактальные структуры, возникающие при дроблении бассейнов притяжений. Предложен количественный показатель синхронизации колебаний, использованный для исследования свойств бассейнов синхронизации.

1. Постановка задачи

Изучению вопросов возникновения, сохранения и количественной динамики мозаичной структуры посвящено множество работ. Для описания динамики популяций с мозаичной структурой, возможно, использовать набор логистических отображений в виде некоторых цепочек (линейных или пространственных) с глобальными миграционными связями, в которых каждый элемент связан с некоторыми другими элементами. Подобное жесткое фиксирование местообитаний, хотя и ограничивает общность модельного подхода, но может позволить подробно рассмотреть динамику этих очагов на длительный период.

В данной работе предпринята попытка описания простейших механизмов формирования динамики подобным популяций, представленных двумя группировками, занимающих равную экологическую нишу, обитающих в двух обособленных местообитаниях, между которыми возможно небольшое миграционное взаимодействие. Для описания сезонных изменений численности и миграционного взаимодействия будем использовать решетки связанных отображений с симметричной диссипативной связью с постоянным сезонным расселением.

Исследовалась известное отображение с симметричной диффузионной связью

$$\begin{cases} x_{n+1} = f(x_n) + m \cdot (f(y_n) - f(x_n)) \\ y_{n+1} = f(y_n) + m \cdot (f(x_n) - f(y_n)) \end{cases} \quad (1)$$

где x_n и y_n – численности каждой из популяций в n сезон, m – доля мигрирующих особей, f – функция воспроизводства, в качестве которой использовалась модифицированная зависимость запас-пополнение Рикера $f(x) = axe^{-bx}$.

Для системы (1) подробно рассматривался вопрос обнаружения и изучения механизмов пространственной синхронизации, который в биологической трактовке может быть использован для количественной идентификации связанных популяций. Так, две связанные популяции, динамика которых демонстрирует синфазное поведение ($x_n = y_n$), могут быть для простоты приняты за одну, динамика которых опишется одиночным уравнением $x_{n+1} = f(x_n)$. Однако слабое изменение параметров связи может привести к возникновению противофазным колебаниям, что слабо отразится на их суммарной динамике, т.к. $x_{n+1} + y_{n+1} = f(x_n) + f(y_n)$.

2. Результаты

Для количественной характеристики синхронизации колебаний использовалась величина

$$\sigma = \frac{1}{N-n} \sum_{i=n}^N \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right|, \quad (2)$$

где x_i ($i = \overline{0, N}$) – N итераций (1), из которых $N-n$ на аттракторе, которая при полной синхронизации равна 0, отлична для асинхронных режимов, близка к нулю в случаях частичной, полной и противофазной синхронизации. Вариация величины (2) в зависимости от начальной точки x_0 , y_0 и управляющих параметров позволила произвести качественную идентификацию на фазовой плоскости областей соответствующих различным начальным условиям системы приводящих к конкретному режиму синхронизации, т.е. позволила построить бассейн притяжения.

На рисунке приведены некоторые бассейны притяжения, на которых можно проследить трансформацию бассейна притяжения полностью синфазного режима (когда $x_n = y_n$). Светлые участки соответствуют синфазному бассейну, темные полностью противофазному (когда $y_n = 2\ln(a) - x_n$). Оттенкам серого соответствуют режимы с частичной синхронизацией, либо режимам с противоположной фазой колебаний, что фиксируется для этого бассейна. На последнем рисунке приведен случай полностью хаотической динамики, в котором полностью отсутствуют синфазные режимы, однако фиксируются сложная фрактальная структура иерархии противофазных режимов динамики численности.

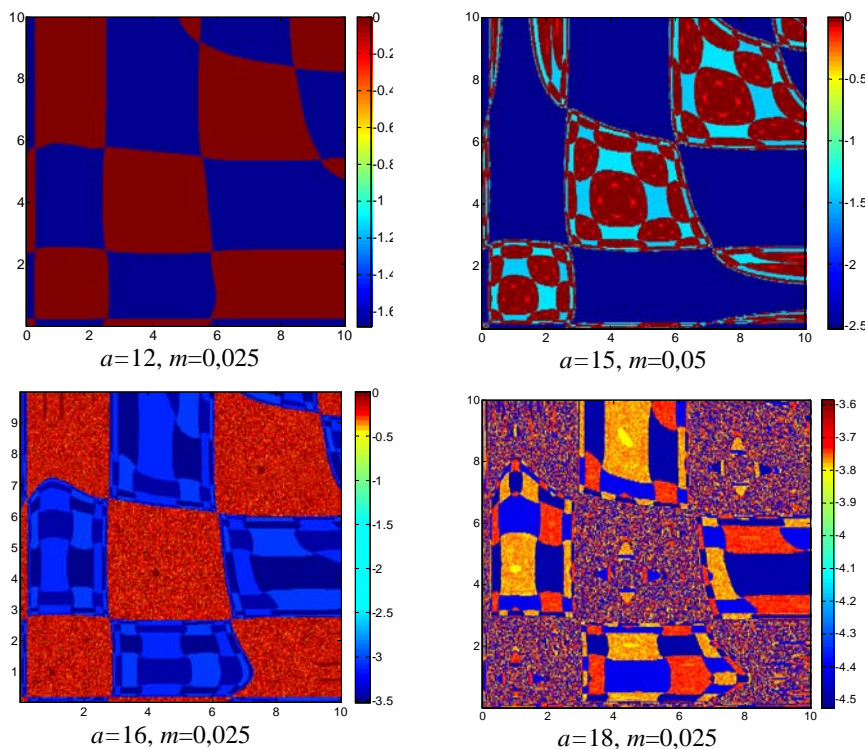


Рисунок. Эволюция бассейна притяжения системы (1)

Интересным также является задача описания механизмов формирования и разрушения синфазной динамики. Было установлено, что потеря устойчивости ветвления цикла сопровождается каскадом рождения возможных элементов цикла. Прежде чем достигнуть одного из возможных устойчивых циклических состояний – полностью синфазных или противофазных траектория системы проходит через неустойчивые циклические состояния – состояний с частичной синхронизацией, проходя по границе двух бассейнов притяжения, где происходит выравнивание фаз колебаний.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке ДВО РАН (конкурсные проекты № 09-I-P15-01, № 09-II-CO-06-006) и РФФИ (проект № 09-04-00146).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛА РАЗВИТИЯ И СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ ЯГОДНОГО КЛОПА (*DOLYCORIS BACCARUM* L.)

Кухарук Е.В.

Ставропольский государственный университет, Ставрополь, Россия
kuth-alena@mail.ru

Аннотация: разработана математическая модель популяции ягодного щитника, позволяющая проследить количество особей на каждой стадии развития в любой момент времени. Полученную модель можно использовать для долгосрочного прогнозирования численности и продолжительности циклов развития полужесткокрылых, зимующих в стадии имаго.

Введение

До настоящего времени моделированию динамики популяций и сообществ наземных животных уделялось гораздо меньше внимания по сравнению с водными. Однако, построение моделей жизненных циклов и динамики популяций насекомых, как одной из наиболее многочисленных групп живых существ, представляет несомненный интерес. Особенно актуально это для видов, представители которых имеют большое хозяйственное значение.

Объекты и методы

В качестве модельного объекта нами был выбран щитник ягодный (*Dolycoris baccarum*). Это один из самых массовых видов клопов-щитников. Его представители наносят немалый вред различным сельскохозяйственным культурам и, кроме того, являются дополнительными хозяевами яйцеедов вредной черепашки на юге России (Каменкова, 1958).

Выход ягодного клопа из диапаузы и продолжительность его жизненного цикла напрямую зависят от погодных условий региона. Вследствие этого в течение одного календарного года *Dolycoris baccarum* дает одно или два поколения.

Целью данной работы было симитировать поведение популяции клопа-щитника в течение года в зависимости от температуры окружающей среды.

Для построения данной модели использовался метод имитационного моделирования, а именно, системная динамика. Этот метод предусматривал построение для исследуемой системы графической диаграммы причинных связей и глобальных влияний одних параметров на другие во времени, а затем создание на основе этой диаграммы компьютерной модели.

Результаты

На рисунке приведена графическая диаграмма причинных связей. По ней построены следующие уравнения:

$$E(t) = E(t-dt) + (I_E * E_0 / 2 - M_E) * dt;$$

$$L(t) = L(t-dt) + (E_L - L_I - M_L) * dt;$$

$$I(t) = I(t - dt) + (L_I - I_E - M_I) * dt;$$

где E – количество отложенных яиц; L – численность личинок; I – численность имаго; $E_L = E * (1 - K_MORT)$ – число яиц, из которых вывелись личинки; $L_I = L * (1 - K_MORT)$ – число личинок, которые превратились в имаго; $I_E = I * (1 - K_MORT)$ – число имаго, произведших потомство; $M_E = E * K_MORT$ – число погибших яиц; $M_L = L * K_MORT$ – естественная смертность личинок; $M_I = I * K_MORT$ – естественная смертность имаго; E_0 – среднее количество яиц на одну самку; K_MORT – коэффициент естественной смертности; t – период времени.

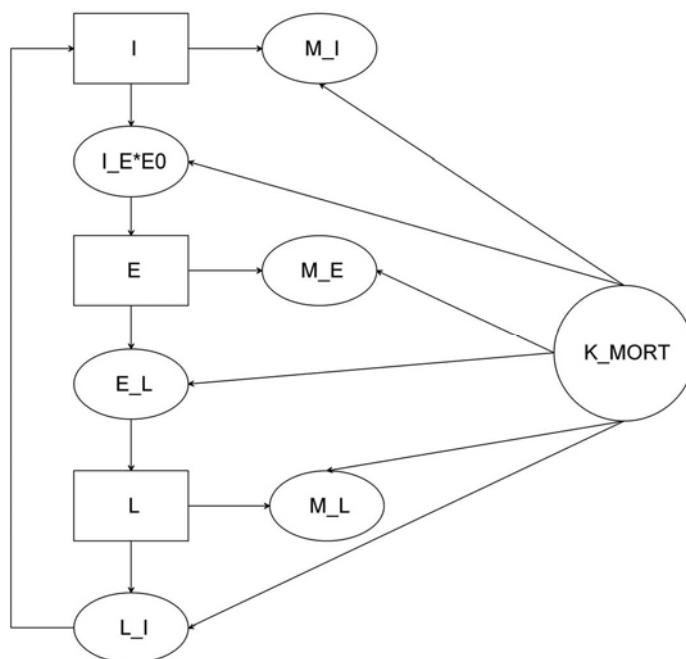


Рисунок. Диаграмма причинных связей

Обсуждение

Разработанная модель позволяет проследить количество особей на каждой стадии развития в любой момент времени. У клопов-щитников, зимующих в стадии имаго, наиболее уязвимыми стадиями являются яйца и личинки, поэтому коэффициент естественной смертности обратно пропорционален возрасту особи. Время, в течение которого возможна нормальная жизнедеятельность ягодного щитника, - число календарных дней, в течение которых среднесуточная температура превышает $+12,5^{\circ}\text{C}$.

Выводы

Полученную модель с некоторыми поправками можно использовать для долгосрочного прогнозирования численности и продолжительности циклов развития ягодного щитника, а также других клопов-щитников, зимующих в стадии имаго. Кроме того, построение подобных моделей необходимо для выяснения синхронизации с циклами развития кормовых объектов и других организмов, с которыми образуются экологические взаимосвязи.

Литература

Каменкова К.В. Биология и экология ягодного клопа (*Dolycoris baccarum* L.) – дополнительного хозяина яйцеедов черепашки в Краснодарском крае // Энтомологическое обозрение.– 1958.– Т. 37, вып. 3.– С. 563-579.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ АДАПТИВНЫХ СЕТЕЙ

Ланкин Ю.П.

Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
lan7@mail.ru

Аннотация: преодоление барьера сложности при описании и моделировании природных систем является одной из наиболее актуальных проблем современной науки. От ее решения зависит возможность выхода из планетарного экологического кризиса и выживание человечества. В работе рассматриваются важные аспекты концепции адаптивных систем, позволяющей создавать сложные иерархические модели экосистем на основе самоорганизующихся адаптивных сетей.

1. Введение: моделирование сложного

При экологическом моделировании сложных систем исследователь сталкивается со следующими проблемами: "Каждое отдельное действие или вмешательство в систему обретает коллективный аспект, который может повлечь за собой совершенно неожиданные глобальные изменения. ...Не только каждое состояние системы, но и само определение системы в том виде, в каком ее описывает модель, обычно нестабильно или по крайней мере метастабильно. ...Очень часто отклик системы на возмущение оказывается противоположным тому, что подсказывает нам наша интуиция. ...Мы приучены мыслить в терминах линейной причинности, но теперь нуждаемся в новых "средствах мышления". (Пригожин, 2001).

2. Вычислительная сложность и вычислимость сложного

Приступая к моделированию экологической сложности, мы оказываемся перед вопросом о ее вычислимости. Этот вопрос вероятно разрешим с помощью теории вычислительной сложности, "...занимающейся изучением ресурсов, необходимых для вычисления данных вычислительных задач. ...существует прямая связь между теорией эволюции и квантовой теорией. ...Законы физики, как мы их понимаем сейчас, допускают универсальность вычисления. ...Эволюция никогда бы не произошла, если бы задача передачи определенных свойств ... не была *легко обрабатываемой* (т.е. вычислимой в течении разумного периода времени) при использовании в качестве компьютеров легко доступных молекул." (Дойч, 2006). Известный специалист по квантовой теории и квантовым вычислениям Д.Дойч основные надежды на рост возможностей вычислительных систем, обеспечивающих моделирование сложности, возлагает на квантовые компьютеры.

3. Законы самоорганизации

Первый прорыв в покорении сложности осуществила синергетика – наука о самоорганизации природных систем (Николис, 2003; Пригожин, 2001). Благодаря ее открытиям стало понятно различие между живым и неживым, причины устойчивости и необычного поведения сложных систем окружающего мира и др. В последнее время ее достижения обогатились теорией синергетического управления (Колесников, 2006^(б)), уже позволившей уточнить законы тяготения (Колесников, 2006^(а)). Однако ее модели часто критикуют за простоту, ограничивающую возможности изучения открытых ею всеобщих законов. Причины трудностей лежат в *негибкости* традиционных математических методов.

4. Адаптивные системы

Второй прорыв за барьер сложности сделала нейрокибернетика. Исследование возможностей обработки информации на моделях нейронных сетей мозга привели к появлению нейроинформатики. К настоящему времени на счету нейроинформатики

огромное число достижений в решении разнообразных задач науки и техники и солидный арсенал математических методов (Хайкин, 2006). Во многих ее моделях не накладывается ограничений на максимально возможное число связей и элементов (формальных нейронов). Однако использование нейронных сетей для *гибкого* моделирования экологической сложности критикуется за несоответствие их структуры структуре экологических систем, приводящее к трудностям понимания и анализа результатов моделирования.

5. Концепция адаптивных систем (КАС)

Тщательный анализ проблемы показал, что моделирование экологической сложности возможно на основе синтеза системных подходов, представленных синергетикой и нейрокибернетикой. К настоящему времени этот синтез выполнен в КАС, предложенной в работе (Ланкин, 2001). Как известно, вид аттракторов задается в синергетике управляющими параметрами. В КАС установлено, что вид аттрактивного рельефа системы определяется, в первую очередь, ее связями. На основании этого факта предложено рассматривать связи системы в качестве управляющих параметров самоорганизующихся (в том числе, иерархических) моделей. Введено понятие самоорганизации управляющих параметров. Динамическую самоорганизацию аттрактивного рельефа (с помощью управляющих параметров), обеспечивающую требуемую самоорганизацию параметров порядка системы, предложено осуществлять алгоритмами адаптивной самоорганизации (самостоятельной адаптации), разрабатываемыми в рамках КАС (Lankin, 2004 и др.). Разработку и апробацию таких алгоритмов удобно вести на базе моделей нейронных сетей. Важными преимуществами предложенного подхода являются: возможность использования богатого опыта нейроинформатики в создании математических методов для моделирования экологической сложности и возможность прямого применения полученных алгоритмов в задачах обработки информации. В отличие от традиционных специализированных алгоритмов нейроинформатики, универсальные алгоритмы КАС создаются с учетом их функционирования в моделях экосистем. Парадоксально, но рост сложности и точности упрощает анализ поведения моделей, поскольку самоорганизация "сжимает" сложность до небольшого числа степеней свободы системы. Другие соответствия с экосистемами проявляются в росте устойчивости модели с ростом ее сложности и в идентичности процессов самоорганизации на всех уровнях иерархии сложных систем и для разных систем.

6. Выводы

КАС возникла, как обобщение свойств природных систем. Ее модели, базирующиеся на открытиях синергетики, ориентированы на изменение статуса биосферы и ее экосистем с уникального на закономерный. В случае успеха, появляется надежда сделать экосистемы законными объектами науки и выйти на разрешение проблемы кризиса биосферы.

Литература

- Дойч Д. Структура реальности: Пер. с англ.- Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001.- 400с.
Колесников А.А. Гравитация и самоорганизация.- М.: КомКнига, 2006.- 112с. (а)
Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза.- М.: КомКнига, 2006.- 240с. (б)
Ланкин Ю.П., Хлебопрос Р.Г. Экологические основания концепции самоадаптирующихся сетей и систем с поисковым поведением // Инженерная экология.- 2001.- №2.- С.2-26.
Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение: Пер с англ.- М.: Едиториал УРСС, 2003.- 344с.
Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой: Пер. с англ.- М.: Едиториал УРСС, 2001.- 312с.
Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: Пер с англ.- М.: Издат. дом "Вильямс", 2006.- 1104с.
Lankin J.P., Baskanova T.F. Algorithms of self-adaptation for atmospheric model designing // SPIE.- 2004.- V.5397.- P.260-270.

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УРБАНОЭКОСИСТЕМ СЕВЕРНЫХ ГОРОДОВ РОССИИ

Лантратова А.С.¹, Шредерс М.А.²

¹*Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия*
mih_val@mail.ru

²*Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия*
mshred@psu.karelia.ru

Аннотация: город – сложная открытая урбаноэкосистема, в которой постоянно наблюдаются процессы трансформации, связанные с воздействием антропогенного фактора на природно-климатические условия городской среды. Установлена структура урбаноэкосистем, характерная для городов северной России. Полученный фактический материал может быть использован при разработке природоохранных мероприятий и создании новых озеленительных комплексов в северных городах России.

По данным многочисленных исследований к 2020 году в большинстве стран мира основу будет составлять городское население. В связи с этим высокая урбанизация территорий требует создания комфортных условий для жизни городского населения.

Одним из показателей комфортности является наличие высокого уровня озеленения. Благоприятными считаются условия, при которых на 1 жителя приходится не менее 25 м² зеленых насаждений, в Петрозаводске из-за неравномерного распределения парков и скверов по микрорайонам в среднем на одного жителя приходится всего лишь 6,4 м² зелени.

На протяжении XX и начала XXI вв. на планете наблюдается тенденция переселения населения в города. Если в 1830 году в городах планеты проживало около 3 % населения, то к 2020 году около 57 % населения мира предполагают жить в городах (Осипов, Медведев, 1997). Эта тенденция характерна и для городов северной России. В связи с этим остро встает вопрос, связанный с созданием комфортных условий жизни человека в городской среде.

Целью наших исследований являлось установление структурно-функциональных элементов урбаноэкосистемы, как объекта восстановления, реконструкции и охраны, расположенные в суровых природно-климатических условиях Севера.

В задачи исследований входило:

- проведение инвентаризации урбаноэкосистемы города с картированием;
- описание и структурный анализ экотопов;
- влияние основных параметров структурных экотопов.

Объектами исследования служили структурно-функциональные параметры элементов урбаноэкосистемы.

Методы исследования:

- сравнительно-фитоценотический;
- эколого-статистический;
- ГИС технологий.

Полевые и лабораторные исследования проводились в течении 2005-2009 гг. на территории г. Петрозаводска, расположенного на побережье Онежского озера. Город основан в 1703 г. Петром I, входит в состав старейших городов России. Площадь города – 121,8 км², с населением - 282.1 тыс. чел.

Ландшафт города сформирован на древних вулканических кристаллических отложениях в процессе неоднократного четвертичного оледенения и связан с миграционными процессами береговой части озера.

Полевые исследования включали инвентаризацию элементов урбаноэкосистемы по специально разработанным бланкам. Картирование растительных формаций и обработка материала проводилась с использованием ГИС технологий.

В процессе полевых эколого-фитоценологических исследований установлена вертикальная и горизонтальная структура растительного покрова урбаноэкосистемы. А так же

выявлена неоднородность слагающих растительных формаций, обусловленная воздействием природных условий и антропогенного фактора. Исследования позволили в урбаноэкосистеме выделить экотопы, отличающиеся структурно-функциональными параметрами (рисунок). На основе флорогенеза и эколого-статистического метода анализа в урбаноэкосистеме выделены два типа экотопов: естественные и искусственные.

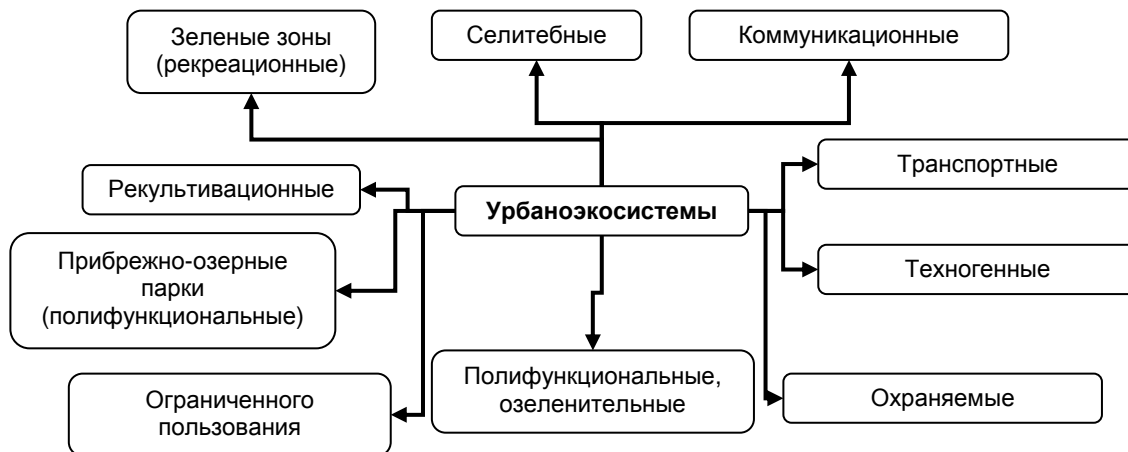


Рисунок. Структурно-функциональные экотопы в урбаноэкосистеме г. Петрозаводска

Естественные экотопы в городах Севера сформированы зелеными (пригородными) еловыми и елово-сосновыми лесами, относящимися к группе рекреационных лесов, находящихся под постоянным антропогенным воздействием. В состав этой группы входят долинные, прибрежно-озерные естественные смешанные леса и микроэкотопы, острова естественного леса, в системе искусственных экотопов.

Искусственные экотопы на основе эколого-фитоценотического метода разделены нами на полифункциональные и монофункциональные. В состав полифункциональных экотопов включены: селиберные, коммуникационные, транспортные, техногенные, рекультивационные парки, озеленительные комплексы (парки, скверы, бульвары, курдонеры и др.). Монофункциональные территории зеленых насаждений ограниченного пользования (скверы детских садов, школ, поликлиник, больниц, парки санаториев, находящиеся в городской черте). В состав этой группы входят исторические парки, рекультивационные – особо охраняемые, с ограниченным антропогенным воздействием.

Каждый выделенный экотоп отличается эколого-статистическими показателями (влажность, трофность и т.д.).

Неоднородность городской среды и различный уровень антропогенного воздействия ставит необходимость разработки специфических озеленительных комплексов для создания комфортных условий для жизни человека. Особенно селитебные экотопы, где при нарушении нормативных форм застройки, особенно при строительстве микрорайонов, создают «каменную» городскую среду для жизни человека. Полученный нами фактический материал по полифункциональным экотопам позволяет проводить реконструкцию зеленых насаждений и использовать его при создании новых озеленительных комплексов.

Литература

- Морозова Г.Ю., Злобин Ю.А., Мельник Т.Н. Растения в урбанизированной природной среде: формирование флоры и структура популяций // Журн. Общая биология. – 2003. – Т.64, №2. – С. 166-180.
Осипов В.И., Медведев О.П. Москва: геология и город. – М.: Изд-во Москов. Учебники и картография, 1997. – 400 с.
Good D.A. Urban nature conservation Britania. 1989. J. Appl. Ecol. – V.26. № 3. – P. 859-873.

СРАВНЕНИЕ НАЗЕМНОЙ И СПУТНИКОВОЙ ОЦЕНОК ЧИСТОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ПРИМЕРЕ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЗАПАДНОГО САЯНА

Ларько А.А.¹, Иванова Ю.Д.¹, Овчинникова Н.Ф.²

¹ИБФ СО РАН, Красноярск, Россия
ibp@ibp.krasnoyarsk.su

²ИЛ СО РАН, Красноярск, Россия
il@il.krasnoyarsk.su

Аннотация: одним из параметров, характеризующих глобальный углеродный цикл, является чистая первичная продуктивность (ЧПП), которая показывает количество углерода, ассимилированного зелеными растениями из атмосферы. В данной работе сравниваются два способа оценки ЧПП для одних и тех же территориальных участков. Это оценка на основе космических данных и на основе морфометрических измерений.

Изменение климатических тенденций во многих регионах планеты стимулировало интерес к исследованиям глобального круговорота углерода и параметрам, которые характеризуют этот процесс. Эти исследования позволяют не только оценить потоки углерода в различных экосистемах планеты, но и предсказать возможные сценарии количественных и качественных изменений этих процессов. Одним из параметров, характеризующих глобальный углеродный цикл, является чистая первичная продуктивность (ЧПП), которая показывает количество углерода, ассимилированного зелеными растениями из атмосферы благодаря процессу фотосинтеза. Основной трудностью при рассмотрении ЧПП является значительная трудоемкость при определении ее текущего значения для различных экосистем. Величину ЧПП возможно только оценить, и для этого разработаны соответствующие методы. Поэтому на сегодняшний день важно понять, чем отличаются различные методы оценки ЧПП и насколько совпадают получаемые разными методами значения. Сравнение параметров, по которым получают различные оценки ЧПП, позволяет приблизиться к пониманию, на каком этапе возможны недочеты и ошибки, недо- и переоценки рассматриваемой величины.

В данной работе сравниваются два способа оценки ЧПП. Это оценка на основе космических данных и оценка, основанная на расчете биомассы нескольких наземных лесных экосистем. Оценки ЧПП, полученные различными способами, даны для одних и тех же территориальных участков. Это позволяет выделить специфические, присущие каждому способу важнейшие параметры, от которых зависит получаемая оценка.

Объектом исследования была взята территория на юге Красноярского края, предгорье Западного Саяна - места постоянных пробных площадей ИЛ СО РАН где наблюдения проводятся с 1960г. Эта территория характеризуется четко выраженной поясностью наблюдаемых лесных экосистем. Здесь на небольшой по площади территории с ростом высоты над уровнем моря можно наблюдать три различные экосистемы: черневой пояс, горнотаежный, и субальпийский. ЧПП этих экосистем оценивается двумя различными методами.

Методы расчета ЧПП:

- по наземным измерениям – расчет фитомассы растений на рассматриваемой площади на основе морфометрических измерений (высота, диаметр ствола, объем кроны и т. д.) и по изменению фитомассы за определенный промежуток времени.

- по данным дистанционного спутникового зондирования - расчет ЧПП базируется на данных спектральных спутниковых каналов и данных о подстилающей поверхности.

Чтобы оценить значение глобальной чистой первичной продукции по спутниковым данным существует множество расчетных моделей, но почти все они используют данные спутника NOAA/AVHRR и разработаны исключительно под них. Однако, на сегодняшний день, сканер AVHRR устарел и обладает малым количеством спектральных каналов

пригодных для изучения растительности (Xiao, 2004). Поэтому для расчета NPP была разработана информационная система, основанная на модели GLO-PEM, которая работает по данным сканера нового поколения - MODIS/TERRA (Goetz, 1999; Goldberg, 1980).

При оценке ЧПП разными способами используются разные физические величины, имеющие различное временное и пространственное распределение. Величина ЧПП, получаемая в обоих случаях различна по своему внутреннему содержанию. Например, если значение спутниковой ЧПП рассчитываются практически каждый день и из этих значений составляют недельные, декадные и т.д. композиты, то наземные измерения делаются гораздо реже, особенно, что касается лесных экосистем, и ЧПП рассчитывается за год, 5,10 лет.

Если рассмотреть преимущества и недостатки каждого метода, то способ прямого измерения прироста биомассы по морфометрическим данным и последующий пересчет в количество углерода (Стаканов, 1994) дает оценку ЧПП на данном участке почти достоверно. Но поскольку стоит задача оценивать ЧПП на больших площадях (в пределе - глобально), то возникает погрешность экстраполяции. Привязка, вычисленных на основе спутниковых данных, значений ЧПП к данным наземных измерений позволяет затем проводить корректируемую экстраполяцию оценок ЧПП от точек привязки.

Оценки ЧПП по наземным измерениям и по спутниковым данным в лесных экосистемах черневого и горнотаежного поясов предгорья Западного Саяна показывают расхождение величин ЧПП. Практически совпали оценки для участка леса в наиболее благоприятном для роста и развития растений – черневом поясе, где произрастают лиственные и хвойные породы деревьев. В горнотаежном и субальпийском поясах, по спутниковым данным, получается большее значение величины ЧПП. Эта переоценка связана с тем, что ЧПП, рассчитанная по спутниковым данным, напрямую зависит от породного состава древостоя: лиственные или хвойные насаждения находятся на участке. Расчет данной ЧПП идет на основе вегетативного индекса NDVI, величина которого напрямую зависит от состояния листовых пластинок или хвои и наличия в них хлорофилла, в большей степени отражая не продолжительность вегетационного периода, а наличие вечнозеленых хвойных растений. В последующих доработках модели переоценка ЧПП в хвойных лесных экосистемах будет скорректирована за счет продолжительности вегетационного периода.

Работа поддержана интеграционным проектом СО РАН №50.

Литература

- Стаканов В.Д., Алексеев В.А., Коротков И.А., Климушин Б.Л. Методика определения запасов фитомассы и углерода лесных сообществ // Углерод в экосистемах Сибири (под ред. В.А.Алексеева и Р.А. Бердси).- Красноярск. 1994.- 170 с.
- Goldberg В. A model for determining the spectral quality of daylight on a horizontal surface at any geographical location // Solar Energy.- 1980.- №24.- С. 351-357.
- Goetz S.J. Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach // Ecological Modelling.- 1999.- №122.- С. 239-255.
- Xiao X. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest // Remote Sensing of Environment.- 2004.- №89.- С. 519-534.

ЧИСТАЯ ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ И НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ (КАК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОСНОВА ДЛЯ ГЛОБАЛЬНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

Ларько А. А., Шевырногов А.П., Чернецкий М.Ю.

Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
ap@ibp.ru

Аннотация: проведена оценка ЧПП для бореальных лесов Красноярского края. Полученные данные были сопоставлены с наземными измерениями ЧПП бореальных лесов. На основе откорректированной модели получен временной ряд значений ЧПП для Красноярского края, анализ которого показал неоднородность пространственного распределения ЧПП в зависимости от климатических условий, породного состава и географической широты изучаемых объектов.

Одной из наиболее важных характеристик, используемых при глобальном экологическом моделировании, является динамика чистой первичной продукции (ЧПП).

ЧПП - количество чистого углерода связанного растениями за определенное время. Этот основной показатель отражающий интенсивность углеродного биохимического цикла. Он может быть индикатором состояния экосистемы, и интенсивности потоков биосферного углерода. Использование ЧПП может быть необходимым для экологических исследований, расчета углеродного цикла и пространственного распределения природных ресурсов.

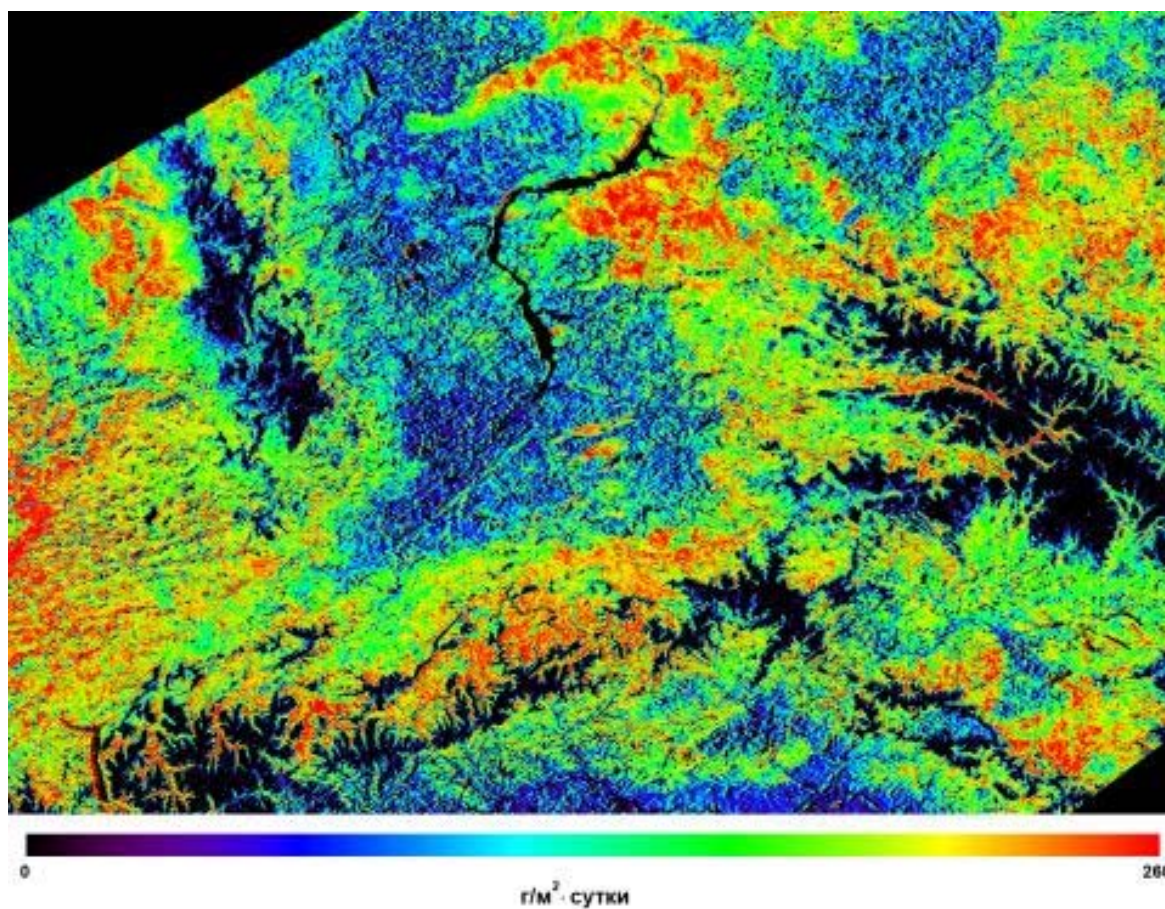


Рисунок. ЧПП юга Красноярского края, с 17.06.2000 по 24.06.2000 гг.

Наземные экосистемы по сравнению с океаническими определяют большинство сезонных и многолетних изменений концентрации атмосферного CO₂ планеты.

Известно, что для расчета глобального распределения ЧПП могут эффективно использоваться спутниковые методы исследования. В свою очередь, изучение динамики ЧПП бореальных лесов требуется для понимания их роли в цикле углерода и верификации глобальных экологических моделей. В настоящее время, существует множество расчетных моделей для изучения пространственного распределения ЧПП.

В данной работе была проведена оценка пространственного распределения ЧПП для бореальных лесов Красноярского края. Для расчета использовалась модель GloPEM, в которой используются спутниковые данные TERRA/MODIS и TOMS.

Полученные данные были сопоставлены с наземными экспериментальными и расчетными значениями ЧПП бореальных лесов Красноярского края, что дало возможность корректировки спутниковой модели для этого региона.

На основе откорректированной модели был получен временной ряд изображений ЧПП для Красноярского края, это позволило произвести анализ динамики этой характеристики, который показал неоднородность пространственного распределения ЧПП (рисунок), в зависимости от климатических условий, породного состава и географической широты изучаемых объектов.

Литература

- Шевырногов А.П., Сидько А.Ф., Чернецкий М. Ю., Высоцкая Г.С. Анализ динамики отражательной способности хвойных и лиственных древостоев на территории Красноярского края по наземным и спутниковым измерениям. Исследование Земли из космоса.- 2006, № 2.- С. 71-78.
- Scott J. Goetz , Stephen D. Prince, Samuel N. Goward, Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach., Ecological Modelling 122 (1999) 239–255.
- Shevymogov A., Vysotskaya G., Sukhinin A., Frolikova O., Tchernetsky M. Results of analysis of human impact on environment using the time series of vegetation satellite images around large industrial centers. // Advances in Space Research, Volume 41, Issue 1, 2008, pp. 36-40.
- Xiangming Xiao, David Hollinger, John Aber, Mike Goltz, Eric A. Davidson, Qingyuan Zhang, Berrien Moore III, Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest, Remote Sensing of Environment 89 (2004) 519–534.

ДОЛЖЕН ЛИ МАТЕМАТИК/"МОДЕЛЬЕР" ДОВЕРЯТЬ КОМПЬЮТЕРАМ?

Логофет Д.О.

Институт физики атмосферы РАН, Москва, Российская Федерация

danilal@postman.ru

Аннотация: вопрос, вынесенный в заголовок, уместен уже потому, что представление чисел в компьютере конечно, а точность вычислений не абсолютна. В конкретных ситуациях вопрос доверия должен и может решаться с позиций соответствующей математической теории. Там же, где речь идет, о «доверии» коммерческим продуктам софтвера, необходимо выяснять соответствие между постулатами модели и ограничениями/рецептами конкретного продукта.

1. Введение

Хотя заголовок и может показаться шуткой, «доля истины» уже в том, что идеальные математические объекты, как например, *ось действительных чисел*, невозможно представить с абсолютной адекватностью в компьютере в силу принципиальной конечности последнего. Следствия из этого факта многочисленны и по-разному проявляются в приложениях. Другая истина состоит в том, что фундаментальное математическое образование хотя и закладывает основы как математики, так и информатики, но оставляет порой некоторые пробелы между ними – спрятанные за высокими дипломами, но способные неожиданно проявиться в практических вопросах. Приведенные иллюстрации касаются применения теоремы Перрона–Фробениуса для неотрицательных матриц.

Иной источник «недоверия» связан с использованием коммерческих продуктов софтвера, которые существенно облегчают процедуры построения математических моделей, но оставляют «за кадром» вопросы адекватности применяемых методов сути решаемой задачи. Приведенный в докладе пример принципиального несоответствия такого рода относится к проблеме калибровки матричных моделей динамики популяций со сложной структурой в условиях «репродуктивной неопределенности». Для решения проблемы предлагается использовать некий экстремальный принцип в сочетании с результатами математического анализа достаточно широкого класса моделей. Это решение принципиально отличается от готовых рецептов моделирующего пакета и открывает новые возможности в деле проверки исследовательских гипотез.

2. Неотрицательные матрицы и их спектры

Целый букет поводов для недоверия компьютеру дает классическая теорема Перрона–Фробениуса, точнее, то, как студенты-математики ее воспринимают и применяют. Теорема утверждает, что в спектре неотрицательной неразложимой матрицы A всегда существует положительное собственное число λ_1 , которое совпадает со спектральным радиусом, и отвечающий ему, *положительный* собственный вектор. Однако стандартные машинные процедуры (в системах MatLab[®], Maple[®] и т.п.) могут предложить в качестве такового вектор со всеми отрицательными компонентами – и этим полностью обескуражить студента, который сам когда-то убеждал экзаменатора по линейной алгебре, что собственный вектор матрицы всегда определяется с точностью до умножения на ненулевой скаляр.

Другой повод для недоумений возникает в связи с *индексом примитивности*, который Теорема определяет как количество h собственных чисел A , чей модуль совпадает со спектральным радиусом. Но если, получив в компьютере весь спектр заданной матрицы, вы будете вычислять ее индекс h как число, показывающее, сколько раз равенство $\text{abs}(\lambda_j) = \lambda_1$ осуществилось у вас в компьютере, то вряд ли получите правильный ответ, поскольку теоретически равные $\lambda_1 = \text{abs}(\lambda_2) = \text{abs}(\lambda_3) = \dots = \text{abs}(\lambda_h)$ фактически вычисляются с конечной точностью, а стало быть, вовсе не обязаны совпадать в компьютере. Сравнение в пределах конечной погрешности тоже может внести путаницу, когда теоретически разные собственные

значения близки настолько, что попадают в интервал погрешности. Таким образом, индекс h – эта количественная характеристика матрицы – нуждается в грубой – скажем, *качественной* – характеристике. В теории матриц такая характеристика известна и выражается через длины циклов в *орграфе*, ассоциированном с матрицей (Horn & Rogers, 1990).

3. Пакет RAMAS[®] и принципы калибровки

Широко известный в США пакет экологических моделей RAMAS[®]Ecolab предлагает пользователям выбор из трех рецептов, как оценивать демографические параметры в матричной модели динамики популяции со стадийной структурой по имеющимся данным (Аксакаева et al., 1999). Однако ни один из рецептов не приемлем в довольно типичной ситуации с данными, которую Н. Caswell (2001) назвал *identified individuals* и которая имеет место в нашем проекте изучения динамики популяции вейника *Calamagrostis canescens* при зарастании лесных вырубков (Уланова и др., 2002). Основное уравнение модели

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{L}\mathbf{x}(t), \quad t = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

задает динамику (наблюдаемого в реальности) вектора *стадийно-возрастной* структуры популяции $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n_+$ (в частном примере $n = 11$) с помощью *проекционной* матрицы $\mathbf{L} = \mathbf{T} + \mathbf{F}$, у которой часть $\mathbf{T} = (t_{ij})$ содержит только коэффициенты дожития и онтогенетических переходов, а \mathbf{F} – только коэффициенты репродукции $b_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$ (элементы первой строки). В качестве ассоциированного орграфа матрица \mathbf{L} имеет то, что принято называть *графом жизненного цикла*, и что в нашем случае отражает весьма развитые представления отечественной школы геоботаники о стадийно-возрастных *состояниях* и разнообразных путях размножения и *онтогенеза* индивидуальных растений.

Ежегодные наблюдения за маркированными растениями на постоянных пробных площадках позволяют напрямую вычислить элементы \mathbf{T} , но элементы \mathbf{F} , остаются неопределенными, поскольку родителя каждого нового растения нельзя определить, не разрушая площадку. Уравнение 1 задает наблюдаемый *баланс пополнения* популяции

$$x_1(1) - t_{11}x_1(0) = b_1x_1(0) + b_2x_2(0) + \dots + b_nx_n(0), \quad (2)$$

который лишь ограничивает неизвестные b_j , оставляя их неопределенными. А число $\lambda_1(\mathbf{L}) > 0$ – главная характеристика популяционного роста – оказывается настолько чувствительным к вариациям b_j , что они способны качественно изменить картину роста – с $\lambda_1 > 1$ на $\lambda_1 < 1$ – даже при соблюдении баланса 2 (Logofet, 2008) – эффект *репродуктивной неопределенности*.

RAMAS[®]Ecolab советует избавляться от неопределенности, полагая распределение статус-специфических b_j либо сингулярным, либо равномерным по всем статусам j с ненулевой рождаемостью (тогда искомое значение b однозначно следует из упрощенного уравнения 2). Понятно, что ни то, ни другое решение не адекватно реальной биологии вида, у которого *поливариантность онтогенеза* признается основным популяционным механизмом адаптации. Общая же рекомендация калибровать модель «методом наименьших квадратов» по достаточно длинному временному ряду данных неприемлема потому, что линейное описание 1 может быть справедливым лишь на коротком временном отрезке экстенсивного роста популяции, когда вейник активно захватывает открытое пространство (Уланова и др., 2008).

Наше решение задачи калибровки опирается на идею Ю.М. Свирежева (давно и плодотворно применяемую его учениками и последователями) о замещении недостатка в данных и/или знаниях некоторым адаптивным принципом («эмпирическим обобщением»): неопределенные статус-специфические коэффициенты репродукции выбираются такими, что они максимизируют значение λ_1 при всех ограничениях, вытекающих из доступных данных и знаний. Как только матрица \mathbf{T} вычислена по данным наблюдений, задача калибровки модели математически сводится к решению нелинейной задачи на максимум λ_1 как функции многих переменных b_1, b_2, \dots, b_n при сформулированных ограничениях.

Продукты софтвера (например, MatLab[®] Optimization Toolbox) предлагают свои процедуры для поиска решения таких задач, но и на этом пути возникает повод для «недоверия» компьютеру: результат применения такой процедуры всегда представляет собой

некоторый *локальный* экстремум, а дает ли он глобальное решение поставленной задачи, остается вне процедуры.

4. Индикатор потенциального роста: упражнение ума или полезный инструмент?

Если матрица L задана численно, то само понятие *индикатора потенциального роста* (ИПР) как явной функции от ее элементов, значение которой индицирует свойство доминантного собственного числа $\lambda_1(L) >, =, < 1$ (Логофет, Белова, 2007), склоняет лишь к первому варианту ответа на поставленный выше вопрос. Действительно, чего ради вычислять ИПР, если можно вычислить само число $\lambda_1(L)$? Однако теорема Клочковой, которая устанавливает явный вид ИПР для широкого класса проекционных матриц путем перебора циклов в ассоциированном орграфе (Логофет, Белова, 2007), оказалась неожиданно полезной в решении практической задачи калибровки, описанной выше. Как только вычислены элементы матрицы T , ИПР превращается в *линейную* функцию неизвестных $b_j \geq 0$, а задача ее максимизации при заданных ограничениях представляет собой стандартную задачу *линейного программирования* – с известным методом решения и гарантированным результатом. Решая линейную задачу, мы устанавливаем, являются ли дополнительные экспертные гипотезы о соотношении параметров рождаемости в статусных группах (например, $b_2 \geq b_3$) или/и о соотношении их вкладов в пополнение популяции (например, $b_2x_2(0) \geq b_3x_3(0)$) совместимыми с данными наблюдений и фактом роста популяции ($\lambda_1 > 1$). Теорема превращается тогда в надежный (нестатистический!) инструмент проверки гипотез относительно объекта моделирования.

5. Заключение

Конечность компьютера не должна служить основанием для «презумпции вины» в случаях его странного и непонятного поведения. «Адвокатом» выступает адекватное математическое знание, способное превратить модель и компьютер в инструмент, доверять которому можно и должно.

Литература

- Логофет Д.О., Белова И.Н. Неотрицательные матрицы как инструмент моделирования динамики популяций: классические модели и современные обобщения // *Фундаментальная и прикладная математика.*– 2007. Т. 13, № 4.– С. 145–164.
- Уланова Н.Г., Демидова А.Н., Клочкова И.Н., Логофет Д.О. Структура и динамика популяции вейника седеющего *Calamagrostis canescens*: модельный подход // *Журнал общей биологии.*–2002.–Т.63.– № 6.– С. 509–521.
- Уланова Н.Г., Белова И.Н., Логофет Д.О. О конкуренции среди популяций с дискретной структурой: динамика популяций вейника и березы, растущих совместно // *Журнал общей биологии.*– 2008.–Т. 69.– С. 478–494.
- Ақсақауа R.H., Burgman M. A., Ginzburg L. R. *Applied Population Ecology: principles and computer exercises using RAMAS EcoLab 2.0*, 2nd ed.- Sunderland, MA: Sinauer, 1999.– 280 p.
- Caswell H. *Matrix population models: construction, analysis, and interpretation*, 2nd ed. Sunderland, MA: Sinauer, 2001.– 722 p.
- Horn R.A., Johnson, C.R. *Matrix Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.– 561 p.
- Logofet D.O. Convexity in projection matrices: projection to a calibration problem // *Ecological Modelling.*– 2008.– 216/2.– P. 217–228.

Взаимосвязи почва - растительность в ходе сукцессий бореальных лесов

Лукина Н.В., Орлова М.А.

Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Россия

lukina@cepl.rssi.ru

Аннотация: рассматривается проблема взаимосвязи между почвами и растительностью в лесных БГЦ. Обосновывается элементарная единица почвенно-растительного лесного покрова – тессера. Показаны тенденции смены тессер и изменения информативных характеристик плодородия почв в ходе сукцессий бореальных лесов.

Леса как детритные системы организованы таким образом, что в них усилена регенерация и многократное использование элементов питания. На продвинутых стадиях сукцессии растительные, животные и микробные компоненты в лесах сочетаются таким образом, что высвобожденные элементы питания сразу же снова поглощаются другими организмами. Согласно широко признанным концепциям Ю. Одума и других ученых в ходе аутогенных сукцессий: а - циклы элементов питания становятся более замкнутыми; б - снижается необходимость в использовании элементов из внешней, не охваченной жизнью, среды; в- элементы питания удерживаются в экосистемах длительное время благодаря многократному их использованию; г- элементы, прошедшие через живое вещество, сохраняются в благоприятных, доступных для живых организмов соотношениях.

Обособление живого вещества от косной материи на начальных стадиях первичной сукцессии происходит путем формирования источника доступных для живых организмов соединений элементов питания - почв, что энергетически выгодно для организмов (Лапенис, 2004). Растительность и почвы связаны потоками энергии и вещества и совместно с животными и микроорганизмами формируют целостный лесной биогеоценотический покров. Исследование закономерностей сукцессионной динамики лесного покрова связано с решением проблемы взаимосвязи между почвенным и растительным покровом. Ключевыми моментами в решении этой проблемы являются: 1 - разработка иерархии пространственных уровней, на которых эти взаимосвязи реализуются; 2 - выявление отражающих эти взаимосвязи информативных параметров.

Для выявления взаимосвязей между лесными почвами и растительностью предельно малой территориальной единицей почвенно-растительного покрова, на наш взгляд, является тессера. Для растений почва является источником питания, а главное свойство почв - плодородие. Поэтому параметры плодородия почв, которое формируется под действием биоты, в том числе растений, являются информативными показателями взаимосвязи между почвенным и растительным покровом.

Проведенные нами исследования в бореальных лесах (Мурманская область, республика Карелия, республика Коми, Вологодская область) показали достоверные различия между основными тессерами (еловые, сосновые, лишайниковые, зеленомошные, кустарничково-лишайниковые, кустарничково-зеленомошные, зеленомошно-мелкотравные, высокотравные) в таких показателях плодородия почв, особенно, органогенных горизонтов, как рН, концентрация доступного для растений кальция, отношений Собщ: N общ, C общ : Са доступный, C общ : P доступный. В ходе сукцессий происходит закономерная смена тессер, обусловленная сменой доминирующих видов, что приводит к изменению параметров плодородия почв.

Согласно второму биогеохимическому принципу В.И.Вернадского, эволюционное преимущество должны иметь виды, способные ускорить циклы элементов питания, что приводит к большему обособлению живого вещества от косной материи, к увеличению их продуктивности и меньшей зависимости от изменений внешних условий. Сходные закономерности проявляются и в ходе аутогенной сукцессии. Увеличение содержания элементов питания в почвах в ходе сукцессии дает преимущества видам растений,

способным к активному росту и продуцирующим быстроразлагающийся опад. На более продвинутых стадиях аутогенной сукцессии лесов доминируют тессеры со значительным участием трав. При этом возрастает содержание доступных для живых организмов соединений элементов питания в почвах, сужаются отношения $\text{Собщ} : \text{N общ} : \text{C общ} : \text{Ca доступный} : \text{P доступный}$ в органогенных горизонтах. При увеличении плодородия почв медленно растущие виды не конкурентоспособны и сменяются быстрорастущими. Согласно современным представлениям, существует тесная связь между скоростью роста, продолжительностью жизни органов растений и способностью к разложению их тканей после отмирания (Berendse, 1998). Обычно наблюдается положительная корреляция между скоростью опада, потенциальной скоростью роста и способностью к разложению, что отражается на действии, которое растения оказывают на динамику органического вещества и минерализацию элементов питания. Эти свойства растений оказывают влияние не только на почвенное плодородие, но и определяют результат конкуренции между растениями. Виды растений, которые способны замещать другие виды при увеличении плодородия почв, способны далее ускорять минерализацию (положительная обратная связь). Такие воздействия значительно ускоряют изменения в составе видов в ходе сукцессии лесов, особенно бедных элементами питания.

Изменение параметров плодородия почв и биогеохимических циклов в ходе аллогенных сукцессий носит обратный характер. Комбинированное действие пожаров и техногенного загрязнения вызывает закономерную смену тессер, формируемых немногочисленными устойчивыми к загрязнению видами, возрастание подвижности элементов питания при снижении активности их биологического поглощения, что приводит к обеднению почв, размыканию циклов, интенсификации процессов элювиирования и оподзоливания.

Литература

- Лапенис А.Г. Принципы биогеохимической селекции организмов и направленная эволюция биосферы // Рассеянные элементы в бореальных лесах / Никонов В.В., Лукина Н.В., Безель В.С. и др.; Отв. ред. Исаев А.С.- М.: Наука, 2004.- С. 616.
- Berendse F. Effects of dominant plant species on soils during succession in nutrient-poor ecosystems. *Biogeochemistry*, v.42, 1998, p.73-88.

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ АГРОСЕРЫХ ПОЧВ С ПОМОЩЬЮ РЯДА СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ

Лукьященко К.И.¹, Архангельская Т.А.²

^{1,2} *Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

¹ ksenia_lu@list.ru

² arhangelskaia@rambler.ru

Аннотация: проанализирована точность математического моделирования теплопроводности почв различными моделями (на примере агросерых почв Владимирского ополья). Применение моделей Чанга и Хортон, Кемпбелла, Лю с соавт., де Фриза позволяет оценить теплопроводность среднесуглинистых агросерых почв со среднеквадратичными относительными ошибками 66-113%. Использование модели Архангельской позволяет уменьшить ошибки расчетов до 9-32%.

Введение

В современной физике почв используется ряд моделей, позволяющих рассчитывать тепловые свойства почв на основе данных об их плотности, содержании органического вещества, гранулометрическом и минералогическом составе, текущих значениях влажности. Практически все эти модели являются эмпирическими и разработаны на основе анализа относительно небольших массивов экспериментальных данных, полученных для региональных почв. Так, модель де Фриза (1968) была разработана на основе данных Керстена (1949) для некоторых песков, суглинков и почвенных минералов Норвегии и Канады, модель Чанга и Хортон (1987) – для суглинистых почв Калифорнии и песчаных почв Нью-Джерси, модель Лю с соавт. (2007) – для суглинистых и песчаных почв Китая и Айовы.

За неимением универсальных моделей эти частные зависимости для региональных почв используются как универсальные; в первую очередь это относится к модели де Фриза, позволяющей рассчитывать теплоемкость почвы как сумму теплоемкостей ее составляющих. Так, например, в недавно опубликованной монографии, посвященной современным проблемам моделирования гидрологических процессов в почвах, в соответствующей главе (McBratney, Minasny, 2004) предлагается для расчета теплоемкости почв использовать модель де Фриза, а для расчета теплопроводности - модель Кемпбелла (1985). При этом область применимости указанных моделей не оговаривается, и не приводится даже примерный диапазон ошибок, которые могут получаться при проведении расчетов. В температурном блоке широко известного свободно распространяемого программного продукта «HYDRUS-1D», позволяющего рассчитывать динамику переноса влаги в почвах и грунтах, используются эти же модели, но добавлена возможность для расчета теплопроводности использовать модель Чанга и Хортон.

Целью данной работы было рассмотреть возможность применения моделей де Фриза, Кемпбелла, Чанга и Хортон, Лю с соавт. для расчета теплопроводности российских почв и сопоставить точность вычислений с использованием этих моделей с точностью расчетов по модели, предложенной одним из авторов (Архангельская, 2009).

Объекты и методы

Проверка моделей проводилась на данных, полученных для пахотных почв Владимирского ополья (Архангельская, 2004). Используя данные об основных свойствах почв, рассчитывали теплоемкость (модель де Фриза), теплопроводность (модели Чанга-Хортон, Кемпбелла, Лю с соавт.) и теплопроводность почвы (сочетание моделей де Фриза и Чанга-Хортон, Кемпбелла, Лю) при различных значениях влажности, используя схемы, предложенные в соответствующих моделях. Расчетные величины теплопроводности сравнивали с величинами, полученными в лаборатории с

использованием метода регулярного режима. Всего было использовано 354 экспериментальные значения температуропроводности. В качестве критерия точности расчетов использованы среднеквадратичные относительные ошибки.

Результаты и обсуждение

Точность расчетов с помощью зарубежных моделей была неудовлетворительной. Наименее точным оказался алгоритм, основанный на сочетании моделей Чанга-Хортон и де Фриза: среднеквадратичная величина расхождений между расчетными и экспериментальными значениями температуропроводности при расчетах по этим моделям составляла 113.4%. Основной вклад в величину этой ошибки вносили расхождения между модельными и экспериментальными значениями температуропроводности в области низких влажностей; с ростом влажности ошибка расчетов уменьшалась. Для образцов с объемной влажностью более 30% среднеквадратичная относительная ошибка расчетной оценки температуропроводности составляла 32.5%; при выделении особенно сильно увлажненных образцов (объемная влажность более 35%) - 29.2%. При расчете температуропроводности слабо увлажненных почв среднеквадратичная ошибка была в несколько раз больше: 154.6% для образцов с объемной влажностью менее 14%.

Таким образом, использование моделей Чанга-Хортон и де Фриза для расчета температуропроводности агросерых почв привело к относительно невысоким ошибкам около 30% лишь для условий сильного увлажнения, соответствующих задачам, связанным с обильным поливом и интенсивной фильтрацией. Для иссушенных почв точность расчетной оценки температуропроводности намного ниже, и это необходимо учитывать при применении пакета HYDRUS-1D. При использовании вместо модели Чанга-Хортон моделей Кемпбелла и Лю с соавт. ошибки расчетов температуропроводности также были весьма значительными: 66% - для модели Кемпбелла и 90.8% - для модели Лю с соавторами.

Модель Архангельской, настроенная по почвам ополья, в применении к независимым данным по температуропроводности суглинистых агросерых и дерново-подзолистых почв давала среднеквадратичные ошибки от 9% для почв ополья (использовались не вошедшие в базу регрессии данные) до 32% для агросерых почв южного Подмосковья (использовались данные, полученные для образцов почв с опытного поля ИФХ и БПИ РАН).

Приведенные результаты еще раз подтверждают, что применение полученных для региональных почв эмпирических зависимостей за пределами регрессионной базы может приводить к возникновению весьма существенных погрешностей. Представляется, что анализ величины этих погрешностей должен быть необходимым этапом при работе с соответствующими моделями.

Литература

- Архангельская Т.А. Температуропроводность серых лесных почв Владимирского ополья // Почвоведение.- 2004.- № 3.- С. 332-342.
- Архангельская Т.А. Параметризация и математическое моделирование зависимости температуропроводности почвы от влажности // Почвоведение.- 2009.- № 2.- С. 178-188.
- Де Фриз Д.А. Тепловые свойства почв // Физика среды обитания растений.- Л.: Гидрометеоздат, 1968.- С. 191-214.
- Campbell, G.S. Soil physics with BASIC: Transport models for soil-plant systems. Elsevier, 1985.
- Chung, S.-O., and R. Horton (1987), Soil Heat and Water Flow With a Partial Surface Mulch // Water Resour. Res., 23(12), 2175–2186.
- Kersten M.S. Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils // ACFEL Tech. Rep. 23. Univ. of Minnesota. Minneapolis, 1949.
- S.Lu, T.Ren, Y.Gong, R. Horton. (2007) An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature // Soil Sci. Soc. Am. J. 71:8-14
- McBratney A.B., Minasny B. Soil inference systems // Pachepsky Ya., Rawls W.J. (Eds) Development of pedotransfer functions in soil hydrology. Elsevier, 2004. 323-348.

ПОПУЛЯЦИОННАЯ И СОЦИАЛЬНАЯ ДИНАМИКА: ПРОБЛЕМА ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ

Медвинский А.Б.^{1,2}, Русаков А.В.¹, Гоник М.М.¹, Нуриева Н.И.^{1,2}

¹*Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино, Россия*
medvinsky@iteb.ru

²*Пушчинский государственный университет, Пущино, Россия*

Аннотация: в докладе обсуждаются факторы, которые существенно усложняют предсказание динамики экологических и социальных систем. К таким факторам относятся: (1) недостаточная длина и зашумлённость временных рядов, полученных в ходе наблюдений и/или экспериментов, (2) внутренняя неустойчивость динамики исследуемых систем, (3) неопределённости, связанные с определением параметров, характеризующих исследуемые системы, (4) возможность конкуренции между различными динамическими режимами функционирования исследуемых систем. Математическое моделирование позволяет приблизиться к пониманию роли каждого из указанных выше факторов. В докладе даются примеры использования математического моделирования для оценки предсказуемости популяционной и социальной динамики.

1. Введение

Истинные механизмы, лежащие в основе сложных, нерегулярных изменений динамических переменных, характеризующих ту или иную эко- или социосистему, с трудом подвергаются идентификации. Причиной этих затруднений является то, что временные ряды, полученные в ходе наблюдений, анализа статистических данных и пр., обычно слишком коротки и слишком зашумлены. Кроме того, научные эксперименты с использованием природных экосистем обычно обходятся очень дорого. В ещё большей мере это относится к социальным системам. Поэтому математическое моделирование рассматривается как инструментарий, способный помочь в выявлении механизмов, определяющих сложный характер динамики как природных, так и социальных систем. Приблизиться к достижению этой цели помогают простые (концептуальные) математические модели, которые учитывают сравнительно небольшое число основных динамических переменных (May, 1976; Medvinsky et al., 2002; Базыкин, 2003; Турчин, 2007). В данной работе мы используем концептуальный подход для того, чтобы продемонстрировать как эффективность математического моделирования, так и те ограничения, которые естественным образом вытекают из сложности исследуемых феноменов.

2. Динамика водных популяций на примере популяций коловраток

Коловратки являются составной частью зоопланктона, заселяющего реки и озёра (Nogrady et al., 1993). Динамика планктонных популяций до сих пор остаётся недостаточно изученной (Medvinsky et al., 2002). Основной проблемой является нерегулярность изменений биомассы планктона. Причиной этой нерегулярности, по-видимому, является как нелинейность, присущая трофическим взаимодействиям в водных сообществах, так и влияние внешних факторов. К внешним факторам, среди прочих, относится и неоднородность среды обитания планктона. Такая неоднородность может приводить к нерегулярным, плохо прогнозируемым переходам от регулярной к хаотической динамике и наоборот (Medvinsky et al., 2001; 2002).

В рамках концептуального подхода была предложена модель популяционной динамики коловраток. Эта модель получила название Consensus (Snell, Serra, 1998). Показано (Snell, Serra, 1998), что модель Consensus достаточно реалистична с биологической точки зрения и в то же время проста, что позволяет снять обычные трудности, связанные с параметризацией математических моделей.

В данной сообщении, используя модифицированную версию модели Consensus (Medvinsky et al., 2005) и результаты анализа этой модели, представленные в работе

(Berezovskaya et al., 2005), мы показываем, что численность популяции коловраток, собственная динамика которых характеризуется бистабильностью, может приобретать колебательный характер. Эта трансформация обусловливается обменом биомассой между отдельными популяциями, обитающими в разных биотопах.

3. Пример концептуальной математической модели социальной динамики

Некоторые характеристики социальных процессов могут быть исследованы в терминах концептуальной математической модели типа «жертва – хищник, продуцирующий жертву» (Efferson, 2008). Следуя такому подходу, мы развиваем концептуальную математическую модель системы «потребитель/производитель – сельскохозяйственный продукт», которая включает два региона с различной продуктивностью сельскохозяйственного производства. Анализ этой модели показывает, что взаимодействие таких регионов может приводить к драматическим изменениям динамики исследуемой системы, в том числе – к динамической инвазии хаоса; такая динамическая инвазия означает трансформацию собственных, присущих системе регулярных колебаний динамических переменных в хаотические колебания (Medvinsky et al., 2005; Gonik, Medvinsky, 2007).

Работа поддержана грантом РФФИ.

Литература

- Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. Москва, Ижевск: Институт компьютерных исследований.- 2003.
- Турчин П.В. Историческая динамика.- Москва: URSS, 2007.
- Berezovskaya F., Karev G., Snell T.W. Modeling the dynamics of natural rotifer populations: Phase-parametric analysis. *Ecological Complexity* 2, 395-410, 2005.
- Efferson C. Prey-producing predators: The ecology of human intensification. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences* 12, 55-74, 2008.
- Gonik M.M., Medvinsky A.B. Confinement of dynamical chaos expansion in rotifer populations inhabiting heterogeneous environment: An effect of attractor size invariance. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences* 11, 185-196, 2007.
- May R.M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature* 261, 459-467, 1976.
- Medvinsky A.B., Gonik M.M., Berezovskaya F.S., Li B.-L., Malchow H. Rotifer population dynamics in two coupled habitats: invasion of chaos. *Biological Invasions* 7, 877-883, 2005.
- Medvinsky A.B., Petrovskii S.V., Tikhonova I.A., Malchow H., Li B.-L. Spatiotemporal complexity of plankton and fish dynamics. *SIAM Review* 44, 311-370, 2002.
- Medvinsky A.B., Tikhonova I.A., Aliev R.R., Li B.-L., Lin Z.-S., Malchow H. Patchy environment as a factor of complex plankton dynamics. *Physical Review E* 64, 021915 (7 pages), 2001.
- Nogrady T., Wallace R.L., Snell, T.W. Rotifera. V. 1. Biology, Ecology and Systematics. The Hague: SPB. 1993.
- Snell T.W., Serra M. Dynamics of natural rotifer populations. *Hydrobiologia* 368, 29-35, 1998.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЫЛЬЦЫ ТРАНСГЕННЫХ РАСТЕНИЙ

Медвинский А.Б.¹, Русаков А.В.¹, Гоник М.М.¹, Соколов М.С.², Марченко А.И.²

¹*Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, г. Пущино, Россия*
Medvinsky@iteb.ru

²*Федеральное государственное учреждение науки «Научно-исследовательский центр токсикологии и гигиенической регламентации биопрепаратов» Федерального медико-биологического агентства Российской Федерации, Серпухов, Россия*
toxic@online.stack.net

Аннотация: распределение пыльцы трансгенной кукурузы в пространстве оценивали с помощью математической модели, основанной на полуэмпирической теории конвективной диффузии. Результаты анализа модели показали, что большая часть (от 96% до 99 %) пыльцы кукурузы оседает в пределах 5 м от края поля. Расчетный профиль пространственного распределения пыльцы хорошо соответствует данным наблюдений.

Интерес к исследованию распространения пыльцы растений обусловлен в основном проблемами, которые могут возникнуть вследствие гибридизации растений при переносе пыльцы (Futuyma, 1998; Ellstrand, 2003). К числу наиболее существенных экологических последствий распространения пыльцы трансгенных растений относят: (а) последствия гибридизации сельскохозяйственных культур и их диких предшественников; (б) влияние интрогрессии трансгенов на эволюцию сорняков; (в) влияние интрогрессии трансгенов на генетическое разнообразие в природе (Соколов и др., 2002; Вельков и др., 2003а; 2003б; Киль, 2003; Marvier, 2001; Dale et al., 2002).

Миграция генов, обуславливаемая распространением пыльцы, может зависеть от очень многих факторов (Ellstrand, 1992). Одним из таких факторов, который существенно определяет процесс миграции генов, является расстояние, на которое переносится пыльца. Полевые измерения показывают, что распределение пыльцы в пространстве характеризуется существенной концентрацией пыльцы вблизи её источника и постепенным спадом количества пыльцы с расстоянием; при этом спад количества пыльцы с расстоянием обычно происходит медленнее, чем это характерно для нормального статистического распределения (Levin, 1981).

Полевые измерения, результаты которых позволяют оценивать количество пыльцы в ограниченном числе мест замеров, могут рассматриваться как первичный субстрат для построения математических моделей распространения пыльцы в пространстве и во времени.

В работе использовали математическую модель, которая опирается на полуэмпирическую теорию конвективной диффузии (Seinfeld, Pandis, 1998). В соответствии с этой моделью (Дунский и др., 1982) распределение пыльцы в пространстве описывается зависимостью:

$$P(x) \sim \int_0^{x_1} |x' - x|^{-\beta} \exp\left(-\frac{\gamma}{|x' - x|}\right) dx'.$$

Реалистичность математических моделей существенно зависит не только от исходных предположений, но и от их параметризации (Di-Giovanni, Beckett, 1990; Jenczewski et al., 2003; Klein et al., 2003; Kuparinen et al., 2007). В приведенной выше зависимости численные значения параметров β и γ определяются высотой растений, скоростью ветра на этой высоте, профилем скорости ветра, скоростью гравитационного оседания пыльцы. Оценка этих параметров, очевидно, требует учёта метеорологических условий, которые могут широко меняться от региона к региону в в различные периоды времени.

В связи с указанным обстоятельством мы оценивали не столько точные значения параметров, сколько области их изменения. При этом принимали во внимание данные

наблюдений о том, как в большинстве случаев пыльца распределяется в пространстве на разных расстояниях от источника. Известно, в частности, что большая часть (от 96% до 99%) пыльцы кукурузы оседает в пределах 5 м от края поля (Sears, Stanley-Horn, 2000).

Результаты проведенных нами расчётов продемонстрировали, что численные значения параметров β и γ лежат в пределах 2.4 – 3.2 и 0.01 – 0.9 соответственно. В пределах этих значений расчётный профиль пространственного распределения пыльцы хорошо соответствует данным наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научно-технического центра (МНТЦ), проект № 2877.

Литература

- Вельков В.В., Соколов М.С., Медвинский А.Б. Оценка агроэкологических рисков производства трансгенных энтомоцидных растений // *Агрохимия*.- 2003а.- №2.- С.74-96.
- Вельков В.В., Соколов М.С., Медвинский А.Б. Проблемы государственного регулирования производства трансгенных растений // *Вестник защиты растений*.- 2003б.- №3.- С.3-16.
- Дунский В.Ф., Никитин Н.В., Соколов М.С. Пестицидные аэрозоли.- М: Наука, 1982.- 288с.
- Киль В.И. Оценка риска вертикального переноса генов Вt-картофеля и других трансгенных культур. *Агрохимия*.-2003.- №4.-С. 81-89.
- Соколов М.С., Вельков В.В., Медвинский А.Б. Государственное регулирование трансгенных растений и оценка экологических рисков их производства. В сб. «Обеспечение экологической безопасности при использовании генетически модифицированных организмов».- М.,- 2002.- С.17-27.
- Dale P.J., Clarke B., Fontes E.M.G. (2002) Potential for the environmental impact of transgenic crops // *Nature Biotechnology*.- 2002.- Vol. 20, N 6.- P.567-574.
- Di-Giovanni F., Beckett P.M. (1990) On the mathematical modelling of pollen dispersal and deposition // *Journal of Applied meteorology*.- 1990.- Vol. 29, N11.- P.1352-1357.
- Ellstrand N.C. Gene flow among seed plant populations // *New Forests*.- 1992. Vol. 6, N 2.- P.241-256.
- Ellstrand, N. C. Dangerous Liaisons? When Cultivated Plants Mate with Their Wild Relatives. Johns Hopkins University Press: Baltimore, MD, 2003.- 244 p.
- Futuyma D J. Evolutionary Biology. Sunderland, MA: Sinauer; 1998.*
- Jenczewski E., Ronfort J., Chèvre A.-M. (2003) Crop-to-wild gene flow, introgression and possible fitness effects of transgenes // *Environmental Biosafety Research*. 2003.-Vol. 2, N 1.- P. 9-24.
- Klein E.K., Lavigne C., Foueillassar X., Gouyon P.-H., Laredo C. Corn pollen dispersal: quasi-mechanistic model and field experiments // *Ecological Monographs*.- 2003.- Vol. 73, N 1.- P.131-150.
- Kuparinen A., Markkanen T., Riikonen H., Vesala T. Modeling aie-mediated dispersal of spores, pollen and seeds in forested areas. *Ecological Modelling*.- 2007.- Vol. 208, N 1.- P. 177-188.
- Marvier M.A. Ecology of transgenic crops // *American Scientist*.- 2001.- Vol. 89, N 1.- P.160-167.
- Sears, M.K., R.L. Hellmich, D.E. Stanley-Horn, K.S. Oberhauser, J.M. Pleasants, H.R. Mattila, B.D. Siegfried, and G.P. Dively. 2001. Impact of Bt corn pollen on monarch butterfly populations: a risk assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.- 2001.- Vol. 98? N 21.- P. 11937-11942.
- Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. New York: Wiley.- 1998.- 560p.

ДИНАМИКА ВЕЛИЧИНЫ ВЫВОДКОВ И РАЗМЕРОВ ГНЕЗД КРЕЧЕТА НА ЯМАЛЕ В 1973-2008 ГГ.: ЛОГ-ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ

Мечникова С.А.¹, Калякин В.Н.², Романов М.С.³, Кудрявцев Н. В.⁴

¹Московский городской педагогический университет, Москва, Россия
mechnikova@yandex.ru

²Москва, 117282, ул. Широкая, д. 9, к. 1, кв. 260
kalyakiny@rambler.ru

³Институт математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия
michael_romanov@inbox.ru

⁴Московский городской педагогический университет, Москва, Россия
Nikolay63@yandex.ru

Аннотация: с помощью лог-линейного анализа таблицы сопряженности показано, что наблюдаемое уменьшение размеров выводков кречета на Ямале за 25-летний период связано с переходом от использования крупных гнезд на деревьях к преимущественному использованию гнезд небольшого размера, в которых выживаемость птенцов существенно ниже.

1. Методы и материалы

Исследования проводились на юге полуострова Ямал, в бассейнах рек Щучья и Хадыта-яха. Было осмотрено 63 активных гнезда и получена дополнительная информация еще о 40 гнездах, предоставленная 13 авторами. Взаимодействие между временным фактором, размерами гнезд и числом птенцов в выводках кречета исследовалось с помощью лог-линейного анализа таблицы сопряженности. В качестве меры согласия модели с реальными данными применяли статистику G^2 Вилкса (Sokal, Rohlf, 1995).

2. Результаты

Анализ динамики размеров выводка кречета за 25-летний период выявил его снижение, которое происходило «на фоне» перехода к использованию кречетами более мелких гнезд на деревьях. Величина выводка в мелких гнездах на деревьях ($\bar{x} = 1,6$; $n = 12$) меньше, чем в средних и крупных ($\bar{x} = 2,5$; $n = 20$ и $\bar{x} = 3,0$; $n = 34$, соответственно), что связано с высокой смертностью птенцов из-за выпадения их из разрушенных и небольших гнездовых построек на деревьях (Мечникова и др., 1999; Obst, 1994).

Таблица 3 – Таблица сопряженности размеров выводка кречета с размером гнезда и периодом времени.

Период, T	Размер гнезда, N	Число птенцов в выводке, C	
		Мало (0-2)	Много (3-5)
I (1973-1989)	Небольшие	3	1
	Крупные	5	17
II (1990-2007)	Небольшие	18	10
	Крупные	4	8

Можно предположить, что уменьшение средней величины выводков у кречета вызвано именно переходом к размножению в мелких и средних гнездах на деревьях. Для того чтобы взаимосвязи между факторами, был выполнен анализ таблицы сопряженности, в которой гнезда сгруппированы по трем дихотомическим признакам: период времени T , размер гнезда N , размер выводка C (таблица 1) (из выборки исключены гнезда на скалах).

Моделирование (рисунок) показало, что взаимодействия TN и NC являются высоко значимыми ($G^2 = 20,241$; $df = 1$; $p = 0,000$ и $G^2 = 10,467$; $df = 1$; $p = 0,001$, соответственно), в

то время как взаимодействие $TС$ оказалось незначимым ($G^2 = 0,087$; $df = 1$; ns). Наилучшей является модель $TN + NC$, которая хорошо описывает наблюдаемые частоты ($G^2 = 0,627$; $df = 2$; $p = 0,731$) и предполагает условную независимость факторов T и C .

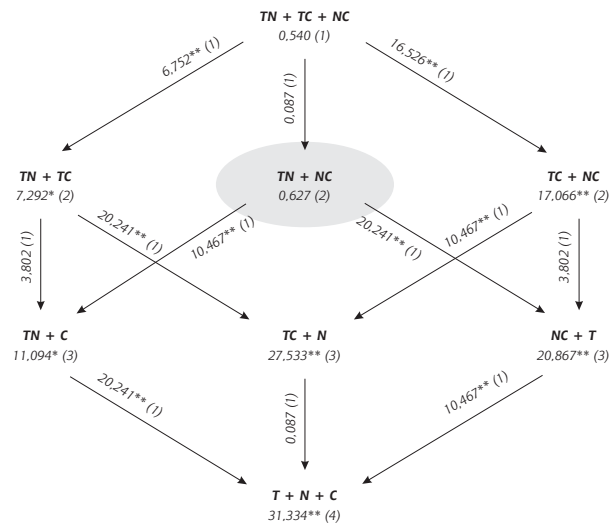


Рисунок. Отображение иерархии лог-линейных моделей в виде графа. В узлах графа — модели, соответствующие различным сочетаниям факторов. Цифры в узлах — значения статистики G^2 , числа вдоль стрелок — разности G^2 между двумя соседними моделями, соответствующие параметру, исключенному из модели. Цифры в скобках — число степеней свободы. Звездочками отмечены значимые G^2 ($p < 0,05$; $p < 0,01$). Наилучшая модель отмечена серой заливкой.

Таким образом, снижение успеха размножения кречета, вероятно, произошло именно вследствие перехода к использованию небольших по размеру (и, соответственно, менее прочных) гнезд.

Возможной причиной может быть уплотнение снега (образование наста) на гнездах, происходящее в результате чередования оттепелей и морозов. Вероятно, с 1990-х гг. в связи с потеплением климата в Субарктике такое чередование стало происходить чаще, что и привело к уплотнению снега и, соответственно, к уменьшению доступности крупных гнездовых построек для кречета.

3. Благодарности

Мы благодарим всех исследователей, предоставивших свои данные по гнездам кречета, а также В.Э. Смирнова за консультации и плодотворное обсуждение статистической части данной работы.

Литература

Мечникова С. А., Романов М. С., Лузан П. И. Дополнительные данные о соколообразных Южного Ямала за 1996-1997 гг. Материалы III Конференции по хищным птицам Восточной Европы и Северной Азии.- Ставрополь.- 1999.- 108-111.
 Obst J. Tree-nesting by the Gyrfalcon (*Falco rusticolus*) in the western Canadian Arctic. *Journal of Raptor Research*.- 1994.- 28.- 4-8.
 Sokal R. R., Rolf F. J. *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*. 3-rd ed. N. Y.: W.H. Freeman and Co.- 1995.- 887 p.

КОМПОНЕНТНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Михайлов А.В.,¹ Безрукова М.Г.¹, Шанин В.Н.¹, Михайлова Н.В.²

¹Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, г. Пущино, Россия

alexey.mikh@gmail.com

²Учреждение Российской академии наук Институт математических проблем биологии РАН, г. Пущино, Россия

natalia.mikh@gmail.com

Аннотация: разработано и реализовано в виде системы компонентов программное обеспечение для имитационного моделирования экологических процессов с дискретным шагом по пространству и времени. Разработанное обеспечение составляет основу системы моделей EFIMOD/LES, предназначенной для моделирования сукцессий в лесных экосистемах.

1. Введение

Современный этап развития моделирования как метода исследования лесных экосистем требует построения сложных имитационных моделей, основанных на знаниях из разных научных дисциплин: экология, физиология, почвоведение, климатология и др. При этом возникает необходимость в проектировании такого рода моделей, как системы независимых компонентов, способных к объединению в единое целое. Поэтому общемировой тенденцией становится создание новых моделей путем объединения известных моделей (Liu et al., 2002; Peng et al., 2002) или создание специальных платформ, позволяющих разным группам исследователей встраивать свои подмодели в общую систему (Knox et al., 1996; Coligny et al., 2002, 2006; May, Conery, 2003; Wenderholm, 2005). Перед авторами стояла цель создания удобного нового программного обеспечения для модели EFIMOD (Kotarov et al., 2003), которое поддавалось бы легкой модификации и позволяло добавлять новые подмодели без существенного изменения логики основной модели.

2. Принципы построения модульной системы

Модульная система EFIMOD/LES - это программный продукт, ориентированный на исследовательское моделирование сложных экологических процессов с дискретным шагом по пространству и времени. Основная идея системы состоит в представлении сложного экологического процесса как совокупности подпроцессов. При этом в зависимости от цели исследования, гипотезы и используемых экспериментальных данных подмодели, имитирующие подпроцессы, могут сильно отличаться. Может возникнуть необходимость сравнить несколько гипотез и заменить одну подмодель другой. Поэтому все *подмодели* - это отдельные компоненты, на физическом уровне реализованные в виде динамически подключаемых библиотек (DLL). Каждая подмодель декларирует список необходимых ей входных и выходных данных (порты) с указанием используемых единиц измерения. Синхронизацией, организацией обмена данными и обеспечением корректной работы системы занимается *ядро*. Ядро объединяет подмодели в единую систему, используя *схему* модельной системы. Схема - это текстовый файл в формате XML, содержащий в себе описание совокупности компонентов (подмоделей) и связей между ними. Для создания и редактирования схем используется специальный *редактор схем*.

Запуск модельной системы, управление процессом моделирования, сохранение результатов исследователем осуществляется через *оболочку* системы (см. рисунок). Для разных целей использования системы возможно подключение разных оболочек: оболочки в виде консольного приложения или оболочки с графическим пользовательским интерфейсом.

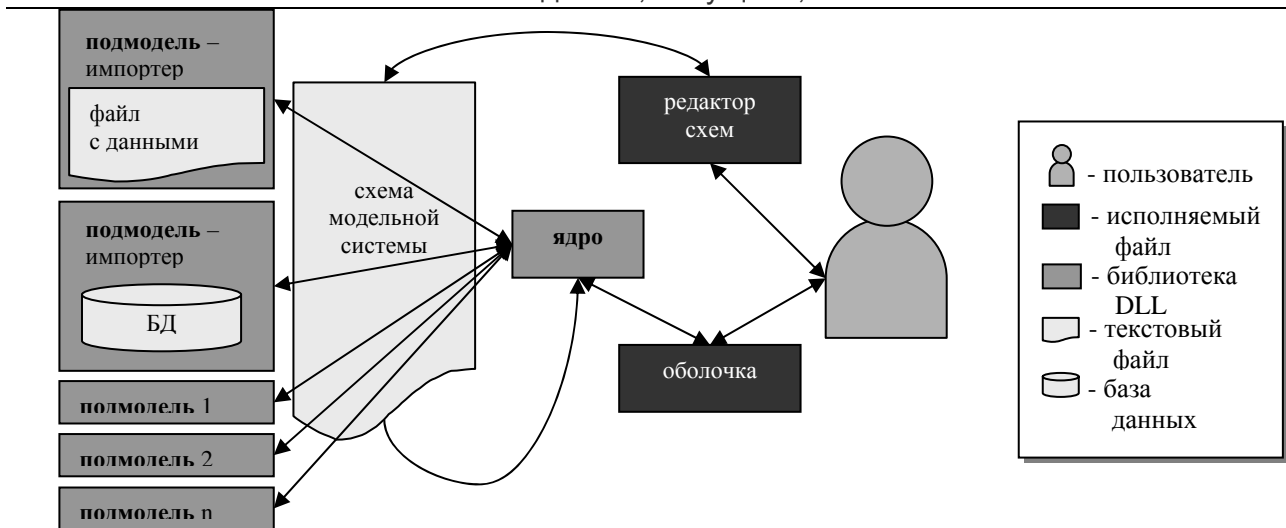


Рисунок. Схема модульной системы EFIMOD/LES

3. Заключение

Модульная структура системы EFIMOD/LES имеет ряд преимуществ:

1. Модульная структура системы позволяет одновременно разрабатывать и видоизменять разные компоненты системы независимо друг от друга разными разработчиками

2. В системе нет встроенного языка, что позволяет использовать всю мощь современных языков программирования (Delphi, C++ и др.) для написания подмоделей в виде DLL.

3. Благодаря тому, что на ядро возложены вся пространственная и временная синхронизация, синхронизация по единицам измерения и организация обмена данными, значительно упрощается разработка отдельной подмодели. Программисту нет необходимости самому синхронизировать подмодели, ему лишь надо определить временной и пространственный масштаб.

4. Модульная организация позволяет легко заменять отдельные компоненты, которые могут представлять собой как DLL библиотеки, так и файлы с данными или базы данных. Таким образом, подмодели становятся независимы от источника данных.

Более подробно информация о системе EFIMOD/LES представлена на сайте:
<http://lem.edu.mhost.ru/wikipad>

Литература

- Changhui Peng, Jinxun Liu, Qinglai Dang, Michael J. Apps, Hong Jiang. TRIPLEX: a generic hybrid model for predicting forest growth and carbon and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling* 2002. 153. P. 109–130.
- Franzois de Coligny, Philippe Ancelin, Guillaume Cornu, Benoot Courbaud, Philippe Dreyfus, Franzois Goreaud, Sylvie Gourlet-Fleury, Сйline Meredieu, Laurent Saint-Andrй. CAPSIS: Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture : Advantages of a shared forest-modelling platform. Reality, models and parameter estimation - the forestry scenario2-5 June 2002, Sesimbra, Portugal.
- Heather K. May, John S. Conery. FOREST: A System for Developing and Evaluating Ecosystem Simulation Models. SCSC '03 P. 119 -127
- Jinxun Liu, Changhui Peng, Qinglai Dang, Mike Apps, Hong Jiang. A component object model strategy for reusing ecosystem models. *Computers and Electronics in Agriculture* 2002. 35. P. 17–33.
- Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L., Nadporozhskaya M.A., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S., Zudina E.V., Zoubkova E.V. EFIMOD 2 – A model of growth and elements cycling of boreal forest ecosystems // *Ecological Modelling*. 2003. 170. P. 373-392.
- Robert G. Knox, Virginia L. Kalb, Elissa R. Levine, David J. Kendig. A Problem-Solving Workbench for Interactive Simulation of Ecosystems. *IEEE Computational Science & Engineering* Volume 4 , Issue 3, 1997 P. 52 – 60
- Wenderholm E. Eclpss: a Java-based framework for parallel ecosystem simulation and modeling // *Environmental Modelling & Software*. 2005. 20. P. 1081-1100.

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИИ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ НА ГРАДИЕНТЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ФАКТОРА

Михайлова Н.В.

Институт математических проблем биологии РАН, г. Пущино, Россия
Natalia.mikh@gmail.com

Аннотация: в работе предложена решетчатая модель, относящаяся к классу пространственных индивидуально-ориентированных моделей, в частности, к клеточно-автоматному типу моделирования. Модель позволяет исследовать динамику популяций травянистых растений с учетом параметров семенного и вегетативного размножения, пространственной структуры расселения, а также исследовать влияние неоднородности местообитания на пространственную динамику популяции. Различные окружающие условия оказывают прямое воздействие на развитие отдельной особи и популяции в целом. В природе достаточно часто можно наблюдать изменение условий окружающей среды вдоль пространственного градиента. Анализ динамики развития популяции в таких условиях дает возможность оценки условий возникновения устойчивого состояния.

1. Описание модели

В решетчатых моделях популяция растений расположена на плоской двумерной решетке, поведение элемента популяции (ЭП) и взаимодействие между ними описывается с помощью некоторого набора формальных правил (аксиом), что позволяет исследовать развитие популяции при различных условиях (Комаров 1982, 1988, Edelstein, 1982, Czaran, 1984, Inghe, 1989).

Предлагаемая модель основана на следующих правилах:

1) популяция задана на плоской квадратной решетке, в каждом узле решетки в определенный момент времени может находиться не более одного ЭП; расстояние между узлами решетки видоспецифично;

2) временной шаг модели принят равным одному году;

3) ЭП может принимать следующие основные состояния: а) проросток – появление ЭП на модельной решетке, б) вегетативное разрастание (алгоритм вегетативного разрастания видоспецифичен), в) цветение, г) отмирание.

4) возобновление в популяции происходит следующим образом: на следующий шаг после цветения ЭП на модельной решетке появляются проростки модельного вида, их количество и расположение видоспецифично.

2. Объект исследования

Модель была построена для имитации расселения популяций растений неявнополицентрической и явнополицентрической биоморфы. В качестве представителей неявнополицентрической биоморфы был взят копытень европейский (*Asarum europaeum* L.), короткокорневищный вид, явнополицентрической - сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), длиннокорневищный вид и звездчатка ланцетолистная (*Stellaria holostea* L.), наземностолонообразующий вид. Эти виды выбраны как наиболее часто встречающиеся неморальные виды, которые являются яркими представителями различных популяционных стратегий (конкурентный вид – сныть обыкновенная, реактивный вид – звездчатка ланцетолистная и толерантный вид – копытень европейский).

Развитие ЭП моделируется на основании видоспецифичных параметров, определяющих вероятность выживания в зависимости от возраста, вероятность вегетативного разрастания и количество дочерних отбегов, в зависимости от наличия свободных соседних узлов решетки, вероятность цветения и количество проросших семян. Параметры оценивались по экспериментальным данным (Смирнова, 1987, Богданова, 2003).

Модельные эксперименты проводились на неоднородной территории с учетом их экологической валентности (Жукова, 2004). Неоднородность территории рассматривалась как неоднородность по экологическим факторам и задавалась следующим образом: узлы модельной решетки, расположенные у левой границы, относятся к минимальному значению некоторого экологического фактора, у правой границы – к максимальному значению. На остальных узлах территории изменение значений шкалы экологического фактора происходит линейно от минимального к максимальному. Далее по литературным данным определялся диапазон ступеней существования вида по этому экологическому фактору. При этом максимальная вероятность заселения на территории соответствовала середине диапазона ступеней, далее вероятности заселения рассчитывались по гауссовскому распределению.

3. Результаты моделирования

Модельные эксперименты показали, что стратегия поведения ЦП вида в сообществе определяется не только онтогенетическими и морфологическими особенностями вида, а также экологической валентностью вида по отношению к экологическим факторам.

При анализе результатов моделирования показано, что для сныти обыкновенной ключевыми являются параметры длительности жизни и возраста начала вегетативного разрастания.

Популяция звездчати ланцетолистной является более устойчивой к неблагоприятным условиям, чем популяция сныти обыкновенной, за счет различий в геометрии расселения. Один побег звездчатки ланцетолистной за год может захватить с помощью дочерних отбегов до 40 узлов решетки, а сныть обыкновенная – только 3.

Для копытня европейского проведенный анализ показал, что наиболее значимыми для вида являются параметры семенного расселения.

Литература

- Богданова Н.Е. Скорость освоения территории неморальными видами трав в мелколиственном лесу //Материалы двух международных форумов: доклады / Научные труды государственного заповедника Присурский. Т. 11. Чебоксары; М., 2003.- С. 179-185.
- Жукова Л.А. Оценка экологической валентности видов основных эколого-ценотических групп // Восточно-европейские леса / Под ред. Смирновой О.В.- М.: Наука, 2004.
- Комаров А. С. Простые структуры растительного покрова, устойчивые к внешним нарушениям // Взаимодействующие марковские процессы и их применение к математическому моделированию биологических систем. Пущино, 1982.- С. 136-143.
- Комаров А. С. Математические модели в популяционной биологии растений // Ценопопуляции растений (очерки популяционной биологии) / Под. ред. Т.И. Серебряковой.- М., 1988.- С. 137-155.
- Смирнова О. В. Структура травяного покрова широколиственных лесов.- М., 1987.- 206 с.
- Czaran T. A simulation model for generating patterns of sessile populations // Abstracts of Botany. 1984. N 8. P.4-13.
- Edelstein L. The propagation of fungal colonies: a model for tissue growth // J. of Theoretical Biology. 1982. N 98. P. 679-701.
- Inghe O. Genet and ramet survivorship under different mortality regimes – a cellular automata model // J. of Theoretical Biology. 1989. N 138. P.257-270.

ТРЕХМЕРНАЯ УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ СВЕТОВОЙ КОНКУРЕНЦИИ ДЕРЕВЬЕВ В ЛЕСУ

Михайлова Н.В.¹, Михайлов А.В.²

¹ Учреждение Российской академии наук Институт математических проблем биологии РАН, г. Пущино, Россия

natalia.mikh@gmail.com

² Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, г. Пущино, Россия

alexey.mikh@gmail.com

Аннотация: предложена простая имитационная трехмерная модель для определения коэффициента затененности кроны отдельного дерева в разновозрастном смешанном древостое.

1. Введение

При моделировании лесных экосистем необходимо учитывать световой режим в лесу. Конкуренцию за свет между деревьями можно имитировать различными способами: от простых коэффициентов конкуренции (Сизов, Грабарник, 2008) до сложных пространственных моделей, учитывающих 3-х мерную структуру лесного полога, траекторию движения солнца, длительность светового дня и др. параметры (Чумаченко, 1993). В рамках данной работы стояла задача создать максимально простую 3-х мерную модель конкуренции за свет, вычисляющую долю ФАР, доступную каждому дереву в условиях затенения ближайшими деревьями в древостое. Данная модель является компонентом системы EFIMOD/LES (Михайлов и др., 2009), разрабатываемой на основе предыдущей версии модели EFIMOD (Komarov et al. 2003).

2. Описание модели

В простейшем варианте модели крона дерева рассматривается как шар. Количество света, поглощаемое кроной отдельного дерева (назовем рассматриваемое в конкретный момент времени дерево фокальным), рассчитывается как сумма световых потоков пучка лучей, идущих из ряда направлений к центру кроны (рисунок).

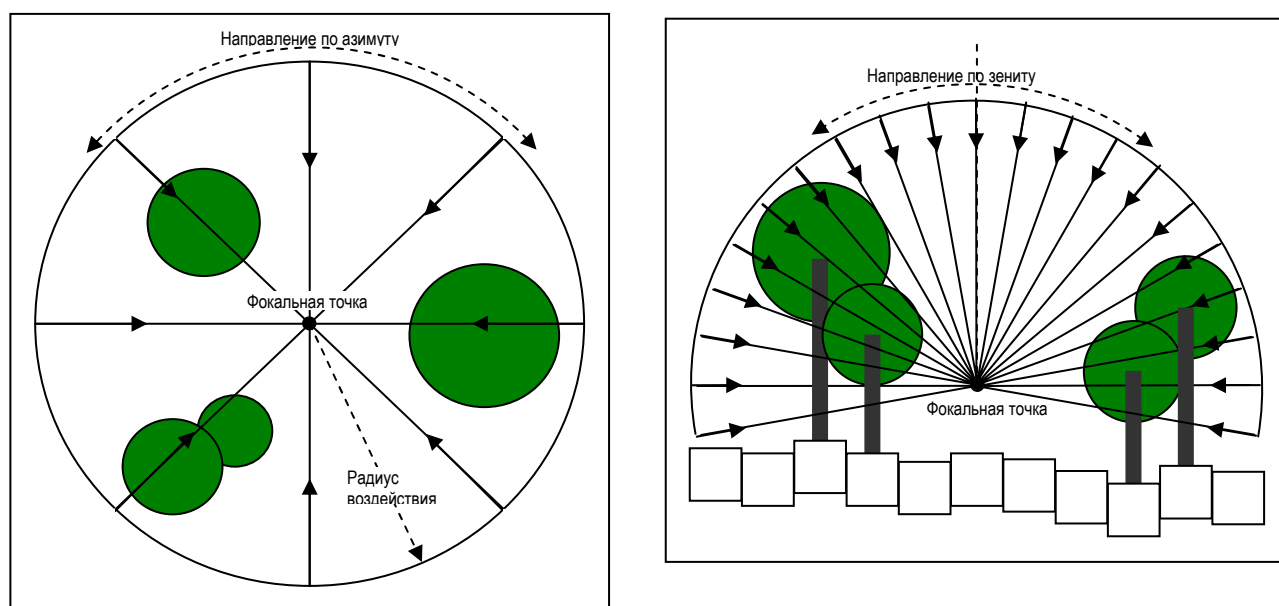


Рисунок. Схема прохождения лучей в горизонтальной и в вертикальной плоскости

Подобный подход к расчету светового режима так же используется в модели SLIM (Gregoire, 2002).

Если некоторый луч пересекает крону другого дерева, то его световой поток уменьшается соответственно коэффициенту проницаемости кроны этого дерева. Древостой может быть представлен деревьями, принадлежащими к разным биологическим видам, коэффициент проницаемости кроны у разных видов деревьев различен. При пересечении нескольких крон одним лучом уменьшение светового потока данного луча рассчитывается как произведение коэффициентов проницаемости кроны затеняющих деревьев. Тогда для фокального дерева коэффициент затенения рассчитывается по формуле:

$$K_E = \frac{\sum (R_i * \prod \lambda_j)}{\sum R_i};$$

где K_E – коэффициент затенения, R_i - интенсивность светового потока, λ_i – доля ФАР, поглощенная кроной затеняющего дерева. В данной версии модели длина перечисления лучом кроны затеняющего дерева не учитывается.

Лучи в зависимости от зенитного угла (направления по зениту) могут иметь разную интенсивность светового потока. Так, чем ближе к зениту, тем интенсивность светового потока больше. При расчете прохождения лучей учитывается не вся модельная территория, а только деревья в радиусе воздействия, являющегося параметром модели.

По умолчанию в алгоритме используется 8 азимутальных направлений и 18 зенитных углов. Таким образом, для сканирования пространства вокруг фокального дерева рассматривается 144 луча. Однако, для разных целей моделирования может понадобиться уменьшение или увеличение точности расчета. Следует понимать, что увеличение количества лучей повлечет за собой замедление работы модели, но для определенных целей это может быть необходимо.

Модель позволяет рассматривать для фокального дерева не одну точку, а совокупность точек, расположенных на поверхности кроны, при этом форма кроны может быть любой. Так деревья, принадлежащие к разным видам, могут быть аппроксимированы разными геометрическими фигурами.

Коэффициент затенения, являющийся результатом предложенной модели, может быть использован в других лесных индивидуально-ориентированных моделях для редукации потенциального прироста дерева в зависимости от затенения соседними деревьями и для расчета условий отмирания дерева.

Благодаря описанию алгоритма через понятие освещенности фокальной точки, модель позволяет так же рассчитывать затенение для напочвенного покрова с любой заданной топографией исследуемой местности.

Литература

- Михайлов А.В., Безрукова М.Г., Шанин В.Н., Михайлова Н.В. Компонентный подход к моделированию лесных экосистем // Материалы конференции «Математическое моделирование в экологии» (ЭКОМАТМОД-2009). Пущино: 2009. настоящий сборник
- Сизов И.Е., Грабарник П. Сравнение индексов конкуренции с помощью имитационной модели светового режима древостоя // Принципы и способы сохранения биоразнообразия: материалы III Всероссийской научной конференции. /Отв. редактор Л.А. Жукова. Я (2008) -Йошкар-Ола, Пущино: Марийский гос.ун-т.- С.488-489
- Чумаченко С.И. Базовая модель динамики многовидового разновозрастного лесного ценоза // Вопросы экологии и моделирования лесных экосистем. Науч. труды. Вып.248.- М.: МГУЛ, 1993.- С.147-180
- Gregoire V., Degi H. SLIM software: a simple light interception model for multi species, multi-strata forests // Bois et forets des tropiques.- 2002.- 272 (2).- P. 97-100
- Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L., Nadporozhskaya M.A., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S., Zudina E.V., Zoubkova E.V. EFIMOD 2 – A model of growth and elements cycling of boreal forest ecosystems // Ecological Modelling.- 2003.- 170.- P. 373-392.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСЭРГИИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Мокрый А.В., Зилов Е.А.

НИИ биологии при ИГУ, Иркутск, РФ
mokry@listru

Аннотация: проведен расчет структурной эксэргии для фонового района пелагиали Южного Байкала (постоянная станция № 1), для района воздействия сточных вод Байкальского целлюлозно-бумажного комбината и рассмотрено пространственное распределение структурной эксэргии по акватории оз. Байкал. Полученные результаты свидетельствуют, что структурная эксэргия может использоваться для оценки изменений и отражать степень адаптированности экосистемы при различных воздействиях.

Материалы и методы

Эксэргия – максимальная работа, которую совершает термодинамическая система при переходе из данного состояния в состояние физического равновесия с окружающей ее средой (Реймерс, 1990). Таким образом, эксэргия – мера отклонения экосистемы от равновесного состояния.

Для выявления динамики состояния экосистем служит структурная эксэргия. Структурная эксэргия – это эксэргия, отнесенная к общей биомассе. Она отражает способность экосистемы усваивать поток энергии извне, служа одновременно индикатором степени развития экосистемы, её сложности и уровня эволюционного развития организмов, из которых та состоит.

Непосредственно измерить эксэргию нельзя, можно только рассчитать ее в случае, если известен состав экосистемы. Эксэргия и структурная эксэргия рассчитываются по формулам

$$Ex / RT = \sum_{i=1}^n c_i f_i \quad (1)$$

$$Ex_{str} = \left(\sum_{i=1}^n c_i f_i \right) * \left(\sum_{i=1}^n c_i \right)^{-1} \quad (2)$$

где Ex – эксэргия ($\text{мг} * \text{м}^{-3}$), Ex_{str} – структурная эксэргия, R – газовая константа ($8,31 \text{ Дж} * \text{моль}^{-1} * \text{К}^{-1}$), T – абсолютная температура (К), c_i – концентрация в экосистеме компонента i ($\text{мг} * \text{м}^{-3}$), f_i – пересчетный коэффициент (рассчитывается как отношение общей величины эксэргии к таковой для детрита ($7,34 * 10^5$)). Коэффициент f_i является качественным фактором, отражающим эксэргиальную составляющую различных таксонов. Соответствующие коэффициенты уже рассчитаны для многих систематических групп организмов и опубликованы (Jørgensen, Vendoricchio, 2001).

Результаты

Для оценки пригодности приложения структурной эксэргии к реальным природным экосистемам был проведен расчет структурной эксэргии для планктонного сообщества пелагиали Южного Байкала в верхнем трофогенном слое 0-50 м за период 1990-2002 гг.. Расчет выполнялся на основании данных ГИС «Планктон» НИИ биологии при ИГУ, полученных в результате еженедельных наблюдений на пелагической постоянной станции № 1. Структурная эксэргия рассчитывалась по формуле (2) по двум основным показательным компонентам экосистемы – биомассам зоо- и фитопланктона. В качестве пересчетного коэффициента f_i для зоопланктона бралось 44, для фитопланктона – 3,4 (Jørgensen, Vendoricchio, 2001).

Среднегодовые значения структурной эксэргии в период 1990-2002 гг. колебались вокруг своего среднемноголетнего значения, не испытывая каких-либо направленных изменений, что, в свою очередь, может говорить об отсутствии неблагоприятных изменений в планктонном сообществе фонового района пелагиали Южного Байкала.

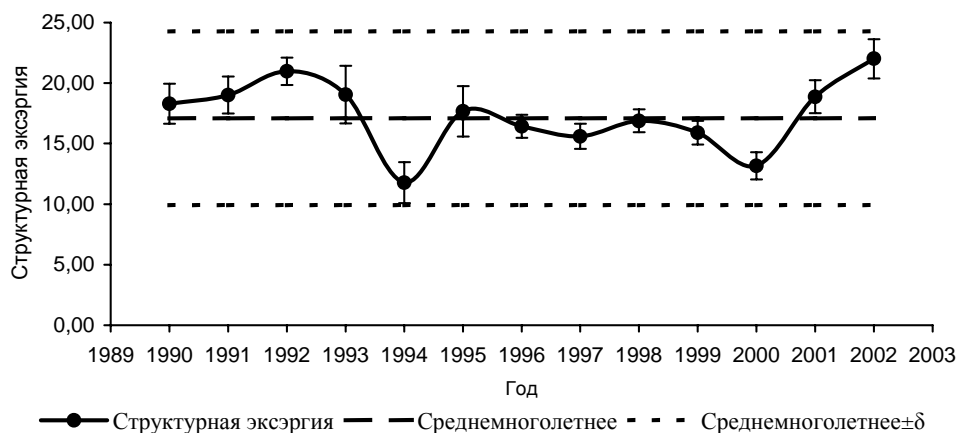


Рисунок. Многолетняя динамика структурной эксэргии в слое 0-50 м на пелагической станции № 1 (Южный Байкал), 1990-2002 гг.

Расчет структурной эксэргии для района воздействия сточных вод Байкальского целлюлозно-бумажного комбината показал, что среднегодовые значения структурной эксэргии и размах ее варьирования в районе г. Байкальска выше таковых в фоновом районе (на пелагической станции № 1).

Рассмотрение пространственного распределения структурной эксэргии по акватории оз. Байкал для 2000, 2001, 2002 и 2003 годов показало, что значения структурной эксэргии для планктонного сообщества различных котловин озера сильно отличаются друг от друга и максимальные значения приходятся на Северную котловину, что может быть вызвано различием экологических условий, в которых развивается планктон.

Полученные результаты свидетельствуют, что структурная эксэргия может использоваться для оценки изменений и отражать степень адаптированности экосистемы при различных воздействиях.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке контракта № 44-1-2008 с Институтом глобального климата и экологии Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Российской Академии наук и аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» по теме № 2.1.1/1359.

Литература

Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник– М.: Мысль, 1990.– 637 с.
Jorgensen S.E., Bendricchio G. Fundamentals of Ecological Modelling – 3d ed.– Amsterdam: Elsevier, 2001.– 530 p.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ

Молчанов А.Г

Институт лесоведения РАН, Московская обл., Россия,
root@ilan.msk.ru

Аннотация: предложено определение фотосинтетической продуктивности по поглощенной солнечной радиации пологом древостоя и по зависимости коэффициента использования поглощенной ФАР на фотосинтез от факторов окружающей среды. Считаем, что эта зависимость одинакова для определенной породы дерева в разных географических регионах.

Предлагаемый нами метод оценки фотосинтетической продуктивности основан на данных дневной интенсивности фотосинтеза, коэффициенте поглощения ФАР облиственными побегами, на которых изучался фотосинтез, и величинах поглощенной ФАР пологом насаждения. Этот метод не требует взятия модельных деревьев, изучения распределения фотосинтетических органов в пологе насаждения, так как коэффициент поглощенной солнечной радиации пологом древостоя прямо зависит от структуры полога насаждения.

Для определения фотосинтетической продуктивности древостоя (ФП) этим методом (Молчанов, 2005; 2007) необходимо определить: 1. Распределение поглощенной и падающей солнечной радиации внутри полога насаждения. 2. Зависимость эффективности использования поглощенной ФАР на фотосинтез облиственных побегов (КПД фотосинтеза) от факторов окружающей среды.

КПД фотосинтеза (η) за день рассчитывали по формуле:

$$\eta = P * 2,55 / Q * b * S \quad (1)$$

где: P - интенсивность фотосинтеза облиственного побега за день, мг CO_2 /г листвы день; Q - падающая ФАР на исследуемый побег, кал/см² день; b - коэффициент поглощения ФАР побегом; S - площадь горизонтальной проекции облиственного побега, см²/г; 2,55 - коэффициент перехода от единиц массы поглощенной углекислоты к энергетическим единицам (калориям).

ФП древостоя за день рассчитывали по формуле:

$$P_s = \eta * Q_s * b_s * a_s / 2,55 \quad (2)$$

где: P_s - количество CO_2 , поглощенное пологом древостоя, в кг CO_2 /га день; η - КПД фотосинтеза; Q_s - сумма прихода ФАР к насаждению в исследуемый день, в кал/га день; b_s - коэффициент поглощения ФАР пологом насаждения, a_s сезонное изменение коэффициента поглощения ФАР пологом насаждения.

Нами, в дубовом древостое на основе полученных данных фотосинтеза за световой день в дни с разными условиями окружающей среды был рассчитан КПД фотосинтеза по формуле (2). Используя полученные значения КПД фотосинтеза и показания окружающей среды в эти дни было рассчитано уравнение зависимости КПД фотосинтеза (η) от солнечной радиации (Q), среднедневной температуры воздуха (T) и предрассветного водного потенциала листа (ψ) отдельно для световых и для теневых листьев. Ниже приводится формула для расчета зависимости КПД фотосинтеза световых листьев дуба от окружающих факторов.

$$\eta = 1.37 * 10^{-5} * Q^2 + 0.0053 * T^2 - 1.013 * \psi^2 - 0.021 * Q - 0.40 * T + 17.67; R^2 = 0.61; n = 61 \quad (3)$$

Таким образом, для определения ФП древостоя необходимо знать величину поглощения ФАР пологом древостоя и зависимость КПД фотосинтеза от окружающих факторов.

Величина поглощения ФАР пологом древостоя индивидуальна для каждого конкретного древостоя и ее необходимо определять.

Зависимость КПД фотосинтеза от факторов окружающей среды является показателем определенного вида дерева и не зависит от его места произрастания.

КПД фотосинтеза в зависимости от окружающих факторов изменяется практически также как и фотосинтез. Параметры световых кривых меняются в зависимости от условий произрастания. Рассмотрим, изменяется ли интенсивность фотосинтеза при световом насыщении в оптимальных условиях окружающей среды (A_{\max}) одного вида растения, произрастающего в разных географических зонах.

По нашим данным (Молчанов, 1983; 2007) у трех исследованных нами пород при благоприятных условиях величина A_{\max} в середине лета для хвой сосны 2-го года составляет $14.3 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, для листьев березы $19 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, и для листьев дуба – $20 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Можно отметить, что величины A_{\max} для трех пород очень близки к тем величинам, которые приводят в своих работах другие авторы, для других географических зон.

Так, по данным S.L. Bassow и F.A. Bazzaz (1998.) в Америке максимальная интенсивность фотосинтеза у дуба (*Quercus rubra*) равнялась $14 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Фотосинтез у хорошо обводненных листьев сеянцев дуба черешчатого во Франции, с 10 ч до 14 ч варьировал с 15.5 до $13.7 \text{ мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Gross et al., 1966).

Для сосны (*Pinus sylvestris*) в Финляндии, где A_{\max} равно $14 \text{ мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Stenberg et al., 2001), в Карелии (Болондинский, Кайбияйнен, 2003) A_{\max} было около $10.2 \text{ мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, в Швеции $15 \text{ мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. (Trong., Linder 1982), в Сибири в Прибайкалье $10.8 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Цельникер и др., 2007.).

Для березы (*Betula pendula*) величины A_{\max} в Северной Америке были $12 \text{ мкмоль CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Ranney et al., 1991), в Московской обл. (Цельникер, 1978) и в Карелии (Курец, Дроздов, 2008) – $12.3 \text{ мкмоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Исходя из этого, считаем, что зависимость КПД фотосинтеза от окружающих факторов хотя и меняется в одном и том же месте произрастания в течение сезона, но мало зависит от географического места произрастания и поэтому могут служить функциональной характеристикой в частности таких древесных пород, как сосна, береза и дуб.

Литература

- Болондинский В.К., Кайбияйнен Л.К. Динамика фотосинтеза в сосновых древостоях // Физиология растений.- 2003.- Т.50.- № 1.- С.105-114.
- Курец В.К., Дроздов С.Н. Лабораторная оценка фотосинтетической активности сеянцев древесных растений // Лесоведение.- 2008.- № 3.- С. 57-61.
- Молчанов А.Г. Экофизиологическое изучение продуктивности древостоев.- М.: Наука, 1983.- 135 с
- Молчанов А.Г. Изменчивость интенсивности фотосинтеза дуба черешчатого от факторов окружающей среды // Лесоведение.- 2002.- № 6.- С. 13-22.
- Молчанов А.Г. Баланс CO_2 в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах.- Тула: Гриф и К, 2007.- 284 с.
- Цельникер Ю.Л., Корзухин М. Д., Суворова Г.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.- Т. 21.- С. 265-292.
- Цельникер Ю.Л. Физиологические основы теневыносливости древесных растений.- М.: Наука, 1978.- 212 с.
- Bassow S.L., Bazzaz F.A. How environmental condition affect canopy leaf-level photosynthesis in four deciduous tree species // Ecology. 1998. Vol. 79. № 8. P. 2660-2675.
- Gross K., Homlicher A., Weinreich A., Wagner E. Effect of shade on stomatal conductance, net photosynthesis, photochemical efficiency and growth of oak sapling // Ann. Sci. for.- 1996.- Vol. 53.- № 2-3.- P. 279-290.
- Ranney T.G., Bir R E., Skroch W.A. Comparative drought resistance among six species of birch (*Betula*): influence of mild water stress on water relations and leaf gas exchange // Tree Physiology.- 1991.- Vol. 8.- P. 351-360.
- Stenberg P., Palmroth S., Bond B.J., Sprugtl D.G., Smolander H. Shoot structure photosynthetic efficiency along the light gradient in Scots pine canopy // Tree Physiology.- 2001.- Vol. 21- P. 805-814.
- Trong E., Linder S. Gas exchange in a 20 yard-old stand of Scots pine II Variation in net photosynthesis and transpiration within and between trees // Physiologia Plantarum.- 1982.- Vol. 54.- N 1.- P. 16-23.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ КАРЬЕРОВ

Надпорожская М.А.¹, Абакумов Е.В.¹, Чертов О.Г.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
marinta@mail.ru, e_abakumov@mail.ru

² University of Applied Sci., Bingen, Germany
ochertov@rambler.ru

Аннотация: вычислительные эксперименты с имитационной моделью динамики органического вещества почв ROMUL показали, что рекультивация нетоксичных суглинистых грунтов промышленных карьеров наиболее эффективна при сочетании искусственного восстановления системы гумусовых веществ почв и растительности (разнотравно-злаковой смеси и саженцев ели). Произведена оценка экологически оптимальных доз внесения торфа при рекультивации.

Площадь земель, нарушенных в результате открытых горных разработок на территории Северо-Запада Русской равнины, составляет около 0,5%. Интенсивные исследования проблем самозарастания и рекультивации таких видов нарушенных земель проводятся сравнительно недавно, с 70-х годов 20 века. Основными приемами биологической рекультивации техногенных отвалов служат подсев разнотравно-злаковых смесей, внесение торфа, лесопосадки. Не смотря на то, что временные стадии становления почв при рекультивации могут ускоряться по сравнению с самозарастанием примерно на 10 лет, проведение мероприятий по оптимизации нарушенных ландшафтов на Северо-Западе России значительно отстает от других регионов страны. Причина малой популярности рекультивации – частая экономическая и экологическая неэффективность проводимых мероприятий (Капелькина, 1993; Абакумов, Гагарина, 2006). Для повышения мотивации принятия хозяйственных решений, уменьшения непродуктивных потерь биофильных элементов из органических удобрений могут быть полезны имитационные вычислительные эксперименты с применением математических моделей. Модель динамики органического вещества почв ROMUL разработана коллективом авторов и была широко использована для анализа функционирования и прогноза изменений педогенной основы лесов Восточной России и других стран (Моделирование..., 2007). Кроме того, данная модель может быть использована для объективизации процедур оценки воздействия на окружающую среду и прогнозирование эффективности почвовосстановления.

Задачей нашей работы было применение модели ROMUL для оценки эффективности и выбора оптимальных приемов восстановления почв под посадками ели на нетоксичных суглинистых грунтах в условиях климата Лужского района Ленинградской области (температура самых теплого и холодного месяцев -8,9 и 16,6°C, влажность лесной подстилки и почвы от 100 до 400 и от 40 до 60 весовых %, соответственно). Вариант 1 (контроль). Имитировали последовательное увеличение поступающего на почву опада от 0 до 180 г/м² за год в 100-летнем ельнике (N 0,9 и 0,5% в хвое и ветках, соответственно). Равным напочвенному принимали корневой опад (N 0,5 %), доли поступления которого в лесную подстилку и почву рассчитывали по экспертной оценке О.Г. Чертова. Влияние приемов рекультивации изучали в следующих вариантах: 2. (трава) – подсев разнотравно-злаковой смеси (N 0,5 %), с возрастающе-сокращающимся опадом в течение 20 лет, с максимумом 100 г/м² за год и подземной массой 70%; 3. (торф и гуматы) – внесение в почву торфяно-гумусовой смеси 1 кг/м² (торфа (C/N 25) 30%, гуматов (C/N 10) 70%); 4. (торф, гуматы и трава) – сочетание вариантов 2 и 3; 5. (торф) – внесение в почву торфа 1 кг/м² (C/N 25); 6. (торф и трава) – сочетание вариантов 2 и 5. Варианты 3 и 5 нуждаются в дополнительном пояснении. Традиционно применяют только низинный или переходный торфы, что соответствует восстановлению только лабильной части гумуса или комплекса гумусовых

веществ с частично разложенными растительными остатками (как в варианте 5). В варианте 3 сделана попытка имитации восстановления целостной системы органического вещества почв, где стабильная часть (комплекса гумусовых веществ с минеральными частицами) составляет 70%, а 30% лабильная часть. Предполагается, что восстановление стабильного гумуса можно обеспечить внесением растворов искусственно синтезированных гумусовых веществ, способных к адсорбции минеральной частью почвы. Пробные лабораторные эксперименты по исследованию влияния искусственных гуматов на свойства почв подтвердили перспективность такого способа (Федорос и др., 2008).

Результаты вычислительных экспериментов показали, что при имитации влияния опада ели восстановление лесной подстилки и лабильной части гумуса происходит за 100 лет, стабильный гумус продолжает накапливаться замедленными темпами и после 200 лет. Это соответствует литературным данным о характерном времени формирования основных морфологических свойств в подзоне южной тайги на тяжелых породах (Александровский, 2002). Посев разнотравно-злаковой смеси, внесение в разных сочетаниях органических удобрений повышают запасы подстилки и лабильного гумуса в минеральной части профиля почвы в первые 30-40 лет, отчетливо демонстрируется повышение содержания доступных растениям соединений минерального азота. К 100-летнему сроку моделирования различия по вариантам нивелируются. Используемая версия модели ROMUL не представляет возможности вычленить влияние гуматов, вносимых с торфом. Этот вопрос остается открытым как для модельных исследований, так и для изучения в лабораторных и полевых экспериментах. Перспективно исследование в экосистемной модели EFIMOD, в которой ROMUL является подмоделью, где учитывается обратная связь между поступлением минерального азота в почву и биомассой растений и опада. В настоящий момент представляется интересным произвести расчет доз органических удобрений для сбалансированного биологического круговорота и предотвращения непродуктивных минерализационных потерь. Критерием сбалансированности можно считать форму кривой динамики компонентов органического вещества почвы. Прогрессивное возрастание либо выположенность кривых свидетельствуют о преобладании процессов аккумуляции или равновесном состоянии. Вычислительные эксперименты показали, что этому условию удовлетворяют дозы вносимого торфа около 1 кг/м^2 (10 т/га) в варианте без подсева трав. Подсев трав, по расчетам, позволяет повысить количество торфа до 3 кг/м^2 (30 т/га).

Разработку системы рекультивационных приемов следует производить, учитывая специфику литогенной основы, особенностей педогенеза и сочетая вычислительные модельные эксперименты с физическим лабораторным и полевым моделированием.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 08-04-01128).

Литература

- Абакумов Е.В., Гагарина Э.И. Почвообразование в посттехногенных экосистемах карьеров на северо-Западе Русской равнины.- СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2006.- 208 с.
- Александровский А.Л. Развитие почв восточной Европы в голоцене: Дис. ... докт. биол. наук.- М., 2002.- 48 с.
- Капелькина Л.П. Экологические аспекты оптимизации техногенных ландшафтов.- СПб.: ПРОПО, 1993.- 191 с.
- Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. (Отв. ред. В.Н. Кудеяров).- М.: Наука, 2007.- 380 с.
- Федорос Е.И., Надпорожская М.А., Шипов В.П., Чертов О.Г. Препараты гуминовых веществ для сельского и городского хозяйства – использование для рекультивации и реабилитации почв // Фундаментальные основы инновационных биологических проектов в «Наукограде» // Сб. статей (Ред. Д.Ю. Власов, Д.В. Осипов).- СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2008.- С. 179-203.

РЕЖИМЫ ДИНАМИКИ МОДЕЛИ ДВУХВОЗРАСТНОЙ ПОПУЛЯЦИИ С ПЛОТНОСТНЫМ ЛИМИТИРОВАНИЕМ ВЫЖИВАЕМОСТИ МОЛОДИ

Неверова Г.П., Фрисман Е.Я.

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия
galina.nev@gmail.com

Аннотация: исследуется модель динамики численности двухвозрастной популяции с сезонным характером размножения. Коэффициент выживаемости молоди представлен функцией численности обеих возрастных групп и тем самым осуществляется плотносно – зависимая регуляция роста популяции. Проведено аналитическое и численное исследование модели.

1. Уравнения динамики

В данной работе продолжено исследование математической модели, описывающей динамику численности двухвозрастной популяции с сезонным характером размножения и плотносным лимитированием выживаемости молоди. (Шапиро, 1983, Фрисман и др., 1988, 1994). Рассматривается случай, когда коэффициент выживаемости младшего возрастного класса является функцией численности обеих возрастных групп. Уравнения динамики популяции имеют вид:

$$\begin{cases} x_{n+1} = a \cdot y_n, \\ y_{n+1} = x_n \cdot s(x_n, y_n) + v \cdot y_n \end{cases} \quad (1)$$

где x - численность младшего возрастного класса, y - численность старшего возрастного класса, составляющего репродуктивную часть популяции, n – номер периода размножения, a – коэффициент рождаемости, v ($0 \leq v \leq 1$) – коэффициент выживаемости взрослых особей. Функция выживаемости младшего возрастного класса $s(x, y)$ выбрана по аналогии с моделью Рикера в виде $s(x, y) = e^{-\alpha \cdot x - \beta \cdot y}$, где α - коэффициент, описывающий интенсивность воздействия особей младшего возрастного класса, коэффициент β характеризует интенсивность воздействия особей второго возрастного класса.

2. Результаты исследования

Проведено подробное исследование модели. Показано, что возможно единственное нетривиальное стационарное состояние системы. Определена область его устойчивости, проанализирован характер потери устойчивости и сценарии переходов динамических режимов. Обнаружено, что удобным параметром для исследования последовательности наблюдаемых бифуркаций является величина $b = \beta/(a\alpha)$: при такой параметризации удастся построить все возможные параметрические портреты.

Показано, что добавление в самолимирование выживаемости младшей возрастной группы лимитирования взрослыми особями (уменьшение выживаемости младшей группы с ростом численности взрослых) приводит (при $0 < b \leq 1$), наряду с уменьшением равновесной численности популяции, к существенному увеличению области ее устойчивости. Потеря устойчивости происходит при существенном росте параметра рождаемости a (тем скорее, чем меньше параметр выживаемости v) или при убывании выживаемости (при больших значениях рождаемости). Эта потеря устойчивости может произойти только при комплексно-сопряженных корнях характеристического уравнения системы (1), при переходе $|\lambda|$ через 1, и сопровождается появлением предельных инвариантных кривых, которые при дальнейшем изменении параметров v и a вглубь от границы устойчивости разрушаются с образованием весьма сложных предельных структур.

На рисунке построена бифуркационная диаграмма, системы при $b = 0.1$ и $v = 0.05$, демонстрирующая зависимость предельного распределения численности младшего

возрастного класса (x) от величины рождаемости a . Диаграмма дополнена «портретами» аттракторов, которые соответствуют конкретным значениям параметра a .

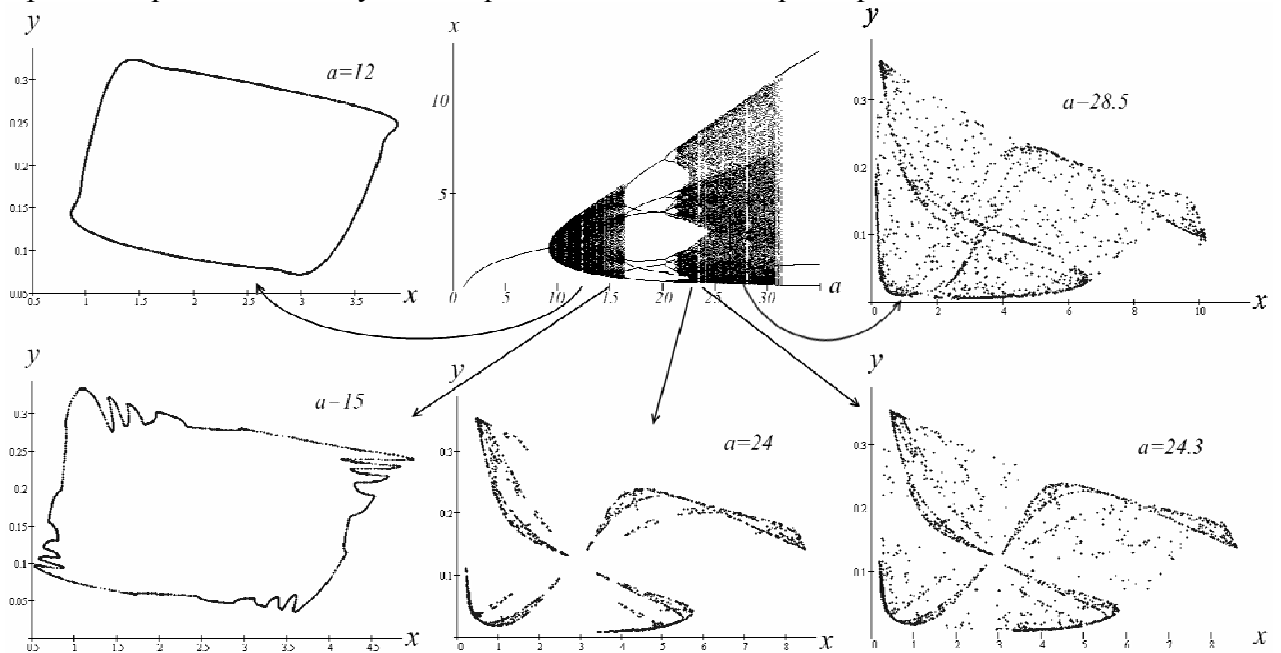


Рисунок. Бифуркационная диаграмма динамической переменной x от параметра a

Дальнейший рост ограничения выживаемости младшей группы взрослыми особями (при $1 < b < 3$), наряду с уменьшением равновесной численности популяции, приводит уже и к существенному уменьшению области ее устойчивости. При этом меняется качественная картина потери устойчивости: кроме возможной потери устойчивости при комплексных собственных числах, появляется большая зона значений параметров v и a (увеличивающаяся с ростом параметра b), попадание в которую сопровождается переходом одного из собственных чисел через -1 и появлением предельного 2-цикла.

С дальнейшим ростом значений параметра b ($b \geq 3$) потеря устойчивости может произойти только при переходе одного из собственных чисел через -1 . В этом случае происходит дальнейшее сужение области устойчивости и самолимитирование выживаемости младшей возрастной практически не играет роли.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке ДВО РАН (конкурсные проекты № 09-II-CO-06-006, № 09-I-P15-01) и РФФИ (проект № 09-04-00146).

Литература

- Фрисман Е.Я., Луппов С.П., Скокова И.Н., Тузинкевич А.В. Сложные режимы динамики численности популяции, представленной двумя возрастными классами // Математические исследования в популяционной экологии.- Владивосток: ДВО АН СССР, 1988.- С. 4-18.
- Фрисман Е.Я., Скалецкая Е.И. Странные аттракторы в простейших моделях динамики численности биологических популяций // Обозрение прикладной и промышленной математики.- 1994.- Т.1, № 6.- С. 988-1004.
- 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.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА ТРАЕКТОРИЙ РАЗВИТИЯ ПРИЗНАКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ СЖАТЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ *AGROPYRON CRISTATUM* (L.) BEAUV.)

Неуймин С.И., Шавнин С.А., Монтиле А.А.

Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Россия
sergneu@mail.ru

Аннотация: математическая модель анализа траекторий развития облегчает работу по изучению изменчивости не только отдельных признаков таксонов растений, но и их сочетаний, определяющих как целостность, так и координированное развитие признаков на различных уровнях организации. Алгоритм преобразования последовательностей признаков элементов в виде радикального показателя системы сжатых отображений (Рп ССО) позволяет анализировать практически неограниченное число параметров и при этом оценивать систематическое сходство и различие таксонов по его числовому выражению. Последующий частотный анализ значений Рп ССО раскрывает эколого-популяционную структуру вида.

Перевод биологических сведений на язык математических символов позволяет в сжатой, корректной форме получать конечный результат, подлежащий интерпретации в терминах и понятиях биологии. Для такой формализации эмпирических данных при работе с различными категориями изменчивости мы предлагаем использовать «Радикальный показатель системы сжатых отображений» (Рп ССО) (Неуймин, 1991; Неуймин, Шмырин, 2003; Неуймин, Монтиле, Шавнин, 2007). В основу расчета Рп ССО заложен принцип сжатых отображений и метод последовательных приближений (последовательный анализ), используемый в математической статистике. Траектории развития организмов описываются последовательностью элементов (членов). В растительной системе на разных уровнях ее организации, таковыми являются варьирующие признаки, состоящие из совокупности элементов. Приведем некоторые примеры использования принципа последовательного преобразования элементов у генеративной сферы разных форм *Agropyron cristatum* (L.) Beauv.

Мы предлагаем следующую модель построения траекторий развития количественных признаков на уровне растительного организма. Задана случайная последовательность количественных «финальных» признаков: $a, b, c, d...$ которая соответствует организму – A , и аналогичная последовательность организму – B . Соответственно, организмы так же формируют ряды субэлементов: $A, B, C, D...$, но на другом уровне организации – экотипическом. При формировании «финального» признака « a » возможно в свою очередь выделить последовательность элементов $a_1, a_2, a_3, a_4...$, суммарное значение которых формирует данный признак, в силу чего он определен нами как экоэлемент « a ». Экоэлементы $...b, c, d...$ так же состоят из соответствующих последовательностей элементов. Совокупность траекторий одного генотипа подчиняется единому организационному принципу построения структурных элементов растительной системы.

В качестве иллюстрации приведем схему формирования «финального» признака – «длина колосковой оси» у *Agropyron cristatum* (L.) Beauv. Значением, определяющим величину «финального» признака « a » (длина колосовой оси), является сумма длин сегментов оси колоса. Длины отдельных сегментов оси колоса в направлении от основания к его вершине и входят в соответствующий вариационный ряд последовательностей: $a_1, a_2, a_3, a_4...$ Траектории формирования «финального признака» у разных образцов житняка различны при сходных условиях развития признаков ($a_1 \neq a_2 \neq a_3 \neq a_4...$). Соответственно экоэлементы $...b c d ...$ взаимосвязано формируют свои специфические траектории развития в виде элементов. При последовательной свертке элементов траекторий получаем числовые значения Рп ССО. В дальнейшем проводится частотный анализ значений Рп ССО и, на основании полученных данных, идентификация в частотном пространстве генетических форм (рисунок).

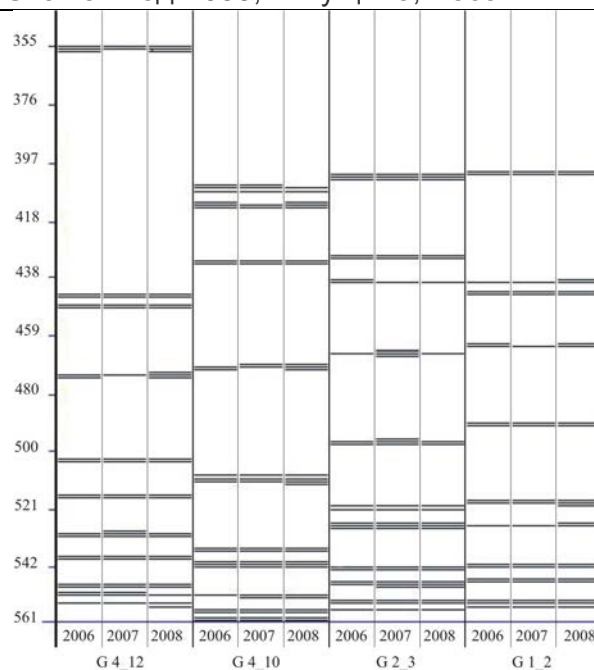


Рисунок. Частотное распределение экоэлементов у различных генотипов *Agropyron cristatum* (L.) Beauv. Значения 355 - 561 – числовое выражение экоэлементов; G 4_12, G 4_10, G 2_3, G 1_2 – генотипы *Agropyron cristatum* (L.) Beauv.

Анализ показывает, что, независимо от года выращивания *Agropyron cristatum* (L.) Beauv. все четыре генотипа имели четко детерминированную локализацию вариантов комбинаций. Однако, отдельные варианты имеют рассеянную характеристику частот, хотя в целом соответствуют примерному расположению в относительном частотном ряду. Так генотип G 4_12 имеет наиболее полиморфную систему подвижности экоэлементов практически во все годы изучения. Генотип G 2_3 отличается от остальных незначительной коррекцией в распределении частот. Соответственно все генотипы имеют характерные частоты встречаемости вариантов комбинаций экоэлементов.

Таким образом, предложен алгоритм преобразования последовательностей признаков элементов. Полученные частотные характеристики элементов позволяют математически выражать параметры траекторий развития признаков любого ранга и выявлять специфику их построения в решении прикладных задач для целей систематики и выявления уровня группового приспособления растений к внешним факторам. При последовательном преобразовании системы признаков стало возможным, наряду с характеристикой «финального признака» и составляющих его элементов, получить «паспорт» генотипа в виде графического выражения частот встречаемости элементов.

Работа выполнена по программе Президиума РАН «Биологическое разнообразие».

Литература

- Неуймин С.И. Система изменчивости пшеницы эфиопской (*Triticum aethiopicum* Jkubz.): Автореф... канд. биол. наук.– Ленинград, 1991.– С.19.
- Неуймин С.И., Шмырин Н.Н. Популяционная экология и интродукция растений // Новый подход к формализации структурных подразделений растительной системы / Сб. трудов. Вып. 2.– Екатеринбург: УрО РАН, 2003.– С. 210-218.
- 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.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БИОЦЕНОЗА ВОДОЕМОВ КОМПЛЕКСНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕВЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Никифорова А.А.

Московский Государственный Университет Сервиса, ИТuГ, Москва, Россия
combase@inbox.ru

Аннотация: рассмотрена возможность применения сетевого моделирования к задаче прогноза экологического состояния водоемов комплексного назначения и его влияния на рыбопродуктивность. По данным экологического мониторинга построена в линейном приближении математическая прогнозная модель. Представлен алгоритм построения сетевой модели, а также ее оптимизации за счет выбора значимых факторов (коэффициентов и параметров уравнений). В целях оптимизации данные мониторинга обрабатывались методами корреляционно-регрессионного анализа. Разработанная методология и математический аппарат позволяют использовать предлагаемые модели для анализа потенциальной рыбопродуктивности различных ВКН Европейской части РФ, мониторинга влияния базовых факторов на состояние водной экосистемы

Предлагаемая математическая прогнозная модель представляет собой систему линейных параметрических уравнений. Система уравнений и конкретные параметры формируются в процессе разработки модели на стадии качественного моделирования. При этом учитываются лишь значимые факторы, так как переизбыток информации только осложняет процесс принятия решений. Математическая прогнозная модель реализована в виде программного комплекса, интегрированного с базой данных мониторинга, что позволяет работать с комплексом обычным пользователям ПК, и не требует от специалистов, работающих с комплексом, специальных знаний в области математики и программирования.

Моделирование осуществлялось по данным мониторинга полученным на экспериментальной базе ВНИИ ирригационного рыбководства. Исследовалась зависимость рыбопродуктивности от следующих показателей: кислород, нитриты, нитраты, сульфаты, температура воды, площадь водоёма, средняя глубина, прозрачность, макрофиты, зоо- и фитопланктон, бентос, рН. Целевая функция отражает зависимость рыбопродуктивности от выше перечисленных параметров и в общем виде выглядит следующим образом:

$$Y_{p. \text{пр-ть}} = f_{p. \text{пр-ть}} = (X_{O_2}, X_{\text{нитраты}}, X_{\text{нитриты}}, X_{\text{сульфаты}}, X_b, X_{\text{проз-ть}}, X_{\text{макр.}}, X_{\text{зоопл.}}, X_{\text{фитопл.}}, X_{pH}, X_{\text{бентос}}, a_s, a_h)$$

или $f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_{10}, a_1, a_2) = y$ (1)

Явный вид зависимости не известен, поэтому будем решать задачу в линейном приближении. Тогда уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$y = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 + \alpha_5 x_5 + \dots + \alpha_{10} x_{10} + a_1 + a_2, \quad (2)$$

где α_i – неизвестные коэффициенты, некоторые из которых могут быть и незначимы ($\alpha_j \rightarrow 0$).

В такой постановке решение задачи разбивается на 2 этапа:

1. Выделение группы значимых коэффициентов.

2. Определение значений выбранных коэффициентов, позволяющих наилучшим образом описать реальную ситуацию.

Определение значимых коэффициентов можно осуществлять различными математическими методами с привлечением дополнительной информации о биологических процессах (Свирижев, Логофет, 1978).

Была построена регрессионная модель, в которой в качестве факторных признаков были выбраны такие переменные, как температура, уровень кислорода, биогены и др. Уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$Y(X_1; X_2; \dots; X_n) = b_0 + b_1 x X_1 + b_2 x X_2 + \dots + b_n x X_n, \quad (3)$$

где Y — прогнозируемый (результативный) показатель; в данном случае — рыбопродуктивность; $X_1; X_2; \dots; X_n$ — факторы (независимые переменные); в данном случае

— температура, уровень кислорода, биогены и т.д.; n — количество независимых переменных; b_0 — свободный член уравнения регрессии; $b_1; b_2; \dots; b_n$ — коэффициенты регрессии, измеряющие отклонение результивного признака от его средней величины при отклонении факторного признака на единицу его измерения.

Помимо комплексного влияния всех факторов на рыбопродуктивность, большой интерес представляет влияние отдельных факторов (индивидуальное влияние каждого из факторов) на результивную функцию – рыбопродуктивность (Ризниченко, Рубин, 1993)

Изучены парные влияния друг на друга факторов. По результатам анализа была принята модель, учитывающая набор 11 факторов. Парное сравнение влияния каждого из факторов на рыбопродуктивность показало, что наибольшая корреляция имеет место между фитопланктоном, зоопланктоном и рыбопродуктивностью. Влияние на рыбопродуктивность температуры, кислорода и биогенов опосредованно и имеет вторичный характер, что подтверждается высокой степенью корреляции зоо- и фитопланктона. Анализ влияния бентоса на рыбопродуктивность показал достаточно высокую степень корреляции.

Методика построения сетевой модели достаточно подробно описана в литературе (Федосеев и др. 2002)

По результатам предварительного анализа была построена сетевая модель, состоящая из 8 событий и 13 работ, продолжительность выполнения которых указана над работами. (Рисунок 1).

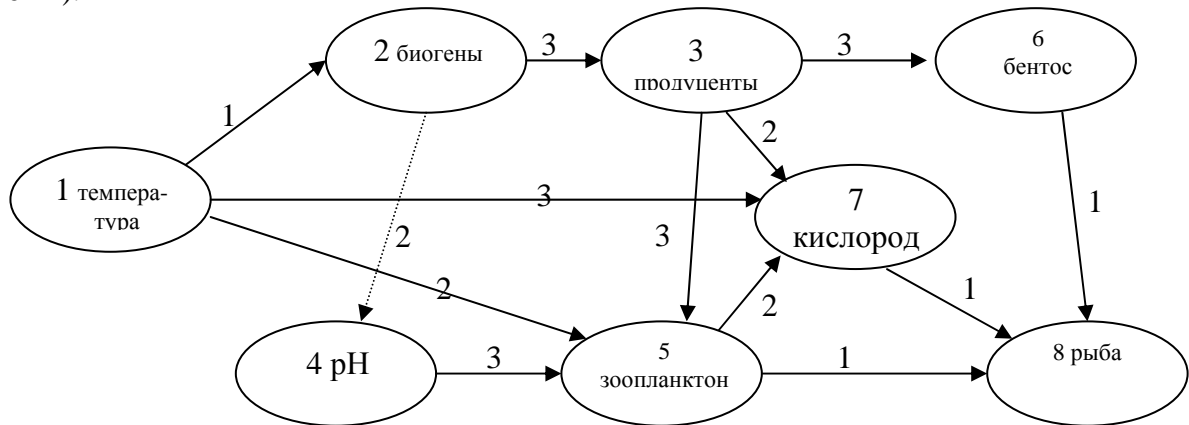


Рис. 1. Сетевая модель биоценоза водоема

Расчетные параметры и коэффициенты модели представлены в табл. 1.

В первой графе число K_{np} , характеризует количество работ, непосредственно предшествующих событию, с которого начинается рассматриваемая работа.

Заполнение таблицы начинается с расчета раннего срока начала работ. Для работ, имеющих цифру «ноль» в первой графе, в гр. 4 также заносятся нули, а их значение в гр. 5 получается в результате суммирования гр. 3 и 4. В нашем случае таких работ три — (1,2), (1,5) и (1,7), поэтому в гр. 4 в соответствующей ей строке поставим 0, а в гр. 5 — $0+1=1$, $0+2=2$, $0+3=3$. Для работ, начинающихся с номера «1», предшествующих работ нет.

Для работы, начинающейся на номер «2» (см. рис. 1), просматриваются все верхние строчки второй графы таблицы и отыскиваются строки, оканчивающиеся на этот номер. Количество найденных работ записывается во все строчки, начинающиеся с номера «2». Например, для работы (2,3) в гр. 1 поставим цифру 1, так как в гр. 2 на номер 2 оканчивается одна работа: (1,2).

Для заполнения следующих строк гр. 4, т. е. строк, начинающихся с номера 2, просматриваются заполненные строки гр. 5, содержащие работы, которые оканчиваются на этот номер, и максимальное значение переносится в гр. 4 обрабатываемых строк. В данном случае такая работа лишь одна (1, 2), о чем можно судить по гр. 1. Цифру 1 из гр. 5 переносим в гр. 4 для всех работ, начинающихся с номера 2, т. е. в последующие строки с

номера (2, 3), (2, 4). Далее для каждой из этих работ путем суммирования их значений гр. 3 и 4 сформируем значение гр.5:

$$t_{po}(2.3) = 1 + 3 = 4; t_{po}(2.4) = 1 + 2 = 3$$

Таблица 1. Расчет основных показателей сетевой модели

$K_{пр}$	(i,j)	t(i,j)	$t_{рн}(i,j)=t_p(i)$	$t_{по}(i,j)$	$t_{пн}(i,j)$	$t_{по}(i,j)=t_p(j)$	$R_{п}$	$R_{н}$	$K_{н}$
1	2	3	4	5=4+3	6=7-3	7	8=6-4	9	10
0	1,2	1	0	1	0	1	0	0	1,00
0	1,5	2	0	2	5	7	5	5	0,29
0	1,7	3	0	3	6	9	6	6	0,33
1	2,3	3	1	4	1	4	0	0	1,00
1	2,4	2	1	3	2	4	1	0	0,83
1	3,5	3	4	7	4	7	0	0	1,00
1	3,6	3	4	7	6	9	2	0	0,67
1	3,7	2	4	6	7	9	3	3	0,40
1	4,5	3	3	6	4	7	1	0	0,83
3	5,7	2	7	9	7	9	0	0	1,00
3	5,8	1	7	8	9	10	2	2	0,33
1	6,8	1	7	8	9	10	2	0	0,67
3	7,8	1	9	10	9	10	0	0	1,00

Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет заполнена последняя строка таблицы. Графы 7 и 6 заполняются «обратным ходом», т. е. снизу вверх.

Учитывая, что нулевой резерв времени имеют только события и работы, которые принадлежат критическому пути, получаем, что критическим является путь: $L_{кр} = (1,2,3,5,7,8)$, а $t_{кр} = 10$ периодов.

Коэффициент напряженности изменяется от нуля до единицы, причем, чем он ближе к единице, тем более тесная связь между данными факторами. Самыми напряженными являются работы критического пути, для которых он равен 1. На основе этого коэффициента все работы СМ могут быть разделены на три группы: напряженные ($K_{н}(i,j) > 0,8$), под критические ($0,6 < K_{н}(i,j) < 0,8$) и резервные ($K_{н}(i,j) < 0,6$).

Самыми зависимыми факторами, в большой степени влияющими друг на друга, являются: (1,2) Температура – Биогены; (2,3) Биогены – Продуценты; (3,5) Продуценты – Зоопланктон; (5,7) Кислород – Зоопланктон. Коэффициент напряженности, близкий к 1 у факторов: (2,4) Биогены – рН и (4,5) рН – зоопланктон. Зависимость факторов и период взаимодействия диктуется изменением температурного режима, если в систему не вмешивается антропогенный фактор.

Данная биолого-математическая модель является основой для планирования и разработки технологии комплексного использования водных и земельных ресурсов для производства продуктов питания, базирующаяся на максимальной утилизации биологических ресурсов – земельных и водных угодий, что позволит увеличить выход экологически чистой продукции на 40-50%.

Литература

- Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б. Математические модели биологических продукционных процессов.- М., 1993.- 75 с.
 Свиричев Ю.М., Логофет О.Д. Устойчивость биологических сообществ.- М.: Наука, 1978.- 352 с.
 Федосеев В.В., Гармаш А.Н., Дайинбегов Д.М. и др. Экономико-математические методы и прикладные модели.- М.: ЮНИТИ, 2002.- 391 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ИНВАЗИИ НА ПОПУЛЯЦИОННУЮ ДИНАМИКУ ВОДНЫХ СООБЩЕСТВ НАРОЧАНСКИХ ОЗЁР

Нуриева Н.И.^{1,2}, Медвинский А.Б.^{1,2}, Русаков А.В.¹, Бобырев А.Е.⁴, Бурменский В.А.³, Криксунов Е.А.³.

¹ *Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино, Россия*
medvinsky@iteb.ru

² *Пущинский государственный университет, Пущино, Россия*
nailya.nurieva@mail.ru

³ *Биологический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

⁴ *Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*

Аннотация: в данной работе предложена концептуальная модель водной экосистемы Нарочанских озер республики Белоруссия. Модель учитывает трофические взаимодействия между рыбой (хищник) и коловратками (жертва), а также возрастную структуру популяции рыбы. Исследуется влияние инвазии (мизиды) на характер поведения экосистемы. Проведен детальный анализ в пространстве параметров модели.

Вселение новых видов в экологические системы - широко распространенный естественный процесс, происходивший во все геологические эпохи (Vermeij, 1991), однако хозяйственная деятельность человека значительно усиливает масштабы и интенсивность этого природного явления, вызывая в экосистемах массу нежелательных последствий как с точки зрения поддержания их нормальной жизнедеятельности (например, сохранения их биологического разнообразия), так и с точки зрения хозяйственной деятельности человека. Проблема видов-вселенцев также тесно связана с другими глобальными экологическими проблемами: изменениями климата, ухудшением состояния окружающей среды, сокращением биологического разнообразия и вселения трансгенных организмов и по своей значимости и масштабам вызываемых в водоемах изменений зачастую превосходит такие «традиционные» и сравнительно хорошо изученные формы антропогенного воздействия, как, например, органическое загрязнение (Алимов, 2004).

В ближайшие годы следует ожидать расширения масштабов этого феномена благодаря усилению воздействия человека на природные экосистемы, находящиеся на терминальной стадии своего развития (Алимов, 2004).

Изучение закономерностей протекания биологических инвазий становится специальной областью биологических исследований. Особую область инвазионных исследований составляет моделирование, позволяющее не только предсказать возможные инвазии, но и оценить их возможные последствия. Широкое применение нашли концептуальные модели (Lotka, 1925; Volterra, 1926; Kolmogorov et al, 1937). Это достаточно простые модели динамики сообществ, которые описывают основные взаимодействия между видами, при этом результат расчета или исследования при помощи концептуального моделирования носит качественный характер (May, 1976; Medvinsky et al., 2002; Базыкин, 2004).

В нашей работе анализировались последствия возможной инвазии мизиды в экосистему Нарочанских озер (Республика Беларусь). Озеро Нарочь является самым большим естественным водоемом в Беларуси. Площадь водного зеркала оз. Нарочь составляет 79,6 км². Средняя глубина составляет 8,9 м (Остапеня, 2003). В гидрологическом отношении озеро Нарочь относится к числу слабопроточных водоёмов. Вода поступает в него из озера Мястро через короткую протоку Скема. Баторинский ручей соединяет озеро Мястро с озером Баторино. Кроме того, Нарочь принимает воды 17 ручьев; из озера вытекает река Нарочь, впадающая в реку Вилию, правый приток Немана (Якушко и др., 1988). Сообщество пелагиали озёр Нарочь и Мястро состоит из нескольких десятков видов

фитопланктона и зоопланктона (Остапеня, 2003); в составе ихтиофауны насчитывается 24 вида рыб, наиболее массовыми из которых являются плотва, окунь и щука (Костоусов и др., 1999).

Возможность инвазии мизиды в эти озера была предсказана балансовой моделью ЕСОРАТН (Криксунов и др., неопубликованные данные), кроме того, мизида появилась в соседних водоемах. Нами написана концептуальная модель водного сообщества Нарочанских озер, которая учитывает трофические взаимодействия между зоопланктоном (жертва) и рыбой (хищник). Модель не учитывает сезонные изменения, в связи с этим холодный период исключается из рассмотрения, и промежуток между двумя последовательными репродуктивными периодами составляет 272 дня. Для описания изменения плотности коловраток мы модифицировали феноменологическую модель Consensus (Berezovskaya et al., 2005), которая с хорошей точностью воспроизводит динамику популяций целого ряда видов коловраток (например, *Brachionus rotundiformis*, *B. lyratus*, *Asplanchna girodi* и некоторых других). Модель так же учитывает возрастную структуру популяции рыбы. Параметризация модели проводилась с учетом данных полевых наблюдений. Исследовалось влияние инвазии промежуточного хищника (мизида) на характер популяционной динамики. Построены параметрические портреты модели до и в результате инвазии. В зависимости от внешних условий обнаружено три различных динамических режима в экосистеме до инвазии (регулярные колебания, нерегулярные колебания и область вымирания) и один динамический режим в постинвазионной экосистеме (регулярные колебания). Регулярные колебания, существовавшие на момент инвазии, сохраняются, а нерегулярная динамика в результате инвазии сменяется регулярной. Таким образом, следствием инвазии является регулярность в изменении численности озёрных популяций. При этом осцилляции численности коловраток носят сравнительно более сложный характер, одной из причин которого является несовпадение периодов размножения двух хищников: мизиды и рыбы. Определены условия натурализации вселенца, показано, что успех инвазии зависит от начальной плотности вселенца и момента интродукции. С помощью модели обнаружено, что область параметров, характеризующаяся вымиранием водного сообщества в период, предшествующий инвазии исчезает. Это может свидетельствовать о повышении устойчивости сообщества в отношении изменения условий его обитания.

Литература

- Алимов А.Ф., Богуцкая Н.Г. (ред.) Биологические инвазии в водных и наземных экосистемах.- 2004. М., С.-П.: Тов. науч. изд. КМК.
- Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций.- Москва, Ижевск: ИКИ, 2004.
- Костоусов В.Г., Копылова Т.В., Полякова Г.И., Оношко И.И. Состояние ихтиоценоза озера Нарочь в условиях деэвтрофикации водоема // Озерные экосистемы: Материалы Международной научной конференции.- Минск, 1999.- С. 173-186.
- Остапеня А.П. (ред) Бюллетень экологического состояния озёр Нарочь, Мястро, Баторино (2000 год).- Минск: Белорусский государственный университет, 2003.- 63 с.
- Якушко О.Ф., Мысливец И.А., Рачевский А.Н., Богдель И.И., Власов Б.П., Калечиц В.А., Мельников О.К., Макрицкий А.М., Миронов В.Г. Озёра Белоруссии.- Минск: Ураджай. 1988.- 216 с.
- Berezovskaya, F., Karev, G., Snell, T.W. Modeling the dynamics of natural rotifer populations: Phase-parametric analysis. *Ecol. Compl.*, 2005, v. 2, pp.395-410.
- Kolmogorov A., Petrovskii L., Piskunov. Étude de l'équation de la diffusion avec croissance de la quantité de matière et son application à un problème biologique. *Bull. Univ. Moscou Serie Int.*, 1937, A 1, pp. 1-25.
- Lotka A.J. *Elements of Physical Biology*. Baltimore: Williams and Wilkins, 1925.
- May R.M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 1976, v. 261, pp. 459-467.
- Medvinsky, A.B., Petrovskii, S.V., Tikhonova, I.A., Malchow, H., Li, B.-L., Spatiotemporal complexity of plankton and fish dynamics. *SIAM Review*, 2002, v. 44, pp. 311-370.
- Vermeij G.J. 1991. When biotas meet: understanding biotic interchange // *Science* .v. 253.№ 5024, pp. 1099-1104.
- Volterra V. (1926) Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically. *Nature* 118, 558-560.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ФЕРОМОННОГО ПОИСКА У ЛЕСНЫХ ЧЕШУЕКРЫЛЫХ: АНАЛИЗ СВОЙСТВ КАНАЛА КОММУНИКАЦИИ И ТРАНСФОРМАЦИИ СИГНАЛА В ШУМ

Овчинникова Т.М.¹, Суховольский В.Г.¹, Волкова П.Е.¹, Ковалев А.В.²

¹*Институт леса СО РАН, Красноярск, Россия*

ovchinnikova_tm@mail.ru

²*Международный научный центр исследований экстремальных состояний организма при Президиуме КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия*

Аннотация: настоящая работа посвящена теоретическому анализу и моделированию канала феромонной коммуникации у лесных чешуекрылых. Модель позволяет оценить оптимальную мощность источника информации, рассчитать соотношение сигнал-шум в зависимости от степени турбулентности потока и расстояния от источника до приемника, найти оптимальное число компонентов феромона в зависимости от экологии вида, оценить предельную дистанцию, на которой возможен надежный прием сигнала.

Диффузность пространственного распределения лесных чешуекрылых на стадии личинки связана с низкой плотностью кормовых ресурсов для этих видов насекомых и способствует оптимизации роста особей, уменьшению риска гибели особей от хищников и паразитов. Однако при переходе на стадию имаго, у этих видов в процессе размножения возникает задача поиска особей противоположного пола. Для решения этой задачи у лесных чешуекрылых существует феромонный канал коммуникации. Известно, что самки насекомых генерируют один или несколько (до восьми) типов летучих низкомолекулярных соединений - феромонов, распространяющихся от источника с потоками воздуха и регистрирующихся рецепторами самцов. Предполагают, что поведение самца, зарегистрировавшего молекулы феромонов, характеризуется отрицательным анемотаксисом и после восприятия молекул феромонов самец начинает перемещаться против направления ветра. Однако в такой простой модели поиска не принимается во внимание турбулентность воздушных потоков, способствующая изменению траекторий движения молекул феромонов, не учитывается воздействие на молекулы феромонов различных факторов природной среды (света, влаги и т.п.), не объясняется необходимость генерации многих компонентов феромонов.

К сожалению, на молекулярном уровне механизмы поиска особей противоположного пола с использованием этого канала до настоящего времени детально не изучены. Это связано во многом с техническими трудностями проведения экспериментов с особями насекомых в полевых условиях и сложностями регистрации молекул феромонов, генерируемых самками насекомых. Однако изучение работы канала феромонной коммуникации важно как для понимания общих механизма поиска объектов по запаху, так и для разработки методов эффективного управления популяциями насекомых и контроля их численности.

Настоящая работа посвящена теоретическому анализу и моделированию канала феромонной коммуникации у лесных чешуекрылых. В модели рассматривается **источник информации**, включающий генератор феромонов и генератор ветрового потока, **информационный канал** (молекулы феромонов, перемещающиеся в ветровом потоке) и **приемник** (рисунки).

Источник информации. Предполагается, что отдельная особь генерирует к компонентам феромонов. Анализ химического состава феромонов разнообразных видов насекомых показал, что отдельные виды насекомых генерируют видоспецифичные феромоны, включающие несколько компонентов. Интенсивность синтеза и выделения феромонов самками меняется в течение суток, что обеспечивает циклический характер выделения феромонов и существование суточной динамики активности самцов.

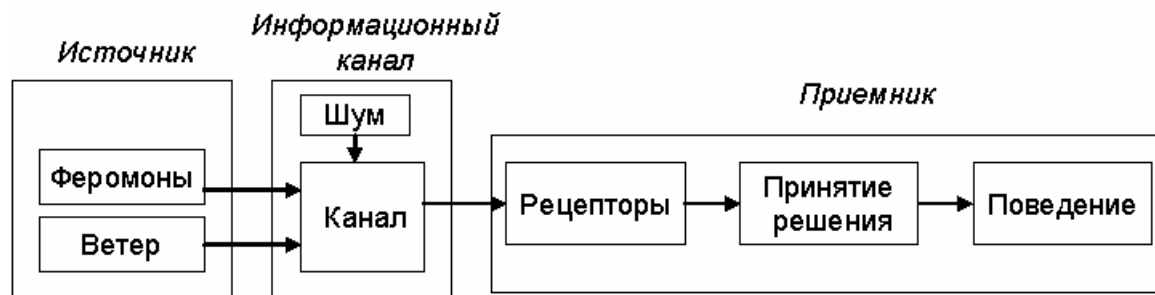


Рисунок. Схема модельной системы феромонной коммуникации

Для многих видов чешуекрылых характерно скопление самок. В этом случае возможно использование отдельными особями при генерации феромонов стратегии минимизации энергии, затрачиваемой для синтеза молекул феромонов в расчете на то, что другие особи будут продолжать генерацию феромонов. Для описания стратегий поведения самок используются методы теории игр. Так как самки не могут генерировать воздушные потоки, то место их скопления должны быть участки с рельефом, способствующим возникновению ламинарных ветровых потоков.

Информационный канал. При высокой степени турбулентности воздушных потоков, переносящих молекулы феромонов, информация о направлении, откуда перенесены эти молекулы, быстро теряется. Можно говорить о том, что при увеличении расстояния до источника информации происходит трансформация феромонного сигнала в шум. Уменьшения шума в информационном канале можно добиться, если молекулы феромона имеют не слишком большое время жизни и либо самопроизвольно распадаются через некоторое время после генерации самками либо разлагаются под действием физических факторов (тепло, ультрафиолетовое излучение) и химических соединений, имеющих в воздухе (например, терпенов). При передаче через информационный канал информации о многокомпонентном феромоне предполагается, что траектории движения различных молекул расходятся с увеличением расстояния от источника феромонов до приемника. Этот эффект используется в модели качестве счетчика расстояния до источника информации.

Приемник информации. Если каждый из компонентов феромонов перемещается независимо, то чем большее число компонентов регистрируется приемником, тем больше вероятность того, что принесший эти компоненты поток в достаточной степени ламинарен и использование отрицательного анемотаксиса будет эффективной стратегией поиска.

Если феромон имеет несколько компонентов, в модели оценивается суммарный объем информации от совокупности различных молекул и изменение общего объема информации при изменении концентрации отдельных компонентов.

Модель реализована в среде **Borland Delphi 7.0** и позволяет оценить оптимальную мощность источника информации, рассчитать соотношение сигнал / шум в зависимости от степени турбулентности потока и расстояния от источника до приемника, найти оптимальное число компонентов феромона в зависимости от экологии вида, оценить предельную дистанцию, на которой возможен надежный прием сигнала.

Работа поддержана РФФИ (гранты №№ 07-04-96802 и 09-04-00412).

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫРУБКИ НА РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

Ольчев А.В.¹, Радлер К.²

¹Учреждение Российской Академии Наук Институт Проблем Экологии и Эволюции имени А. Н. Северцова РАН, Москва, Россия

aoltche@gmail.com

²Отдел Биоклиматологии, Институт Бюссена, Университет Георга-Августа, Геттинген, ФРГ

kradler1@gwdg.de

Аннотация: трехмерная модель Mixfor-3D была разработана и использована для оценки влияния вырубки на радиационный режим древостоя. Горизонтальное разрешение модели - 2 м × 2 м, вертикальное разрешение - 1 м, и разрешение по времени - 1 час. Модель была проверена по данным полевых измерений и показала хорошее согласование смоделированных и измеренных значений.

1. Введение

Трехмерные модели являются эффективным инструментом при изучении лесных экосистем, для разработки концепций рационального использования лесных ресурсов, увеличения их продуктивности, а также увеличения их устойчивости к ветровалам, заморозкам и вредителям. Они позволяют смоделировать продуктивность древостоев, микроклимат, тепловой и водный режим растительного покрова и почвы.

В рамках данного исследования трехмерная (3D) модель Mixfor-3D была использована для оценки влияния сплошной рубки на радиационный режим лесной экосистемы. Верификация модели была выполнена по данным микроклиматических измерений на небольшой вырубке (около 2.4 га) в ельнике, расположенном на Золлинговской возвышенности в Центральной Германии (51°46'N, 09°27'E, 300 м над уровнем моря) (рисунок).

2. Описание модели

Разработанная Mixfor-3D модель состоит из нескольких тесно взаимосвязанных блоков, описывающих 3D структуру древостоя, 3D перенос радиации, 3D турбулентный перенос тепла, H₂O и CO₂ в приземном слое воздуха, 3D перенос воды и тепла в почве. Горизонтальное разрешение модели - 2 м × 2 м, вертикальное разрешение - 1 м. Основной шаг по времени - 1 час.

Основной концепцией, использованной в модели, является совокупное описание физических и биологических процессов на различных пространственных уровнях экосистемы: отдельный лист, дерево, древостой. Для описания 3D структуры растительности Mixfor-3D использует данные о положении отдельных деревьев в древостое, их высоте, диаметре и высоте крепления кроны, диаметре ствола, вертикальном распределении фитомассы, глубине корневой системы. Алгоритм для описания солнечной радиации учитывает перенос прямой и рассеянной радиации в древостое, включая радиацию, проникающую в просветы древесного полога, радиацию отраженную и рассеянную листвой, ветвями и стволами деревьев. Для учета влияния рельефа на радиационный режим древостоя в Mixfor-3D смоделированные 3D карты распределения фитомассы растительности совмещаются с картой топографии.

3. Микроклиматические измерения

Микроклиматические исследования на вырубке в Золлинге проводились в 2005-06 годах с помощью 5 мобильных метеостанций. Одна метеостанция была расположена в центре вырубки, а другие 4 - на расстоянии 10-15 метров от NE, NW, SW и SE границ леса.

Дополнительная контрольная метеостанция располагалась внутри полого леса на расстоянии около 150 метров от вырубki. На каждой станции проводились измерения температуры и влажности воздуха, солнечной радиации, количества осадков, скорости и направления ветра на высоте 2 метров над поверхностью почвы. Кроме того, на станциях измерялась температура почвы на глубине 10 и 20 см. Измерения проводились синхронно с частотой 1 секунда и осреднялись за 5 минутные интервалы.

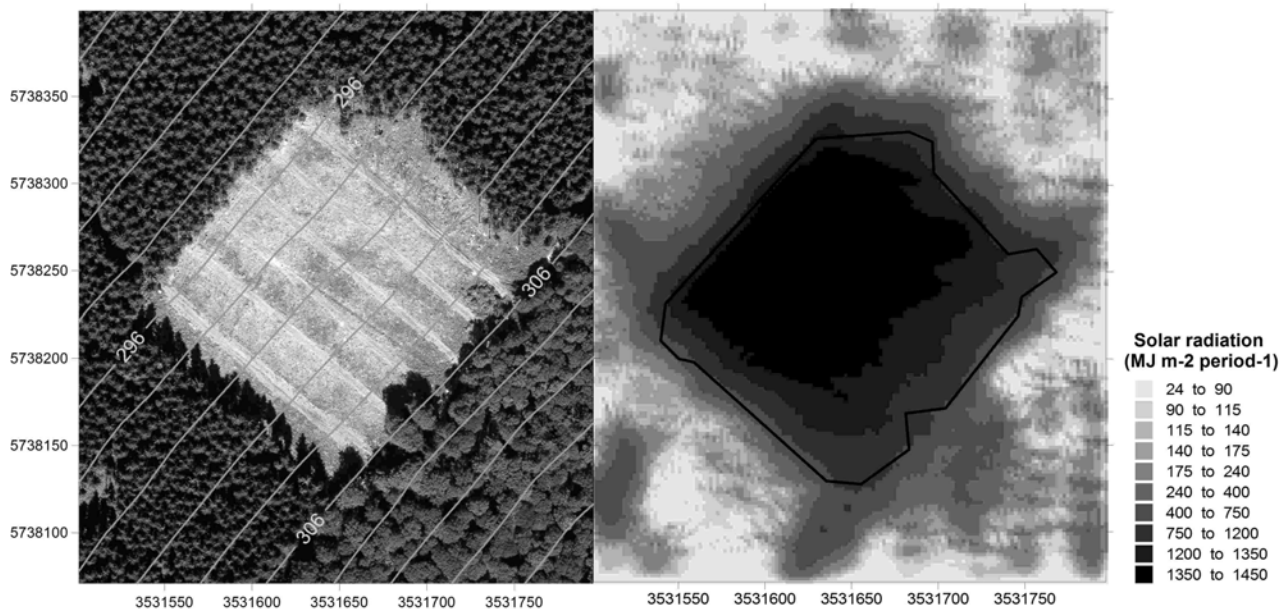


Рисунок. Аэрофотоснимок исследуемой вырубki и смоделированная суммарная солнечная радиация на поверхности почвы за период с 01 июня по 31 августа 2005 года.

4. Результаты

Результаты выполненных модельных и экспериментальных исследований показывают, что сплошная рубка оказывает значительное влияние на радиационный режим и микроклимат лесной экосистемы. Радиационный режим в пределах вырубki крайне неоднородный и отличается значительной изменчивостью. Максимальные значения радиации за исследуемый трехмесячный период были получены в центральной и северо-западной части вырубki и достигали 1300-1450 МДж м⁻². Приходящая радиация в южной и юго-восточной части вырубki была значительно меньше и изменялась в пределах от 800 до 1200 МДж м⁻². Значительное увеличение приходящей солнечной радиации на вырубке приводило к увеличению средних значений температур воздуха и почвы, а также к увеличению их суточной и сезонной амплитуды.

Сравнение результатов модельных расчетов солнечной радиации с результатами полевых наблюдений показало, что разработанная модель Mixfor-3D позволяет достаточно точно смоделировать динамику солнечной радиации как внутри вырубki, так и внутри окружающего вырубку древостоя. Коэффициент детерминации между смоделированными и измеренными значениями изменялся от 0.92 до 0.99 для 5 станций, расположенных на вырубке, и был около 0.79 для контрольной станции, расположенной под пологом леса.

Литература

Olchev A., Radler K., Sogachev A., Panferov O., Gravenhorst G. Application of a three-dimensional model for assessing effects of small clear-cuttings on radiation and soil temperature // Ecological Modelling. – 2009. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.02.004

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ АГРОСФЕРЫ РОССИИ: МЕТОДОЛОГИЯ, МОДЕЛИ, РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Павлова В.Н.

ГУ ВНИИСХМ, г. Обнинск, Россия
vnp2003@bk.ru

Аннотация: в связи с проблемой оценки глобальных изменений климата анализируются климатообусловленные тренды урожайности зерновых культур за период 1975-2006 гг., а также тренды показателей, характеризующие теплообеспеченность и влагообеспеченность зернопроизводящих регионов России. Показано, что элиминирование трендов урожайности разностными уравнениями регрессии позволяет значительно повысить точность и надежность оценок влияния изменений (колебаний) климата на продуктивность сельскохозяйственных культур. Предложенная методология позволила получить количественные оценки влияния наблюдаемых изменений климата на урожайность важнейших сельскохозяйственных культур на территории России.

Последние обобщения (Четвертый оценочный доклад, МГЭИК, 2007, Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ, 2008) свидетельствуют, что с 70-х годов XX-го века началась эпоха беспрецедентно быстрых антропогенных изменений климата. Для решения задачи оценки и прогноза последствий изменений климата на урожайность сельскохозяйственных культур предложена физически обоснованная система дифференциальных уравнений, реализованная в виде динамических моделей ПОГОДА – УРОЖАЙ (Сиротенко, 1981 и др.) моделирующих процессы формирования урожая. Однако, региональные и национальные системы мониторинга и прогнозирования урожайности на основе подобных систем являются достаточно дорогостоящим технологическим продуктом, что ограничивает их практическое использование. По этой причине получение простых агрегированных зависимостей приращения урожайности (ΔY) от приращения метеорологических факторов (ΔT , ΔP), пригодных для использования в системах мониторинга, является актуальной задачей:

$$\Delta Y = a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta P \quad (1)$$

Оценки, полученные согласно (1) (Lobell and Field, 2007), показывают, что по меньшей мере 29% междугодовой изменчивости урожайности шести важнейших мировых продовольственных культур могут быть объяснены изменениями выбранных предикторов - минимальной и максимальной температурой воздуха и суммой выпавших осадков, осредненных за вегетационный период.

Цель настоящего доклада – рассмотреть возможность применения методологии разностного подхода к построению функционалов ПОГОДА-УРОЖАЙ и оценить климатообусловленные тренды урожайности основных сельскохозяйственных культур для территории России.

Эффективность перехода от классических уравнений множественной регрессии к уравнениям, представленным в виде первых разностей, можно оценить по данным табл. 1. Так, для зерновых и зернобобовых культур переход к разностной форме уравнений повышает учитываемую долю дисперсию ряда урожайности (R^2) на 23.7%, для озимой пшеницы – на 11.5%. В табл. 2 и 3 представлены количественные оценки приращений продуктивности зерновых и пропашных культур, вызванные изменениями климата за последние три десятилетия. В основных зерновых регионах (в Поволжье и Южном ФО) климатообусловленный прирост урожайности составил 2.5% за 10 лет, т.е. за последние 30 лет только наблюдаемые изменения климатических условий (Сиротенко и др., 2007) привели к росту урожайности зерновых культур на 7-8%. Отметим, что на всей территории возделывания озимых культур, их реакция на происшедшие изменения климата

положительна и в Южном ФО достигает величины 11.5%. Климатобусловленная урожайность подсолнечника и сахарной свеклы также выросла за последние десятилетия (табл.3), но темпы ее роста ниже, чем для зерновых культур. Отметим достаточно высокие коэффициенты детерминации урожайности (R^2) для этих культур – от 24 до 56%. Полученные данные позволяют заключить, что наблюдаемые изменения климата в целом благоприятны для сельскохозяйственного производства России.

Таблица 1 – Оценки коэффициентов корреляции (R) уравнений множественной регрессии для расчета среднеобластной урожайности по температуре и осадкам за май и июнь

Область, край	Зерновые и зернобобовые в целом		Озимая пшеница		Яровой ячмень	
	I	II	I	II	I	II
Белгородская область	0.679	0.745	0.577	0.566	0.647	0.739
Воронежская область	0.736	0.828	0.632	0.732	0.710	0.837
Курская область	0.410	0.622	0.382	0.420	0.434	0.727
Липецкая область	0.455	0.735	0.519	0.659	0.420	0.627
Орловская область	0.372	0.691	0.442	0.647	0.423	0.768
Тамбовская область	0.549	0.783	0.494	0.786	0.555	0.741
Краснодарский край	0.629	0.768	0.625	0.727	0.758	0.652
Ставропольский край	0.856	0.855	0.871	0.843	0.842	0.850
Ростовская область	0.768	0.854	0.730	0.703	0.790	0.851
Волгоградская область	0.743	0.899	0.729	0.809	0.851	0.916
Среднее по региону	0.620	0.788	0.600	0.689	0.643	0.771

* I - классические уравнения регрессии, II – уравнения для первых разностей

Таблица 2 – Климатобусловленные приращения урожайности зерновых культур по федеральным округам России за период с 1975-2006 гг. (ц/га за 10 лет)

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	.30	.36	.44	2.82	3.24	3.23
Южный	.32	.43	.26	2.16	3.42	2.08
Центральный	-.02	.06	-.02	-.23	.57	-.12
Сибирский	.16	–	.19	1.65	–	1.94
Дальневосточный	-.21	–	-.08	-2.04	–	-2.63
Уральский	.15	.31	.23	-.03	1.48	.59

Таблица 3 – Климатобусловленные приращения урожайности для технических культур (ц/га за 10 лет) и коэффициенты детерминации R^2 за период 1990-2006 гг.

С/х культура	Центральный (север)	Центральный (юг)	Приволжский	Южный
	Изменение урожайности, ц/га за 10 лет			
Подсолнечник	1.32 ($R^2=0.56$)	0.29 ($R^2=0.29$)	0.30 ($R^2=0.24$)	0.24 ($R^2=0.34$)
Сахарная свекла	–	6.00 ($R^2=0.36$)	6.00 ($R^2=0.33$)	6.00 ($R^2=0.41$)

Литература

- Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем.– Л.: Гидрометеиздат, 1981.- 168 с.
- Сиротенко О.Д., Груза.Г.В., Ранькова Э.Я., Абашина Е.В., Павлова В. Н. Современные климатические изменения теплообеспеченности увлажненности агросферы на территории России / Метеорология и гидрология.– 2007 –№ 8.– С. 90-103.
- Lobell D.B, Field C.B. Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming.- Environ. Res. Lett, 2, 2007, pp. 1-7.

ФЕНОМЕН ГОРМЕЗИСА В ФИТОНЕМАТОЛОГИИ ИЛИ КРИТИКА «МОДЕЛЕЙ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ»

Перевертин К.А.

*Центр Паразитологии Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН,
Москва, РФ*

perevertink@mail.ru

Аннотация: модели известные за рубежом как «critical point models» описывают зависимость выхода урожая сельхозкультур от плотности популяции фитопаразитических нематод в почве. При этом принципиально не учитывается феномен гормезиса – явления стимуляции растений малыми инвазионными нагрузками. Однако учет данного феномена с предварительным вычислением порога толерантности (tolerance limit, T) статистическими методами позволяет повысить адекватность модели.

В нашем понимании «гормезис» - контринтуитивный эффект, когда минимальные нагрузки (концентрации) химических, физических или биологических факторов заведомо негативных (в норме) по отношению к организму имеют противоположный (позитивный) эффект для организма (популяции).

Термин гормезис (букв. «возбуждать», «толкать» (греч.)) был введен более века назад (Shulz, 1888), равно как и концепция химического гормезиса. Из отечественных исследователей, пожалуй, в первую очередь следует упомянуть А.Г. Гурвича (1944). А.Стеббингом (Stebbing, 1982) была даже предложена научная канонизация описываемого феномена, как закона Арнта-Шульца (Arndt-Shulz law). Впрочем, он, как и многие другие, признавал, что истоки научного осмысления феномена восходят к Парацельсу «Все есть яд и все есть лекарство. Важны только дозы», а может даже и к Гиппократу. К сожалению, в отличие от химии, медицины, радиобиологии и ряда других дисциплин, где характеристика типа «доза-эффект» обязательно учитывает феномен, в паразитологии термин «гормезис» не используется, а само явление, хотя и признается, но понимается, как нечто второстепенное, не заслуживающего специального исследования, тем более на количественном уровне. В монографии ведущих отечественных паразитологов В.А. Ройтмана и С.А. Беэра (2008) феномену посвящено около 1 страницы текста с названием рубрики «Критерий «пользы»». В фитонематологии ряд зарубежных работ (Swanson T.A., McElroy F.D., 1977; Slinger L.A., Bird G.W., 1978) были специально посвящены изучению стимулирующего влияния нематод на растение-хозяина, однако, без попыток обобщения результатов в рамках математической модели. Нами в докторской работе (1998) феномен гормезиса специально исследовался для нематод мелойдогин на огурцах и моркови и гетеродерид на сахарной свекле. Наилучшей моделью признана парабола.

В основе адекватного моделирования вредоносности нематод на сельхозкультурах лежат работы голландцев (Seinhorst J.W., 1965 и Oostenbrink M., 1966). Последним именно по аналогии с токсикологическими моделями была предложена «Log-linear model» и схематично (!) в качестве одного из теоретически возможных вариантов пунктиром обозначена линия, которую можно трактовать как гормезис. Однако более совершенная экспоненциальная модель Сейнхорста (в принципе не учитывающая гормезис) получила широкое распространение до наших дней и по признанию ведущего американского специалиста в области моделирования в нематологии Н. Ferris (1987, 1995) является классической. Ему же принадлежит определение таких однофакторных моделей, как «модели критической точки (МКТ)». В общем-то, мы имеем дело со статической характеристикой связывающей допосевную плотность популяции нематод в почве P , особой на единицу объема почвы с выходом урожая сельхозкультуры, Y , выраженной, как правило, в относительных величинах. Важнейшим параметром МКТ является «порог толерантности (tolerance limit)», T – плотность популяции нематод, выше которой имеют место потери

урожая. (в некоторых работах по химическому гормезису параметру T соответствует ZEP (zero equivalent point), E.J.Calabrese,L.Baldwin,1997)

В диапазоне средних инвазионных нагрузок зависимость Y от $\log P$ близка к линейной, а при очень высоких значениях P Y становится независимым от P и стабилизируется на уровне параметра m , который имеет биологический смысл минимального урожая. Общий вид модели Сейнхорста представлен в формуле (1):

$$Y = \begin{cases} 1; P \leq T; \\ m + (1-m)Z^{(P-T)}; P > T. \end{cases} \quad (1)$$

Параметр Z ($Z < 1$) определяется видом растений, видом нематод и условиями среды.

Алгоритм расчета параметров модели был предложен Феррисом с соавторами еще в 1986 году (организуется внешний цикл итераций приращения T , минимизируется выраженное в частных производных отношение суммы квадратов отклонений к Z , вычисляется оптимальное m по критерию наибольшего коэффициента детерминации). Но он оказался неудобен при построении моделей для высокоагрессивных популяций. При крутом виде характеристики m при расчете получает отрицательные значения или искусственно фиксируется равным 0, что плохо увязывается с его биологическим смыслом, при этом, кстати, «плывет» значение T . Нами (1987, 1998) предложен способ расчета, когда внешние итерации осуществляются не для T , а для m . При обнулении m логарифмирование обеих частей модели Сейнхорста позволяет представить ее как линейную регрессию с простым вычислением параметров. При этом гарантирована положительность m (мы сами задаем его изменения в цикле от 0 и выше), но для полого располагающихся данных не исключена отрицательность расчетного T , поэтому ранее нами (1997) рекомендовалось использовать оба метода одновременно. Подобного рода сложности привели к тому, что уже в 90-х сам Сейнхорст стал активно рекомендовать упрощенный вариант своей модели с фиксацией $Z=0,95$, что конечно делает модель менее «красивой», так как для всех пар «паразит-хозяин» агрессивность паразита условно представляется одинаковой, а качество аппроксимации достигается за счет многострадального T , который в данном случае обязательно будет занижен (К.А.Перевертин,2006). Таким образом, существующее положение с МКТ делает включение феномена гормезиса в модель весьма проблематичным. Формально просто было бы прямо записать полученное нами квадратичное уравнение вместо ($Y=1; P \leq T$), но очевидно, что значение T неадекватно моделируемой биологической системе. Важный параметр утратил биологический смысл и напрямую зависит от поведения системы на высоких инвазионных нагрузках.

Выход представляется нам в предварительном вычислении оценки T статистическими методами (используя НСР 0,05-0,09), как плотности инвазионной нагрузки выше которой статистически достоверно отличие потерь урожая от 0. Определенный таким образом «биологически достоверный» порог толерантности T становится основой для нормирования, т.е. все плотности (значения аргумента) выражаются в T . Такой прием позволяет получить биологически адекватную модель – экспоненту с асимптотой m (в полулогарифмических координатах выглядящую, как S-образная кривая) для плотностей выше T и параболу в диапазоне $[0;T]$ с экстремумом максимума, например, при $0,6T$.

Особо отметим, что моделирование феномена гормезиса проводится нами не на организменном, а на популяционном уровне.

Несмотря на различную природу процессов влияния минимальных инвазионных нагрузок в паразитологии и явлениями, например, химического гормезиса давно и подробно изучаемых можно говорить о сходстве явлений и рекомендовать апробированный нами аппарат моделирования для более широкого использования.

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КОРМОВЫХ РЕСУРСОВ МЕСТООБИТАНИЙ И ПЛОТНОСТИ ПАРНОКОПЫТНЫХ ЖИВОТНЫХ РОССИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Петросян В.Г., Назарова К.А., Нагорная Е.Г., Дергунова Н.Н., Бессонов С.А.

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия,
petrosyan@sevin.ru

Аннотация: представлен комплекс взаимосвязанных моделей, предназначенных для оценки кормовой емкости местообитаний лося в различных лесорастительных зонах России. Показано, что по модельным оценкам потенциальная плотность лося в различных природных зонах (хвойно-широколиственных лесов, таежной, лесостепной, степной зон, притундровых лесов и редкостойной тайги) изменяется в диапазонах 5.99 - 13.5, 3.44- 9.23, 2.43- 6.57, 0.01 —0.81 и 0.2–0.81 особей на 1000 га.

Введение. Роль природных кормовых угодий, как естественного ресурса для охотничье-промысловых видов парнокопытных животных в различных природных зонах России, остаётся незаменимой. Возрастающие масштабы антропогенного воздействия на лесные экосистемы требуют большего внимания к проблеме сохранения их продуктивности, так как природные кормовые угодья являются решающими для всех видов природных популяций. Среди различных антропогенных факторов, вызывающих нарушение почвенного и растительного покровов, ведущими факторами являются: вырубка древесной и кустарниковой растительности, нерегулируемое использование лесов в качестве объекта рекреации, загрязнение лесных почв и вод отходами автотранспорта, непомерное развитие дорожно - тропиной сети и др. В таких условиях дистанционное зондирование является безальтернативным и эффективным методом сбора оперативной информации и оценки кормовых ресурсов на обширной территории. Важность использования космических снимков для оценки растительных кормов в значительной степени также связана с труднодоступностью этих территорий.

Основная цель работы – разработка комплексной модели, предназначенной для оценки кормовой емкости местообитаний парнокопытных животных, степени её антропогенной трансформации и картографирования оптимальной плотности животных для различных природных зон (на примере лося).

Методика исследований. Разработанная комплексная модель оценки кормовых ресурсов местообитаний парнокопытных животных включает пять блоков. Первый блок включает интегрированную растрово-векторную базу данных - ландшафтных и природных зон, преобладающих групп древесных пород, векторных объектов гидро- и дорожной сети, климатических параметров, синтезированные космические снимки со спутника SPOT для всей территории России и показатели численности парнокопытных животных и хищников на основе данных многолетнего мониторинга (1981-2007 гг.). Второй блок включает набор моделей, предназначенных для классификации и выделения однородных местообитаний с использованием контролируемых и неконтролируемых методов классификации с использованием индексов NDVI, NDWI, DHI, IF (Coops, и др. 2009; Riitters, и др. 2002). Результаты второго блока служат исходными данными для следующего третьего блока, который на основе суперпозиции векторных карт позволяет определить однородные полигоны (в терминах ArcGis). Для каждого полигона используются следующие характеристики: доминирующие породы с параметрами древостоя, подроста и подлеска, площади открытых участков, список возможных биоконкурентов, высота снежного покрова в зимний период, густота гидро- и дорожной сети. Четвертый блок: на основе комплексного анализа данных каждого полигона, дифференцировано для каждого вида парнокопытных с учетом доступного корма, объема суточного потребления, наличия предпочитаемых видов растений и биоконкурентов, и ряда других параметров (см. блок 3) определяется возможная плотность для полигона. Пятый блок позволяет выделить однородные группы

местообитаний с близкими значениями плотности животных с использованием метода последовательного кластерного анализа.

Анализ результатов. Оценка адекватности модели проводилась на примере лося (Петросян и др., 2007). Разработанная интегрированная база данных с применением первых трех блоков позволила выделить более 4000 полигонов, которые использовались в дальнейшем для оценки кормовой емкости местообитания лося. Модельная оценка кормовой фитопродуктивности лесных насаждений и потенциальной плотности лося в России показывает, что животные распределены неравномерно. В России выделяются шесть однородных групп (рисунок).



Рисунок. Модельная оценка кормовой фитопродуктивности лесных фитоценозов и оптимальной плотности лося в России (условные обозначения для плотности 1-6 лося представлены ниже в тексте).

Оценки показывают, что наиболее высокая плотность животных достигается в зоне хвойно-широколиственных лесов: 5.99–6.77 и 11.99–13.5 особей на 1000 га при пороговом значении повреждаемости 10% и 20%, соответственно (6, рис. 1). В таежной зоне России выделяются две однородные группы на (5 и 4, рис. 1), для которых искомая плотность изменяется в диапазоне 4.48–5.68 и 8.97–11.37 (5) и 3.44–4.31 и 7.12–9.23(4) особей на 1000 га для 10 и 20% повреждаемости, соответственно. В лесостепной зоне (3, рис.1) плотность составляет 2.43–3.28 и 4.87–6.57 особей на 1000 га для 10 и 20%, соответственно. В степной зоне, также выделяются две однородные группы (1 и 2, рис.1), для которых плотность составляет 0.01 – 0.04 и 0.05–0.88 и 0.2–0.57 и 0.6–0.81 особей на 1000 га, соответственно. В зоне притундровых лесов и редкостойной тайги искомые показатели составляют 0.2–0.57 и 0.6–0.81 особей на 1000га (2, рис.1). Плотность населения животных в целом уменьшается с запада на восток и с севера на юг России.

Литература

- Coops N.C., Wulder M. A., Iwanicka D. An environmental domain classification of Canada using earth observation data for biodiversity assessment. // *Ecological Informatics* -V.4, Issue 1.- 2009.- P. 8-22.
- Riitters K.H., Wickham J.D., Neill V. O, Jones K. B., Smith E.R., Coulston J.W., Wade T. G., Smith J.H. // *Fragmentation of Continental United States Forests* // *Ecosystems* (2002) 5: 815–822.
- Петросян В.Г., Дергунова Н.Н., Бессонов С.А., Назарова К.А. Оценка качества среды обитания, кормовой емкости и оптимальной плотности копытных животных России на основе наземных и дистанционных данных. В. кн. “Организмы, популяции, экосистемы: проблемы и пути сохранения биоразнообразия” Вологда, ООО Центр оперативной печати “Коперник”.- 2008.- С. 227-233.

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ И ПОЛОВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛОСЯ (*ALCES ALCES L.*) В РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И ДАННЫХ МНОГОЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА

Петросян В.Г., Назарова К.А., Бессонов С.А., Дергунова Н.Н., Нагорная Е.Г.

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия,
petrosyan@sevin.ru

Аннотация: представлены результаты сравнительного анализа динамики численности, половозрастной структуры и плотности лося в России (1961–2006 гг.) и Финляндии (1975–2006 гг.). Показано, что современные низкие показатели численности лося в России в значительной степени связаны с влиянием естественных (увеличение численности хищников – волка) и антропогенных (браконьерство) факторов.

Введение. За последние 20 лет наблюдается значительное снижение численности лося как в отдельных регионах, так и в целом по России. Численность этого вида в России составляет 565 тысяч особей по данным учета 2006 г. В скандинавских странах на меньшей в 11 раз территории обитает 550-600 тысяч лосей (Данилкин, 2007). Ежегодная добыча вида в Феноскандии (Финляндия, Норвегия, Швеция) и России составляет 200-250 тыс. и 12-15 тыс. соответственно (Петросян и др., 2007). Известно, что официальные данные по численности и добыче лося в странах Феноскандии, в частности в Финляндии, вполне надежные: случаев браконьерства в Финляндии практически нет, охотники, объединенные в общины, предоставляют объективные данные (Нюгрен и др., 2007). С 1970 г. за состоянием популяции в Финляндии (особенно за плотностью и структурой населения) ведется постоянное наблюдение. Это обстоятельство позволяет утверждать, что модельное исследование финской популяции лося в сравнении с российской позволит выявить некоторые общие факторы, оказывающие влияния на динамику численности лося в России. *Цель работы* – создание имитационной модели для выявления факторов, определяющих современную динамику численности и половозрастную структуру лося в России. В работе также подразумевается решение практической задачи – проведение сравнительного анализа динамики численности и параметров половозрастной структуры лося в России и Финляндии для определения оптимальных параметров рациональной эксплуатации ресурсов лося в России.

Методика исследований. Разработана имитационная модель, которая предназначена для анализа динамики численности животных с учетом функциональных факторов, влияющих на текущее состояние и динамику численности популяции. В модели рассматривается 18 возрастных групп особей двух полов. Каждая возрастная группа отличается от предыдущей группы на 1 год. Переменные, характеризующие численность лосей в каждой из этих групп, формируют вектор состояния системы (популяции) - $X(t) = (X_{1,1}(t), X_{1,2}(t), X_{2,1}(t), X_{2,2}(t), \dots, X_{18,1}(t), X_{18,2}(t))$, который в любой момент времени $t+1$ определяется по данным момента времени t с помощью рекуррентных соотношений, где $X_{i,1}(t)$ и $X_{i,2}(t)$ – численность самцов и самок соответственно в i -й возрастной группе ($1 \leq i \leq 18$) в момент времени t . В начальный момент времени моделирования ($t=0$) половозрастная структура определяется на основе литературных данных. В модели предусмотрены возможности выбора параметров половозрастной структуры популяции в момент времени $t=0$ по усмотрению пользователя (или на основе данных учетов при их наличии). Далее определяется численность особей в последующий момент времени $t+1$. Рекуррентные соотношения записаны с учетом следующих параметров: репродуктивный статус особей в зависимости от возраста; параметры, указывающие доли стельных самок в популяции; количество эмбрионов на самку в зависимости от возраста; коэффициенты, характеризующие жизнеспособность особей в зависимости от их возраста; параметры лицензионного отстрела с учетом половой и возрастной структуры; влияние хищников

(волка, медведя и др.) дифференцированно для различных возрастных групп; параметры, учитывающие неофициальный отстрел животных и естественную смертность и др.

Численные эксперименты проводились на основе многолетних данных мониторинга (1981 – 2007 гг.) животных, проводимых сотрудниками Центрохозконтроля России. Данные учета численности Финской популяции лося брались из литературных источников (Нюгрэн и др., 2007).

Анализ результатов и обсуждение. Один из важных этапов использования разработанной модели – верификация параметров модели и проверка адекватности полученных результатов. Полученные случайные реализации сравнивались с данными мониторинга на основе метода наименьших квадратов (МНК), т. е. подбирались такие параметры модели, которые приводили к динамике численности лося, близкой к данным мониторинга. После анализа 3 млн. случайных генераций и оценки параметров адекватности была выбрана модельная реализация с точностью 90-92%. Модельные оценки показывают, что доля новорожденных особей меняется в диапазоне от 24 до 34 % при среднем значении 27,8 %, сеголеток – 10-18 % при среднем 12,42%, численность половозрелых особей в возрасте до 12 лет – от 30-56,6 % при среднем значении 52,4%.

Результаты численных экспериментов показывают, что одна из важных причин низкой численности лосей в России – незначительный годовой прирост животных. Для понимания роли этого показателя в динамике численности лося мы использовали имитационную модель для оценки динамики численности лося в Финляндии на основе данных мониторинга в 1975-2005 гг. Оценки показали, что воспроизводство телят в финской популяции лося в 1975–2005 гг. изменялось в диапазоне 44 – 58 %. Годичный прирост составлял около 60 телят на 100 взрослых особей. Причем, в 1981–2005 гг. финны изымали 56-75 % поголовья предыдущей осенней послепромысловой численности (42–74 тысяч особей) за исключением периода 1994–1997гг. В эти годы они изымали 22–32 тысяч особей. Одна из важных особенностей управления популяцией лося в Финляндии состоит в высоком уровне добычи сеголеток в каждый год изучаемого периода, после которой численность восстанавливалась в течение одного сезона. В этот период доля сеголеток составляла 39 - 54 %. Данные мониторинга показывают, что стабильный рост численности лося достигался в период увеличения доли сеголеток в добыче при общем ее объеме, не превышающем уровень воспроизводства вида. Такой высокий уровень добычи сеголеток практикуется также в Швеции и Норвегии. Из проведенного сравнительного анализа следует, что, по-видимому, охотники и браконьеры в России ежегодно отстреливают преимущественно взрослых особей, при этом не только снижают репродуктивный потенциал вида, но и создают благоприятные условия для давления хищников на сеголеток - сирот. Кроме этого, в Финляндии охотники отстреливают преимущественно самцов, сохраняя соотношение полов 1.6:1 (т. е. 1.6 коров на одного быка) при плотности животных не ниже 1-2 особей на 1000 га. Для российской популяции лося аналогичные параметры значительно ниже и составляют 0.4 - 0.6 особей на 1000 га. Хотя проведенный анализ динамики численности и половозрастной структуры лося в России и Финляндии позволяет сделать предварительный вывод относительно некоторых факторов, оказывающих влияние на сокращение численности диких копытных животных в России, тем не менее, потребуется дополнительный сравнительный анализ обеспеченности животных доступными кормовыми ресурсами в двух странах.

Литература

- Данилкин А.А. К проблеме цикличности в динамике численности диких копытных животных. // Вестник охотоведения.- 2007.- Т. 4. № 1.- С. 89-99.
- Нюгрэн Т., Песонен М., Тьюккюлайнен Р., Вален М., Руусила И. Причины высокой продуктивности лося в Финляндии. // Вестник охотоведения.- 2007.- Т. 4. № 2.- С. 148-160.
- Петросян В.Г. Бессонов С.А., Назаренко Е.А., Пачин Ю.В., Назарова К.А. Комплексная модель оценки кормовой фитопродуктивности лесных фитоценозов, оптимальной плотности и динамики численности копытных животных. В кн. Заповедники России и устойчивое развитие.- Великие Луки, ЦЛГПЗ.- 2007.- с. 87-99.

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ДРЕВОСТОЯ: СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ КОНКУРЕНЦИИ

Пиллюк А.Г.¹, Грабарник П.Я.²

¹*Астраханский государственный университет, Астрахань, Россия*
pilyuknot@rambler.ru

²*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*
pgrabarnik@rambler.ru

Аннотация: в работе анализируется пространственная структура древостоя в зависимости от моды конкуренции. Показано, что асимметричная конкуренция приводит к более регулируемым структурам, чем взаимодействия, построенные на симметричном влиянии.

Изучение пространственной структуры древесного яруса растительных сообществ является важной частью изучения всего комплекса разнообразных взаимодействий элементов лесной экосистемы. Значимость пространственных взаимоотношений между деревьями обусловлена той ролью, которую они играют в процессе развития и функционирования древостоя. Математические методы, которые используются для того чтобы ответить, например, на такие вопросы: как характеризовать пространственную структуру, как учесть конкурентные взаимоотношения соседних деревьев в формировании специфического паттерна размещения деревьев, в настоящее время достаточно развиты. Многие из этих методов пришли из чисто математических дисциплин: стохастической геометрии, теории случайных точечных процессов, математической морфологии, и сформировали основу методов пространственной статистики. Специфика методов пространственной статистики состоит в том, что, в отличие от классических методов (многомерной) статистики, данные, например, карты размещения деревьев, не могут рассматриваться как реализации независимых случайных величин и, следовательно, хорошо изученные методы здесь не работают. Поэтому для анализа пространственной структуры растительных сообществ привлекаются современные, основанные на использовании компьютеров, методы.

В данной работе анализ пространственной структуры древостоя проводился в связи с задачей различения двух типов конкуренции между растениями: симметричной и асимметричной. Вопрос, который является важным в понимании конкурентных взаимоотношений между растениями и имеет большое теоретическое значение, состоит в том, чтобы понять какие характеристики растительного сообщества могут быть чувствительны к моде конкуренции. Некоторые модели, построенные для того, чтобы ответить на этот вопрос (Bauer et al., 2004), показали, что среди интегральных характеристик сообщества, например, распределения деревьев по диаметру, нет показателя, с помощью которого можно различать тип конкуренции. Задача настоящей работы состояла в том, чтобы изучить тип пространственной структуры как отклик на тот или иной характер взаимодействия между растениями.

В первой части работы решалась задача построения пространственно-временной модели растительного сообщества. Чтобы быть достаточно реалистичной, модель сообщества состояла из взаимодействующих пространственно распределенных дискретных элементов – деревьев, рост которых подчинялся простому логистическому закону. Конкуренция между растениями вводилась как локальное взаимодействие, влияющее на скорость роста растения. От того, как перераспределялся ограниченный ресурс, зависела мода конкуренции, то есть растения могли угнетать друг друга симметрично или асимметрично. Важно, что даже для такой простой системы удалось подобрать параметры таким образом, что поведение модели довольно точно воспроизводило экспериментальные данные хода изреживания выбранного типа древостоя.

Во второй части работы анализировались пространственные структуры, возникающие при разных типах конкуренции. Для этого использовались так называемые меры второго порядка, функция Рипли и парная корреляционная функция, которые являются непараметрическими характеристиками пространственной структуры (Stoyan and Penttinen, 2000). В работе были прослежены несколько временных срезов, и для каждого из них наблюдалось отличие пространственных структур в зависимости от типа конкуренции. Важный факт, найденный в процессе моделирования, который является новым в литературе, состоит в том, что асимметричное распределение влечет более регуляризованные паттерны размещения деревьев.

Литература

- Bauer S., Wyszomirski T., Berger U., Hildenbrandt H., Grimm V. Asymmetric competition as a natural outcome of neighbourhood interactions among plants: results from the field-of-neighbourhood modelling approach // *Plant Ecol.*- 2004.- V. 170.- P.135–145.
- Stoyan, D., Penttinen, A., 2000. Recent applications of point process methods in forestry statistics // *Statistical Science.*- 2000.- V. 15.- P. 61–78.

ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНАЯ (N-P-Z-D) МОДЕЛЬ ПЛАНКТОННОЙ ПИЩЕВОЙ ЦЕПИ

Подгорный К.А.

ИБВВ им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок, Россия
kap@ibiw.yaroslavl.ru

Аннотация: рассматривается четырехкомпонентная N-P-Z-D-модель планктонной пищевой цепи, в которой используется нелинейная зависимость при описании процесса минерализации детрита, а также учтено отрицательное влияние метаболитов фитопланктона на развитие зоопланктона.

Рассматривается пространственно однородная модель планктонной пищевой цепи, описывающая временную динамику концентраций биогенных элементов (N), фитопланктона (P), зоопланктона (Z) и планктонного детрита (D). Модель представляет собой систему четырех обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -\frac{N}{e+N} \frac{aP}{b+cP} + \beta\lambda \frac{P}{\mu+P} Z + \gamma qZ + \varphi D^\delta + k(N_0 - N), \\ \frac{dP}{dt} = \frac{N}{e+N} \frac{aP}{b+cP} - rP - \lambda \frac{P}{\mu+P} Z - (s+k)P, \\ \frac{dZ}{dt} = \alpha\lambda \frac{P}{\mu+P} Z - qZ - \theta PZ, \\ \frac{dD}{dt} = rP + (1-\alpha-\beta)\lambda \frac{P}{\mu+P} Z - \varphi D^\delta - (\psi+k)D, \end{cases} \quad (1)$$

где a/b - максимальная скорость роста фитопланктона; b - коэффициент поглощения света водой; c - коэффициент самозатенения фитопланктона; e , μ - константы полунасыщения; r - скорость дыхания фитопланктона; λ - максимальная скорость роста зоопланктона; q - коэффициент выедания зоопланктона организмами высших трофических уровней; k - скорость поступления биогенных элементов; N_0 - концентрация биогенных элементов, поступающих в систему (если рассматривается верхний квазиоднородный слой океана, то N_0 - это концентрация биогенов ниже слоя перемешивания); 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 m^3 . Параметры модели неотрицательны, причем $\alpha + \beta \leq 1$, $\gamma \leq 1$ и $r + s + k < a/b$. Последнее условие означает, что фитопланктон не вымирает полностью при очень низкой концентрации биогенных элементов.

В отличие от модели (Edwards, 2001) в данной модели выедание зоопланктона описывается не квадратичной, а более простой линейной зависимостью вида qZ . Для описания выедания фитопланктона зоопланктоном используется функция Холлинга II-го типа $\lambda P/(\mu + P)$ вместо функции Холлинга III-го типа $\lambda P^2/(\mu^2 + P^2)$. Важным отличием данной модели является использование нелинейной зависимости φD^δ при описании процесса минерализации детрита. Детрит представляет собой не индивидуальное соединение, а смесь различных по своей природе групп веществ, которые имеют разную реакционную способность по отношению к распаду. Поэтому суммарная скорость процесса, описывающая распад всех компонентов, зависит от их соотношения в смеси, а порядок ферментативной реакции может изменяться в достаточно широких пределах (Долгоносоев, Губернаторова, 2005). Еще одной отличительной особенностью данной модели является

включение в нее слагаемого $(-\theta PZ)$, которое позволяет учитывать отрицательное влияние метаболитов фитопланктона на развитие зоопланктона.

Цель работы состояла в численном исследовании динамического поведения модели в зависимости от изменения порядка ферментативной реакции, описывающей разложение детрита, а также скорости выделения метаболитов клетками фитопланктона.

Для системы уравнений (1) возможны следующие стационарные состояния: $E_0 = (N_0, 0, 0, 0)$, $E_1 = (N_1, P_1, 0, D_1)$, $E_2 = (N_2, P_2, Z_2, D_2)$. Если $aN_0 < \chi b(e + N_0)$, где $\chi = r + s + k$, то стационарное состояние $E_0 = (N_0, 0, 0, 0)$ - устойчивый узел, в противном случае - неустойчивая особая точка типа седло. Для обеспечения устойчивости состояния $E_1 = (N_1, P_1, 0, D_1)$ необходимо одновременное выполнение двух неравенств:

$$\frac{abN_1}{(e + N_1)(b + cP_1)^2} < \chi \text{ и } \alpha\lambda \frac{P_1}{\mu + P_1} < q + \theta P_1. \text{ Устойчивость особой точки } E_2 = (N_2, P_2, Z_2, D_2)$$

определяется следующими условиями: $J_{12} < 0$, $J_{22} < 0$, $J_{32} > 0$, $a_3(a_1a_2 - a_3) - a_4a_1^2 > 0$, где

$$a_1 = -(J_{11} + J_{22} + J_{44}), \quad a_2 = J_{11}(J_{22} + J_{44}) - J_{12}J_{21} + J_{22}J_{44} - J_{23}J_{32},$$

$$a_3 = J_{32}(J_{11}J_{23} + J_{23}J_{44} - J_{13}J_{21}) - J_{11}J_{22}J_{44} + J_{21}(J_{12}J_{44} - J_{14}J_{42}),$$

$$a_4 = J_{32}(J_{13}J_{21}J_{44} - J_{11}J_{23}J_{44} - J_{14}J_{21}J_{43}), \text{ а } J_{ij} - \text{элементы матрицы Якоби для системы (1).}$$

Численные эксперименты с моделью (1) проводились методом Рунге-Кутты-4 при следующих значениях параметров: $e = 0,03 \text{ гС/м}^3$; $a = 0,2 \text{ (м сут)}^{-1}$; $b = 0,2 \text{ м}^{-1}$; $c = 0,4 \text{ м}^2/\text{гС}$; $r = 0,15 \text{ сут}^{-1}$; $\beta = 0,33$; $\lambda = 0,6 \text{ сут}^{-1}$; $\mu = 0,035 \text{ гС/м}^3$; $\gamma = 0,5$; $q = 0,1 \text{ сут}^{-1}$; $k = 0,05 \text{ сут}^{-1}$; $N_0 = 0,6 \text{ гС/м}^3$; $s = 0,04 \text{ сут}^{-1}$; $\alpha = 0,25$; $\theta = 0,0..0,15 \text{ м}^3/(\text{гС сут})$; $\varphi = 0,1 \text{ сут}^{-1}$; $\delta = 0,5..1,2$; $\psi = 0,08 \text{ сут}^{-1}$. Ниже приведены результаты четырех вариантов вычислений.

Вариант 1. $\delta = 0,5$. $\theta > 0,128$ - узел; $\theta \in [0,122; 0,128]$ - устойчивый фокус; $\theta \in [0,1143; 0,122)$ - предельный цикл; $\theta \in [0,1128; 0,1143)$ - бифуркация удвоения периода, появление двухобходного предельного цикла; $\theta \in [0,1126; 0,1128)$ - серия бифуркаций удвоения периода; $\theta \in [0,11185; 0,1126)$ - хаотические колебания; $\theta \in [0,082; 0,11185)$ - возврат к периодическому режиму, но с более сложной, чем прежде, структурой колебаний. При этом возрастают как амплитуда, так и период колебаний; $\theta \in [0,0; 0,082)$ - предельный цикл.

Вариант 2. $\delta = 0,8$. $\theta > 0,095$ - узел; $\theta \in [0,081; 0,095]$ - устойчивый фокус; $\theta \in [0,063; 0,081)$ - предельный цикл; $\theta \in [0,0589; 0,063)$ - бифуркация удвоения периода, появление двухобходного предельного цикла; $\theta \in [0,0578; 0,0589)$ - серия бифуркаций удвоения периода; $\theta \in [0,042; 0,0578)$ - хаотические колебания; $\theta \in [0,0; 0,042)$ - возврат к периодическому режиму, но с более сложной структурой колебаний, возрастанием амплитуды и периода.

Вариант 3. $\delta = 1,0$. $\theta > 0,075$ - узел; $\theta \in [0,0486; 0,075]$ - устойчивый фокус; $\theta \in [0,021; 0,0486)$ предельный цикл; $\theta \in [0,016; 0,021)$ - бифуркация удвоения периода, появление двухобходного предельного цикла; $\theta \in [0,0145; 0,016)$ - серия бифуркаций удвоения периода; $\theta \in [0,0; 0,0145)$ - хаотические колебания.

Вариант 4. $\delta = 1,2$. $\theta > 0,05$ - узел; $\theta \in [0,0185; 0,05]$ - устойчивый фокус; $\theta \in [0,0; 0,0185)$ предельный цикл.

Во всех четырех вариантах при значениях $\theta \geq 0,145$ происходит вымирание зоопланктона и переход системы из состояния $E_2 = (N_2, P_2, Z_2, D_2)$ в $E_1 = (N_1, P_1, 0, D_1)$.

Литература

- Долгонос Б.М., Губернаторова Т.Н. Нелинейная модель трансформации примесей в водной среде // Водные ресурсы, - 2005, - т. 32, №3. - С. 322-336.
 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.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭКОСИСТЕМЫ НЕВСКОЙ ГУБЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

Подгорный К.А.

ИБВВ им. И.Д. Папанова РАН, пос. Борок, Россия
kap@ibiw.yaroslavl.ru

Аннотация: рассматривается общее описание структуры имитационной модели Невской губы.

Объект исследования. Невская губа Финского залива – сложная водная экосистема, причем сложная и для проведения полевых экологических исследований, и для разработки математических моделей. Своеобразие Невской губы обусловлено целым рядом причин: (I) на формирование ее водной массы значительное влияние оказывает Ладожское озеро, воды которого со стоком р. Невы поступают в Невскую губу в объеме $\sim 2400-2500 \text{ м}^3/\text{с}$; (II) кратность годового водообмена за счет притока речных вод равна 66, что обеспечивает обновление воды в ней в среднем за 5-6 суток, а в центральной транзитной зоне почти вдвое быстрее; (III) Невская губа – мелководный водоем с преобладающими глубинами 3 - 5 м, интенсивным ветровым перемешиванием водных масс, разнообразными внутриводоемными процессами биогидрохимической трансформации; (IV) велико влияние Балтийского моря, которое сказывается на изменении солености и температуры воды, изменениях уровня воды и структуры биологических сообществ; (V) Невская губа - район с высоким уровнем техногенной нагрузки на окружающую среду; (VI) на экосистему Невской губы оказывает влияние строящийся комплекс водозащитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений. Вследствие совместного действия перечисленных факторов Невской губе свойственна чрезвычайно высокая пространственно-временная изменчивость качества воды. К настоящему времени за более чем столетний период наблюдений накоплен огромный фактический материал данных наблюдений за состоянием экосистемы Невской губы. Имеется определенный опыт разработки математических моделей различного типа и назначения, создания интегрированной системы поддержки принятия решений при управлении водными ресурсами г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Цели работы состояли в том, чтобы: (I) на основе всестороннего системного анализа данных наблюдений и сведений, опубликованных в литературных источниках, разработать имитационную, пространственно-неоднородную модель экосистемы Невской губы; (II) путем численных экспериментов исследовать наиболее важные закономерности трансформации и круговорота соединений азота, фосфора и динамики растворенного в воде кислорода, количественно оценить процессы, определяющие продукционный потенциал Невской губы.

Задачи исследования. В процессе работы над моделью необходимо было решить следующие основные задачи: (I) обобщить имеющуюся информацию о состоянии экосистемы Невской губы и современных тенденциях ее изменения, обеспечить модель входными гидрометеорологическими, гидрохимическими и гидробиологическими данными, провести анализ данных наблюдений с использованием метода главных компонент; (II) выполнить обзор литературы по моделированию пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов; (III) провести анализ численных методов решения задач для параболических уравнений второго порядка с несамосопряженными операторами - задач конвекции – диффузии - реакции; (IV) выполнить анализ методов математического моделирования гидродинамического и термического режимов нестратифицированных водоемов; (V) рассмотреть основные особенности трофической структуры пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов, пути трансформации и рециклинга важнейших биогенных элементов, существующие методы моделирования их пространственно-временной динамики; (VI) проанализировать существующие методы параметрической

идентификации имитационных моделей; (VII) выделить основные функциональные блоки модели, разработать их структуру, обеспечить согласование блоков между собой и с данными наблюдений; (VIII) провести проверку адекватности модели путем сравнения данных моделирования и наблюдений.

Общее описание модели и применяемых численных методов. В имитационной модели экосистемы Невской губы были выделены, разработаны и программно реализованы следующие основные ее блоки: (I) гидродинамический - для расчета нестационарной, осредненной по вертикали структуры течений в водоемах; (II) гидротермодинамический - для расчета фотопериода, составляющих теплового баланса и температурного режима водоема; (III) гидрооптический - для расчета оптических характеристик водной толщи; (IV) блок для описания процессов трансформации соединений азота и фосфора в водоеме и динамики растворенного в воде кислорода³; (V) блок для расчета времени оборота и потоков вещества между выделенными (агрегированными) модельными компонентами экосистемы; (VI) блок для выполнения процедуры оценивания параметров имитационной модели. Все вычисления по модели проводятся только на основе стандартной метеорологической, гидрологической, гидрохимической и гидробиологической информации. В блоке (IV) имитационной модели рассматриваются 17 переменных состояния: концентрации растворенных фракций органического азота и фосфора, неорганического фосфора, аммонийного, нитритного, нитратного азота, азота и фосфора в составе детрита, концентрация растворенного в воде кислорода, биомассы гидробионтов (гетеротрофных бактерий, фитопланктона, простейших и зоопланктона) в единицах азота и фосфора. Задача моделирования динамики пространственно-неоднородной водной экосистемы решается в два основных этапа. Сначала на заданном шаге по времени τ проводится численное интегрирование системы уравнений термогидродинамики. В результате моделирования гидрологического комплекса определяются значения средних по глубине составляющих скорости течения, потоков коротковолновой солнечной радиации, величины фотопериода и средней по вертикали температуры воды. Затем на том же временном интервале интегрируется система уравнений турбулентной диффузии и трансформации веществ. Решение этой задачи позволяет найти значения концентраций биотических компонентов экосистемы к концу заданного шага по времени. Построение вычислительных алгоритмов основано на применении различных вариантов схем расщепления уравнений по физическим процессам и пространственным координатам. Все алгоритмы и схемы численного интегрирования систем уравнений, методика расчета тепловых потоков на поверхности водоема при различных условиях стратификации приземного слоя воздуха, варианты расчета потока тепла на дне водоема, алгоритм процедуры оценивания параметров имитационной модели подробно рассмотрены в работах (Подгорный, 2000; 2003). Вычисления проводились на равномерной прямоугольной сетке размером 500×500 м. Временной шаг при численном интегрировании разностных уравнений для обеспечения устойчивости вычислений был выбран равным 30 секундам. Вычисления полей течений, температуры и биотических компонентов экосистемы начинались от момента очищения Невской губы ото льда и продолжались до 31 октября. Изменение гидрометеорологической ситуации над водоемом происходило каждые сутки модельного времени.

Основные результаты. Результаты моделирования позволяют говорить о достаточно хорошем качественном и количественном соответствии модельных оценок и имеющихся данных наблюдений. В частности, с помощью модели подтверждено, что: (I) азот и фосфор не могут быть лимитирующими факторами, сдерживающими увеличение биопродуктивности водоема; (II) вклад первичной продукции фитопланктона в общее поступление органического вещества невелик; (III) причиной интенсивного развития

³ При разработке этого блока модели большая помощь была оказана ведущим научным сотрудником Института океанологии РАН, д.х.н. А.В. Леоновым, которому автор приносит свою огромную благодарность.

гетеротрофных процессов в рассматриваемой акватории являются величины аллохтонного органического вещества.

Литература

- Подгорный К.А. Расчет параметров термогидродинамического взаимодействия, характеристик теплового баланса и температуры воды в нестратифицированных водоемах.- Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2000.- 100с.
- Подгорный К.А. Математическое моделирование пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов (алгоритмы и численные методы).– Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский Дом печати», 2003.– 328 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МИГРАЦИИ ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ЭКОСИСТЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ АТМОСФЕРНЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ

Припутина И.В., Аверкиева И.Ю.

Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

v_35_6@rambler.ru

Аннотация: Рассмотрены принципы построения равновесных биогеохимических моделей миграции вещества в экосистемах. Обозначен круг практических экологических задач, решение которых возможно на основе их использования. Приведен пример оценки устойчивости наземных экосистем к воздействию техногенных соединений азота на основе вероятностных методов расчета параметров масс-баланса азота и сопряженных макроэлементов.

1. Введение

В последние годы заметно активное использование методов математического моделирования при решении практических задач биогеохимии и геохимической экологии, связанных с необходимостью охраны окружающей среды в условиях высоких техногенных нагрузок загрязняющих веществ (ЗВ) на природно-территориальные комплексы. К числу таких задач относится количественное определение критических (максимально допустимых) уровней техногенного поступления поллютантов в природные экосистемы, при которых сохраняются их видовая структура и долговременное устойчивое функционирование, что имеет важное значение для планирования и эколого-экономического обоснования хозяйственной деятельности в масштабах отдельных производственных объектов или на региональном уровне.

2. Подходы и методы

Как правило, оценки допустимых уровней нагрузок техногенных веществ на окружающую среду основаны на использовании равновесных или динамических эффект-ориентированных биогеохимических моделей (Башкин и др., 2002; UBA, 2004; Posch et al., 2005). Понятие «эффект-ориентированные» в данном случае означает, что расчеты выполняются в отношении возможных негативных эффектов воздействия поллютантов на биоту (например, подкисление, эвтрофирование и др.), которые зависят от установленных эмпирическим путем критических концентраций ЗВ в природных средах и определяются в модели как индикаторные критерии. *Равновесные биогеохимические модели* характеризуют ситуацию так называемого геохимического равновесия, которое возможно между различными компонентами экосистем при относительно стабильных внешних условиях. Математическим выражением этих моделей является уравнение масс-баланса элементов, считая, что поступление поллютанта в экосистему количественно не должно превышать совокупного действия процессов его нейтрализации, иммобилизации в нетоксичной форме и удаления из экосистемы. В свою очередь, входные параметры базового уравнения масс-баланса оцениваются на основе количественных зависимостей, определяющих специфику формирования и интенсивность конкретных биогеохимических потоков элементов в различных экосистемах.

Поскольку природные биогеоценозы характеризуются вариабильностью большинства показателей во времени и в пространстве, то для расчетов в подобных моделях могут использоваться детерминированные (основанные на средних показателях) или вероятностные значения входных параметров. *Проведение вероятностных оценок масс-баланса элементов* возможно, например, на основе метода Монте-Карло, когда рассчитывается случайная выборка большого числа возможных значений, что позволяет получить численный массив показателей, характеризующих естественный диапазон

«колебания» потенциала устойчивости экосистем к внешним воздействиям. Анализ распределения полученных вероятных значений позволяет обосновать интенсивность техногенных нагрузок в зависимости от природоохранных приоритетов и/или экономической целесообразности использования территорий и их природных ресурсов. Вероятностные методы представляются наиболее актуальными при выполнении региональных оценок для территорий, характеризующихся ландшафтным разнообразием, но ограниченными данными натурных наблюдений.

3. Пример использования модели

Рассмотренные подходы были апробированы на примере территории Республики Коми. Целью исследований была оценка устойчивости экосистем к атмосферному поступлению техногенных соединений азота в связи с планируемым повышением уровней эмиссии NO_x в результате увеличения объемов транспортировки газа с месторождений Крайнего Севера потребителям в центральной России и европейских странах. Расчеты выполнены для экосистем 50-километровой зоны вдоль трассы газопровода на участке Воркута – Сыктывкар, включая тундровые, лесотундровые, северо-таежные и таежные биоценозы. Проведены оценки в отношении 2-х групп потенциальных экологических эффектов – эвтрофирования и подкисления – с использованием соответствующих уравнений масс-баланса. Для лесных экосистем учитывался характер лесопользования (категории лесов, преобладающие породы, схемы рубок и др.). Сценарий землепользования для травянистых и кустарниково-травянистых биоценозов включал их использование в качестве пастбищных угодий с соответствующей структурой кормовых видов.

База данных для проведения расчетов была сформирована в виде ГИС-проекта в программной среде ArcView с детальностью пространственного разрешения «экосистем» 1x1 км. Атрибутивная таблица ГИС-проекта содержала пространственно-распределенную информацию качественного и количественного характера по 16 позициям. Для входных параметров уравнений масс-баланса и сопряженных уравнений, описывающих интенсивность формирования основных миграционных потоков вещества в экосистемах, по литературным данным и данным исследований на ключевых участках (Бобкова, 1990; Леса..., 1999; и др.) определены диапазоны возможных значений и включены в расчеты, используя метод Монте-Карло. Для каждой экосистемы и соответствующего экологического эффекта было выполнено по 1000 модельных прогонов. Сравнительная проверка показала, что такое число прогонов модели при всей случайности выборки обеспечивает высокую повторяемость результатов для всех типов экосистем. Результаты выполненных модельных оценок позволили ранжировать экосистемы в зоне воздействия по степени их устойчивости к атмосферным выпадениям азота, что может быть использовано при прогнозе экологических рисков в связи с интенсификацией техногенного воздействия в данном регионе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, грант №07-05-00492.

Литература

- Башкин В.Н., Какзак А.С., Снакин В.В., Припутина И.В. и др. Устойчивость экосистем к эмиссиям магистральных газопроводов. – Смоленск: Универсум, 2002. – 232 с.
- Бобкова К.С. Экологические основы продуктивности хвойных лесов европейского северо-востока. Дисс. Докт.биол.наук. Сыктывкар. 1990.
- Леса Республики Коми. Под ред. Г.М.Козубова, А.И.Таскаева. М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 1999. 332 с.
- Posch M., Slootveg L., Hetteling J-P. European critical loads and dynamic modeling. CCE Status Report 2005. <http://www.mnp.nl/en/themasites/cce/publications/cce-status-report-2005/index.html>
- UBA, 2004: Mapping Manual for modelling and mapping of critical loads and their input data. 2004. <http://www.icpmapping.org>

ОДНОМЕРНАЯ ВЕРТИКАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЭКОСИСТЕМЫ МЕРОМИКТИЧЕСКОГО СОЛЕНОГО ОЗЕРА ШИРА (РОССИЯ, ХАКАСИЯ)

Прокопкин И.Г., Дегерменджи А.Г.

Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
prokop@ibp.ru

Аннотация: представлена вертикальная модель экосистемы меромиктического соленого озера Ширы, описывающая динамику основных биохимических компонент оксигенной и аноксигенной зон водной толщи в течение летнего сезона. Результаты имитационных расчетов показывают соответствие натурным данным, что говорит об адекватности модельного описания экосистемы и о возможности использования модели для прогноза состояния водоема и проверки различных гипотез.

Соленое озеро Ширы расположено в Республике Хакасия (Россия) и имеет географические координаты: 54°29' С.Ш. и 90°14' В.Д. Характерные размеры водоема - 9.35 × 5.3 км. Максимальная глубина озера - около 25 м. Площадь поверхности водоема равна 36 км².

Озеро Ширы является меромиктическим водоемом. Сероводородная зона в летний период начинается с глубины 11-13 м. В течение сезона для озера характерно наличие стратификации основных физико-химических компонент. Фитопланктон формирует преимущественно глубинные максимумы биомассы. Пелагиаль озера характеризуется небольшим видовым разнообразием зоопланктона. В озере отсутствует хищный зоопланктон, в литорали водоема в последние годы наблюдается ихтиофауна.

Водоем является популярным местом отдыха жителей центральной и южной Сибири. Озеро Ширы обладает ценными бальнеологическими свойствами. На территории озера расположен известный курорт.

В рамках комплексного изучения водоема разработана одномерная имитационная модель, описывающая вертикальное распределение основных физико-химических и биологических компонент в пелагиали озера. В течение летнего сезона моделируется динамика основных видов фитопланктона (зеленые водоросли *Dictyosphaerium tetrachotomum* и цианобактерии *Lyngbya contorta*), доминирующего вида зоопланктона *Arctodiptomus salinus*, амфипод *Gammarus lacustris*. Микроорганизмы, участвующие в цикле серы, представлены сульфатредуцирующими и пурпурными серными бактериями. Прочими биохимическими переменными, рассматриваемыми в модели, являются: кислород, сероводород, минеральный фосфор, аммонийный и нитратный азот, детрит.

Для биохимических компонент в модели описываются процессы роста, смертности, дыхания, потребления, выделения, разложения, окисления и т.д. Вертикальные распределения всех переменных размываются под действием турбулентной диффузии. Для фитопланктона и детрита также задается оседание.

Вертикальные распределения биохимических моделируемых переменных рассчитывается с помощью дифференциальных уравнений, имеющих следующий вид (Degermendzhy et al., 2002):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + wg \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F,$$

где C - моделируемая переменная, $wg \frac{\partial C}{\partial z}$ - процесс оседания или всплытия, wg - скорость оседания или всплытия, $\frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$ - процесс диффузии, K_z - коэффициент турбулентной диффузии, F - функция, описывающая биохимические взаимодействия с другими компонентами.

Модель описывает динамику вертикальных распределений переменных между двумя сезонными перемешиваниями водной толщи озера – весенним и осенним. Расчет начинается с 15 мая (характерная дата схода льда и открытия воды) и заканчивается 31 августа. Внешними параметрами и факторами в модели являются температура и влажность воздуха, облачность, скорость и направление ветра над поверхностью озера, интенсивность солнечного излучения на поверхности водоема.

На рисунке в качестве примера представлены расчеты вертикального распределения биомасс и концентраций некоторых моделируемых переменных. Сравнение модельных расчетов с натурными данными показывает их хорошее качественное и количественное совпадение, что говорит об адекватности модельного описания экосистемы и открывает возможность использовать модель как инструмент прогноза состояния водоема и исследования различных гипотез, касающихся функционирования озера.

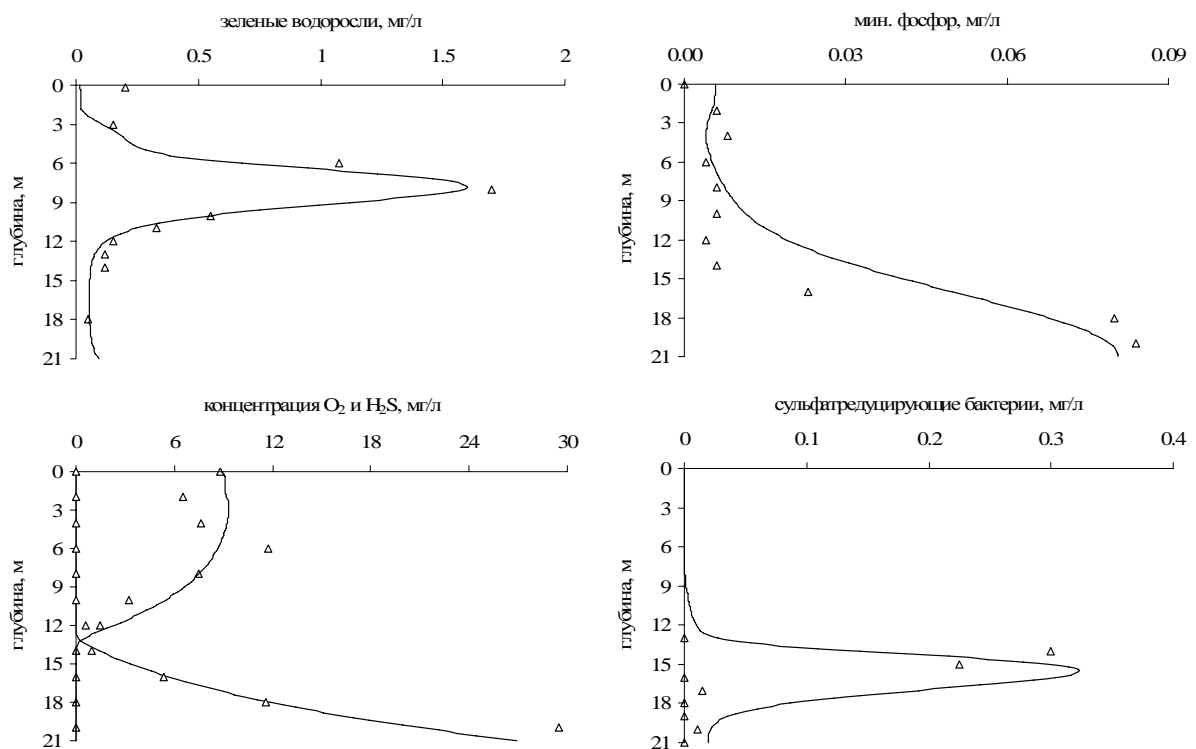


Рисунок.. Вертикальное распределение биомассы зеленых водорослей, концентрации минерального фосфора, кислорода и сероводорода и биомассы сульфатредуцирующих бактерий в середине июля расчетного года. Линии – модельные расчеты; треугольники – натурные данные

Благодарности

Работа поддержана совместным российско-голландским грантом РФФИ-NWO № 05-05-89002-НВО_a и Интеграционным проектом СО РАН № 95.

Литература

Degermendzhy A.G., Belolipetsky V.M., Zotina T.A., Gulati R.D. Formation of the vertical heterogeneity in the Lake Shira ecosystem: the biological mechanisms and mathematical model // Aquatic Ecology, 2002. 36(2). P. 271-297.

ТЕРМОДИНАМИКА ЖИВОГО ВЕЩЕСТВА

Пузаченко Ю.Г.

Институт проблем экологии и эволюции Москва, Россия

puzak@orc.ru

Аннотация: живое вещество - неравновесная термодинамическая система стационарная в области далекой от равновесия. Энтропия есть биологическое разнообразие. Феноменологический закон – гиперболический рост энтропии в эволюционных масштабах времени. Рост энтропии сопровождается уменьшением затрат энергии на бит информации.

В соответствие с Вернадским определим живое вещество как систему N элементов (единицы наследственности, организмы, совокупность организмов на единицу поверхности Земли – для разных уровней организации) в пространстве L внешних сил (ресурсы, условия среды) на различных уровнях организации, в общем случае максимизирующую стационарность в области далекой от термодинамического равновесия (Puzachenko, 2008). Биологическое разнообразие определяется через классы однородности, выделяемые в пространстве состояний собственных переменных или свойств как энтропия Больцмана-Гиббса-Шеннона-Винера. Ранговые распределения выводятся с использованием экстремального принципа по Левичу для линейных и нелинейных форм отношения элементов. Естественные предположения, связывающие вероятность «выживания» класса разнообразия с числом его элементов позволяет построить стационарные неравновесные ранговые распределения. Простые преобразования ранговых распределений порождают широко известные зависимости «число видов - объем выборки», «число видов – площадь». Отличие реального рангового распределения от равновесного оценивается по энтропии Кульбака. Параметры рангового распределения, соответствуют свободной энергии и температуре. Величина энтропии Кульбака определяет величину эксергии. В целом, чем больше ресурсов и более благоприятны условия среды, тем больше биологическое разнообразие. При прочих равных условиях продуктивность (свободная энергия) тем выше, чем лучше выражено доминирование и ниже температура. Если система задана так, что взаимодействия между элементами не велико, то ее эволюция полностью соответствует второму началу термодинамики. Энтропия и температура во времени увеличиваются.

В соответствие с определением живое вещество максимизирует устойчивость. Ю.М. Свиричев и Д.О. Логофет показали, что продолжительность жизни популяции (τ) в логистической модели со случайным варьированием среды равен:

$$\tau \cong \exp\left(\frac{rK^2}{3\varepsilon^2}\right), \text{ где } r - \text{коэффициент размножения, } K - \text{емкость среды (пропускная}$$

способность канала связи), $K=r/\beta$, β -коэффициент самоингибирования, потери на конкуренцию ε - среднеквадратическое варьирование среды. Таким образом, существует две стратегии экстенсивной максимизации устойчивости: увеличение емкости (пропускной способности) среды за счет снижения самоингибирования и понижения отрицательного влияния варьирования среды за счет развития различных механизмов регулирования. Первая форма описывается простой моделью пропускной способности канала связи К. Шеннона.

$S=w\log(1+P/wN_0)$, где S - разнообразие, w - полоса частот, N_0 - шум на единицу полосы частот.

Если ассоциировать ширину полосы частот (длина слова) с уровнем специализации, то получаем естественное соотношение: специализация снижает шум, то есть повышает устойчивость на уровне элемента. Рост во времени специализации соответствует снижению коэффициента самоингибирования и повышению устойчивости элементов. Если повышение устойчивости есть целевая функция, то в процессе эволюции классы элементов системы должна специализироваться, в результате чего при неизменной мощности среды будет расти число классов, но снижаться число элементов в каждом при увеличении общей пропускной

способности все системы. Внешнее поведение системы по росту энтропии соответствует второму началу термодинамики, но в области равновесия система может иметь максимум свободной энергии. Эволюция живого вещества в экологическом и коротком эволюционном масштабе времени при наличии сильных отрицательных и/или положительных связей не подчиняется равновесной термодинамической модели и определяется параметрами порядка, определяющими устойчивые состояния в областях далеких от равновесия при относительно невысоком разнообразии и/или низких температурах.

Второй интенсивный путь повышения устойчивости определяется законом необходимого разнообразия Эшби, определяющим необходимость роста во времени пропускной способности регулятора. В геологических масштабах времени живое вещество демонстрирует гипергеометрический рост биологического разнообразия (NF- число семейств).

$NF = \exp(0.030053T \times 1.03847^T)$, где T – время (единица -100 млн. лет), $R^2 = 95,4\%$

И уменьшением собственного времени эволюции:

$\log DT = 8.61685 - 0.000185 T \log T$ при $R^2 = 0.643$, где DT – интервал геохронологического цикла, T – ньютонское время.

При этом, чем моложе таксон, тем быстрее синтез его разнообразия. Этот рост можно объяснить только увеличением размерности пространства условий среды и ресурсов, определяемое инновационными формами организмов. Увеличение во времени разнообразия увеличивает объем памяти и через увеличение комбинаторики в «системе разнообразие памяти-разнообразие среды» увеличивает скорость производства энтропии. Отец и сын Зотины на обширном материале показали, что в рассматриваемых масштабах времени в ходе эволюции удельный основной обмен увеличивается. Рост разнообразия или сложности структуры и параллельный рост удельного метаболизма позволяет полагать, что увеличиваются затраты энергии на поддержание растущей структурной сложности. Соответственно, рост устойчивости в области далекой от равновесия сопровождается ростом затрат энергии. Логично полагать что система устойчива если затраты энергии на бит информации во времени снижаются ($dE/dS < 0$ при $dS > 0$, $dE > 0$). В ходе эволюционного процесса в любом таксоне и на любом уровне организации реализуются осцилляции, каждая из которых включает в себя эволюционный цикл, предложенный Холлингом: r-K-Ω-α.: r – рост энтропии и пропускной способности, K- минимум производства энтропии, специализация, перегрев системы, Ω- кризис, уменьшение энтропии и организации, хаос, α - гибель или устойчивое термодинамическое равновесие при минимум свободной энергии и производстве энтропии, или рост энтропии и пропускной способности на основе увеличения через инновации размерности пространства внешних сил. Описанное документируемое поведение живого вещества позволяют постулировать как его временной инвариант: увеличение во времени размерности пространства внешних сил на основе инноваций и циклический рост энтропии при минимизации затрат энергии на поддержание бита структурной сложности. Есть основания полагать, что трактовка живого вещества с общих термодинамических позиций создает основу для рассмотрения его в рамках единой модели. Скорее всего, термодинамика живого вещества потребует некоторых изменений общей теории. Так например, особой задачей является рассмотрение действия внешних сил в линейном и логарифмическом пространствах. Возможно, оправдается предположение Вернадского о Эвклидовом пространстве биосферы, состоящем из ячеек пространства Римана. Исследования реального состояния живого вещества на разных уровнях его организации и в разных масштабах неизбежно даст необходимую основу для эмпирических и теоретических обобщений.

Литература

Puzachenko J. Abiotic and Biotic Diversity in the Biosphere. In Sven Erik Jørgensen and Brian D. Fath (Editor-in-Chief), Global Ecology. Vol. [1] of Encyclopedia of Ecology, 2008 5 vols,- pp. [1-4] Oxford: Elsevier.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПОПУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Пузаченко Ю.Г.

Институт проблем экологии и эволюции Москва, Россия

puzak@orc.ru

Аннотация: рассмотрены возможности анализа временных рядов численности популяций с применением стандартных моделей. Объекты: тигр – Сихоте-Алинь, волк – Айрлоянд, США, лось – там же и Окский заповедник, речной бобр - Центрально лесной заповедник.

К настоящему времени многие исследователи располагают временными рядами состояния популяций, длина которых допускает количественный анализ. Так как модель динамики численности априори не очевидно логично проверять соответствие ряда логистической модели до четвертой степени с непрерывным и дискретным временем и с запаздыванием. В настоящем сообщении демонстрируются оценки параметров популяции амурского тигра в Сихоте-Алинском заповеднике, речного бобра в Центрально-Лесном заповеднике, лося и волка на острове Айл-Ролянд (Великие озера, США), лося в Окском заповеднике.

Амурский тигр (Смирнов, Микуэлл, 1999). Длина ряда 28 лет. Взрослые тигры, Коэффициент размножения $r = 0.126801$, Начальная численность - 2.6 особей, Емкость среды $K = 12.8$ особей.

В целом для популяции $r = 0.207$, Емкость среды = 25.6 особей. В целом на фоне логистического роста популяции существуют флуктуации с периодом 4-6 и 14 лет. Первые флуктуации связаны со сменой поколений и отрицательным взаимодействием между котятками пометов соседних лет, а длительный цикл, является следствием модели с запаздыванием с соответствующим периодом колебания примерно в 14 лет.

Волк на Айрлоянде (Peterson 2007). Длина ряда: 1959-2004 г. Модель с дискретным временем: $N_{t+1} = (1 + 2.11572)N_t - (0.227355N_t - 0.0077701N_t^2 + 0.0000845N_t^3)N_t$, N – численность. $R^2 = 67\%$. Коэффициент размножения -2,11. Природу динамики численности хорошо объясняет изменение значений коэффициента самоингибирования: до численности в 20 особей он растет по параболической форме. Эта численность соответствует первой точке равновесия. Затем самоингибирование несколько снижается до точки с численностью 30 особей (вторая критическая точка равновесия), а затем быстро растет. Численность в 20 особей – устойчивое равновесие, численность 30 особей – точка бифуркации, между устойчивым и неустойчивым равновесием с численностью 42-43 особи. Выход из точки неустойчивого равновесия грозит гибелью популяции. В истории конкретной популяции численность упала до 5 особей. Показано, что в ходе динамики численности изменяется социальное поведение.

Лось на Айрлоянде. В соответствие с логистической моделью с дискретным временем коэффициент размножения 0,37 при $R^2 = 68,8\%$. Дискретная модель четвертой степени.

$N_{t+1} = (1 + 1.709851)N_t - (2.29364N_t - 0.962579N_t^2 + 0.12591N_t^3)N_t$ описывает динамику на 80.67%. Область устойчивого равновесия лежит в интервале 1.75-2.25 особей на кв. км. Неустойчивое равновесие соответствует численности 3.75. Колебания определяются изменением коэффициента самоингибирования. Для обоих видов резкий рост численности определяет снижением коэффициента самоингибирования, что можно трактовать как привыкание к жизни в переуплотненной популяции. Как у волка, так и у лося в условиях неустойчивого равновесия развиваются эпизоотии, приводящие к резкому снижению численности до уровня существенно ниже устойчивого равновесия.

Лось в Окском заповеднике. (Росоловский и др., 1988). Ряд с 1944 по 2004 год. Коэффициент размножения практически такой же как на Айрлоянде (0,31-0,58) при равновесной численности 1,28 особей на кв. км. Форма модели с запаздыванием та же, но

коэффициент детерминации всего 22%. Точка равновесия только одна и амплитуда колебания численности существенно ниже. По-видимому, здесь сказывает промысловое регулирование численности, реализуемое в район заповедника.

Речной бобр в Центральном-Лесном заповеднике. В соответствии с логистической моделью емкость среды $K=195$ особей, при начальной численности $N_0=0.011$. Последнее не имеет смысла. Имеет место скачкообразное изменение численности с $r=0.22659$ с переходом от средней с 1936 по 1971 от 27 особей к 195 особей с 1981 году по текущее время. Скачек статистически значимо соответствует повышению температуры в марте и уменьшению осадков в апреле.

Волк и лось на Айрролянде. Отношение хищника и жертвы. В модели без самоингибирования приращение численности лоса практически не зависит от численности волка, а приращение численность волка, определяется численностью лоса всего 9.8%. В модели с самоингибированием для лоса $R^2=17.628\%$, для волка 21.250%.

Равновесная численность для лоса 6787 особей на остров для лоса и волка и всего 26,93 особей для волка. Период собственных колебаний 46.6 лет. Модель хищник - жертва быстро расходится, так как мощность регулятора численности лоса – волка ничтожны. Ведущая роль социальных отношений и эпизоотий не позволяет волку реализовать функцию регулятора численности лоса.

Приведенные примеры показывают пути применения стандартных моделей динамики численности популяций для оценки параметров варьирования, и формулировки гипотез о возможных механизмах колебания численности. Формулировка гипотез способствует организации исследования механизмов, определяющих динамику популяций. Модели с дискретным временем обладают прогностическими возможностями с лагом 1-2 года и могут использоваться для оперативной оценки возможного урожая и средней емкости среды. Особый интерес представляет выделение автохтонных и аллохтонных колебаний численности. Анализ, осуществляемый в рамках рассматриваемого подхода, показывает, что колебания климатических переменных в подавляющем большинстве случаев прямо не влияют на динамику популяции. Если они и действуют, то как параметры бифуркации и их относительно малые изменения создают условия для перехода популяции на иной уровень равновесия.

Литература

- Росоловский С.В., Т.В. Попова, С.Г. Приклонский, К.В. Зыков, Ю.Г. Пузаченко. Статистический анализ структуры и динамики популяции лоса в Окском заповеднике. Популяционные исследования животных в заповедниках.- М.: Наука, 1988.- С.40-62.
- Смирнов Е.Н., Микуэлл Д.Д. Динамика популяции амурского тигра в Сихоте-Алинском заповеднике (Россия) // Верхом на тигре, или в поисках гармонии.- М.: Книжный дом «Университет»,1999.- С. 53-62.
- Peterson R. O. The Wolves of Isle Royale. National Geographic, Audubon, and National Wildlife, Michigan Technological University, 2007.- 192 pgs.

ПРЯМОЙ МЕТОД ЛЯПУНОВА В ТЕОРИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ПАРНЫМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯМИ

Пых Ю.А.

*Центр междисциплинарных исследований по проблемам окружающей среды РАН
Санкт-Петербург, Россия
inenco@mail.neva.ru*

Основы динамической теории биологических сообществ были заложены в работах В. Вольтерра (Вольтерра, 1976) и А. Лотки (Lotka, 1925). Обе эти работы появились в результате решения задач, возникших при изучении изменений численности конкретных популяций. Возрастающая потребность в рациональном использовании природных ресурсов и запросы теоретической экологии определили и дальнейшее интенсивное развитие математических методов анализа экосистем. В результате за прошедшие более чем семь десятилетий динамическая теория популяций и сообществ оформилась в самостоятельную науку со своими, пока еще, правда, достаточно разрозненными, методами исследования.

Естественность возникновения такой теории определяется в первую очередь тем, что рассматриваемые в ней проблемы обладают рядом существенных общих свойств. Для всех популяций характерны такие процессы, как рождение и гибель особей, их расселение, хищничество, конкуренция, паразитизм, распространение заболеваний, реакция на изменение климатических условий и изменения, вызванные воздействием различных антропогенных факторов. Эти процессы характеризуются общими математическими свойствами: нелинейными зависимостями, пороговыми величинами, эффектами запаздывания, большим числом переменных со сложными взаимодействиями.

Из приведенного перечисления ясно, что исследование динамики экосистем не может опираться на какую-либо одну модель, сколь бы сложной она ни была. Речь должна идти о построении совокупности моделей, каждая из которых описывает одну или несколько из сторон рассматриваемого явления.

Основным вопросом, который возникает при исследовании перечисленных моделей, является вопрос об устойчивости их равновесных состояний и об оценке соответствующих областей притяжения. Повышенный интерес к этой проблеме обусловлен причинами как чисто теоретического характера (теория микроэволюции), так и запросами практики, связанными с эксплуатацией природных ресурсов и защитой окружающей среды.

Следует подчеркнуть необходимость применения прямого метода Ляпунова для исследования устойчивости в задачах популяционной динамики. Дело в том, что возмущения, действующие на биологические сообщества, в подавляющем большинстве ситуаций нельзя считать малыми, и в результате на первый план выдвигается задача либо определения области притяжения, либо нахождения соответствующих оценок этой области (Молчанов, 1976, Holling, 1974). Основным методом решения таких задач, как подчеркивал В. В. Немыцкий (1962), является метод функций Ляпунова.

Особое значение придавал прямому методу Ляпунова Н.Г. Четаев. В сформулированном им в 30-х годах постулате устойчивости (Четаев, 1936) он подчеркивал, что "устойчивость - явление принципиально общее, как-то должна проявляться в основных законах природы". Позднее (Четаев, 1936), возвращаясь к этой мысли, он писал: "Какой вид должен иметь закон, постулирующий независимо от отдельно действующих сил известного рода устойчивость? Согласно теореме Ляпунова об устойчивости интересующий нас закон должен оговаривать существование некоторой функции V со свойствами функции Ляпунова".

В докладе представлена теория экологических систем с нелинейными парными взаимодействиями. Как хорошо известно, модели систем с линейными парными взаимодействиями появились впервые в начале прошлого века в уже указанных работах Вольтерра, Лотки и Фишера при исследовании ряда задач математической экологии и

генетики. Автором было предложено обобщение систем Лотки-Вольтерра и систем репликаторных уравнений Фишера, учитывающее нелинейность парных взаимодействий (Пых, 2001, 2003). В последнее время также стало ясно, что эти обобщенные системы возникают в задачах теории игр, нейронных сетей, математической экономики и т.д. Построенная теория основана на предложенных двух типах энергетических функций Ляпунова, позволяющих провести исследование фазового пространства рассматриваемых систем «в целом».

Особо следует подчеркнуть полученные недавно результаты по формированию различных энтропийных характеристик на основе метода функций Ляпунова. Этот подход позволил получить все известные энтропийные характеристики (включая энтропии Реньи и Тсаллиса) для систем с нелинейными парными взаимодействиями, что в свою очередь дало возможность развить термодинамическую теорию для этого класса систем (Пых, 2005). Эти результаты приобретают особое значение в связи с тем, что недавно была установлена эквивалентность систем Лотки-Вольтерра и квази-полиномиальных систем дифференциальных уравнений, имеющих очень широкий спектр приложений в различных областях естествознания.

Литература

- Lotka A. Elements of physical biology / Baltimore: Williams and Wilkins, 1925.
- Holling C.S. Resilience and stability as shown by models of ecological systems/ In: Mathematical problem in biology/ Springer-Verlag.- 1974.- pp. 93-95.
- Pykh, Yu.A. Lyapunov functions for Lotka-Volterra systems: an overview and problems // *Proc. of 5th IFAC Symposium "Nonlinear Control Systems"*.- 2001.- pp. 1655-1660.
- Pykh, Yu. A. Energy Lyapunov Function for Generalized Replicator Equations // *Proc. of International Conference "Physics and Control"*.- 2001.- pp. 271-276.
- Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование.- М.: Наука, 1976.
- Молчанов А.М. Об устойчивости экосистем / В кн.: Всесторонний анализ окружающей природной среды/- Л.: Гидрометеоиздат, 1976.- С. 212-229.
- Немыцкий В.В. О проблеме качественного исследования в целом методами функций Ляпунова // *Вестн. МГУ, сер. матем. и мех.*- 1962.- Вып.6.- С. 26-28.
- Пых Ю.А. Построение энтропийных характеристик на основе репликаторных уравнений с несимметричными матрицами взаимодействий / *ДАН*, - 2005.- Т.404,- №6.- С. 745-748.
- Четаев Н.Г. Об устойчивых траекториях динамики // *Сб. научн. трудов Казанского авиац. ин-та*.- 1936.- №5.- С. 3-18.
- Четаев Н.Г. Устойчивость и классические законы // *Сб. научн. трудов Казанского авиац. ин-та*.- 1936.- №6.- С. 3-5.

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ АДАПТОМЕТРИЯ. МОДЕЛИ И ПРИЛОЖЕНИЯ К БИОЛОГИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ

Разжевайкин В.Н., Шпитонков М.И.

ВЦ РАН, Москва, Россия
razzh@mail.ru

Аннотация: излагаются подходы к математическому моделированию механизмов, лежащих в основе широко используемых в биологии и медицине методов корреляционной адаптометрии. Построение базируется на конструкциях, лежащих в основе описания структурированных биологических систем. Приводятся примеры использования методов корреляционной адаптометрии к оценке воздействия факторов среды на биологические популяции.

В последнее время исследователи, работающие с медико-биологической информацией, обнаружили эффект изменения уровня корреляций между физиологическими параметрами организмов при возникновении внешнего воздействия на популяцию (Карманова и др., 1996).

Подход к оценке этого воздействия был назван методом корреляционной адаптометрии. В (Разжевайкин, Шпитонков, 2008) на основе методов эволюционной оптимальности была построена и обоснована диффузионная модель корреляционной адаптометрии для произвольной n -мерной области параметров популяции.

Рассматривается абстрактная популяция, особи которой отличаются друг от друга значениями некоторых индивидуальных параметров. Считается, что число этих параметров конечно, они непрерывны и ограничены, так что каждый их набор может быть описан некоторым элементом $x \in \Omega \subset R^n$. При этом ограниченная область Ω (область гомеостаза) считается фиксированной, что соответствует малости рассматриваемых характерных времен по сравнению с временами эволюционных изменений.

Далее считается, что индивидуальные изменения параметров могут быть описаны непрерывным диффузионным марковским процессом. Предполагается также, что соответствующие уравнения Колмогорова-Фоккера-Планка имеют постоянные коэффициенты, так что для средней плотности распределения численности популяции $u(x,t)$ выполнено

$$\partial_t u = -(\nabla, \mathbf{b}u) + a\Delta u. \quad (1)$$

Здесь $a > 0$ – коэффициент диффузии, $\mathbf{b} = -be_n$, вектор сноса, моделирующий внешнее воздействие на популяцию, $x = (x_1, \dots, x_n) \in \Omega \subset R^n$, $t \in R_+$, $\nabla = (\partial_{x_1}, \dots, \partial_{x_n})$, $\partial_{x_i} = \partial / \partial x_i$, $\Delta = (\nabla, \nabla)$ – оператор Лапласа по x , (\cdot, \cdot) – скалярное произведение в R^n , e_n – единичный вектор в направлении x_n .

Для граничных условий непроницаемости:

$$(bu - a\nabla u, \mathbf{v})|_{\partial\Omega} = 0,$$

где \mathbf{v} – вектор внешней нормали к $\partial\Omega$, существует единственное (с точностью до умножения на константу) стационарное решение уравнения 1 вида:

$$u(x) = v(x_n) = v_0 e^{\frac{bx_n}{a}}. \quad (2)$$

Математической моделью измеряемых в задачах корреляционной адаптометрии величин являются наборы линейных функций

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i x_i, \quad \psi = \sum_{i=1}^n \psi_i x_i$$

с ненулевым набором компонент, а моделью определяющих свойства адаптации статистических характеристик (вес корреляционного графа и т. п.) – их коэффициенты корреляции по распределению (уравнение 2):

$$K(\varphi, \psi) = \frac{M[(\varphi - M\varphi)(\psi - M\psi)]}{(M[(\varphi - M\varphi)^2]M[(\psi - M\psi)^2])^{1/2}}, \text{ где } M\varphi(x_1, \dots, x_n) = \frac{\int_{\Omega} \varphi(x)u(x)dx}{\int_{\Omega} u(x)dx} - \text{среднее значение}$$

функции $\varphi(x)$ по распределению $u(x)$ в области Ω .

В грубом случае граница области $\partial\Omega$ может быть представлена в виде $\partial\Omega = \{x: x_n = \sum_{i=1}^{n-1} a_i x_i^2 + o(x^2)\}$, где все $a_i > 0, i=1, \dots, n-1$. Положим $\bar{\varphi} = (\frac{\varphi_1}{\sqrt{a_1}}, \dots, \frac{\varphi_{n-1}}{\sqrt{a_{n-1}}}, 0)$.

Основой теории корреляционной адаптометрии является следующее утверждение (Разжевайкин, Шпитонков, 2008).

Для $\bar{\varphi} \neq 0, \bar{\psi} \neq 0$ при $b \rightarrow \infty$ имеет место сходимость

$$K(\varphi, \psi) \rightarrow \frac{(\bar{\varphi}, \bar{\psi})}{\sqrt{(\bar{\varphi}, \bar{\varphi})(\bar{\psi}, \bar{\psi})}}.$$

Биологический пример

Исследовалось поведение различных видов растений (вороний глаз, копытень, медуница и зеленчук) в дубняке под влиянием вытаптывания (Карманова И.В. и др.). В качестве параметров были взяты следующие: высота побегов, длина корней, диаметр корней, число корней, площадь листвы и корней. Внешнее воздействие (вытаптывание) было двух видов: умеренное и сильное. Корреляционный анализ показал увеличение веса корреляционного графа ($G = \sum_{|r_{i,j}| \geq 0.5} |r_{i,j}|$, где $r_{i,j}$ - коэффициент корреляции между i -м и между j -м показателями) при умеренном вытаптывании от 1.35 до 3.5 раза и при сильном вытаптывании от 1.6 до 6 раз по сравнению с ненарушенным травяным покровом.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 09-07-00398.

Литература

- Карманова И.В., Разжевайкин В.Н., Шпитонков М.И. Применение методики корреляционной адаптометрии к оценке реакции травянистых видов к стрессовым нагрузкам // ДАН.- 1996.- Т.346.- №3.- С. 424-426.
Разжевайкин В.Н., Шпитонков М.И. Корреляционная адаптометрия. Модели и приложения к биомедицинским системам // Математическое моделирование.- 2008.- Т.20.- №8.- С. 13-27.

СЛОЖНЫЕ РЕЖИМЫ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ПОПУЛЯЦИИ

Ревуцкая О.Л., Фрисман Е.Я.

ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан, Россия
oksana-rev@mail.ru, frisman@mail.ru

Аннотация: исследуется трехкомпонентная модель динамики численности популяции. В модели учитываются половая и возрастная структура и плотностно зависимые эффекты, действующие на выживаемость младшего возрастного класса. Рассматриваются два частных случая модели, когда в популяции наблюдается максимальная равновесная численность самок или самцов. Изучаются сценарии перехода к нелинейным режимам динамики.

1. Описание модели

Рассматривается динамика численности популяции, которая может быть представлена совокупностью трех групп: младшей, включающей неполовозрелых особей, и двух старших, состоящих из самок и самцов, участвующих в размножении. Обозначим n – номер сезона размножения; p – численность особей в младшем возрастном классе; f , m – численности самок и самцов, участвующих в размножении. Предлагаемая модель может быть записана системой трех рекуррентных уравнений

$$\begin{cases} p_{n+1} = \alpha \cdot f_n \\ f_{n+1} = \sigma w_1 p_n + s_1 f_n \\ m_{n+1} = (1 - \sigma) w_2 p_n + s_2 m_n \end{cases} \quad (1)$$

где α – коэффициент рождаемости, σ – доля самок среди новорожденных, w_1 и w_2 – выживаемости неполовозрелых, а s_1 и s_2 – выживаемости половозрелых самок и самцов, соответственно.

Предполагается, что рождаемость α зависит от соотношения численностей самцов и самок в популяции, и выбирается в виде гиперболической функциональной зависимости

$$\alpha = \frac{am}{hf + m},$$

где a – произведение максимально возможного числа потомков, приходящихся на одну оплодотворенную самку, и доли рождающих самок от общего числа оплодотворенных, h – это такое соотношение самцов и самок в популяции, при котором оплодотворенными оказываются ровно половина самок. Предполагается, что выживаемости неполовозрелых самок и самцов являются наиболее чувствительными к плотности популяционными параметрами и линейно зависят от численности младшего возрастного класса

$$w_1 = 1 - \beta_1 p, \quad w_2 = 1 - \beta_2 p,$$

где β_1 и β_2 – коэффициенты, описывающие интенсивность внутривидовой конкуренции. Кроме того, будем считать, что рождается равное количество самок и самцов ($\sigma = 0,5$), а выживаемость половозрелых особей не зависит от пола ($s_1 = s_2 = s$).

Замена переменных позволяет избавиться от параметра β_2 и (с учетом сделанных предположений) записать модель (1) в новых переменных – «относительных» численностях:

$$\begin{cases} p_{n+1} = af_n \frac{m_n}{hf_n + m_n} \\ f_{n+1} = 0,5(1 - bp_n)p_n + sf_n \\ m_{n+1} = 0,5(1 - p_n)p_n + sm_n \end{cases} \quad (2)$$

где $b = \beta_1 / \beta_2$.

2. Результаты исследования модели

Было проведено исследование структуры популяции в равновесном состоянии. Показано, что равновесные численности половозрелых самок и самцов нелинейно зависят от равновесной численности младшего возрастного класса - \bar{p} . В связи с этим, были рассмотрены два частных случая: а) $\bar{p} = 1/2b$ и б) $\bar{p} = 1/2$, что обеспечивает максимальную равновесную численность самок и самцов, соответственно.

Для каждого случая определены равновесные решения модели (2), условия их существования и устойчивости. Аналитически установлено, что потеря устойчивости в двух этих частных случаях происходит в момент прохождения пары комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения через единичную окружность. В результате возникают квазипериодические колебания, которые при изменении параметров системы приобретают хаотический характер. Одновременно с этим в фазовом пространстве появляется предельная инвариантная кривая, которая при дальнейшем изменении параметров разрушается с образованием сложно структурированного аттрактора (рисунок).

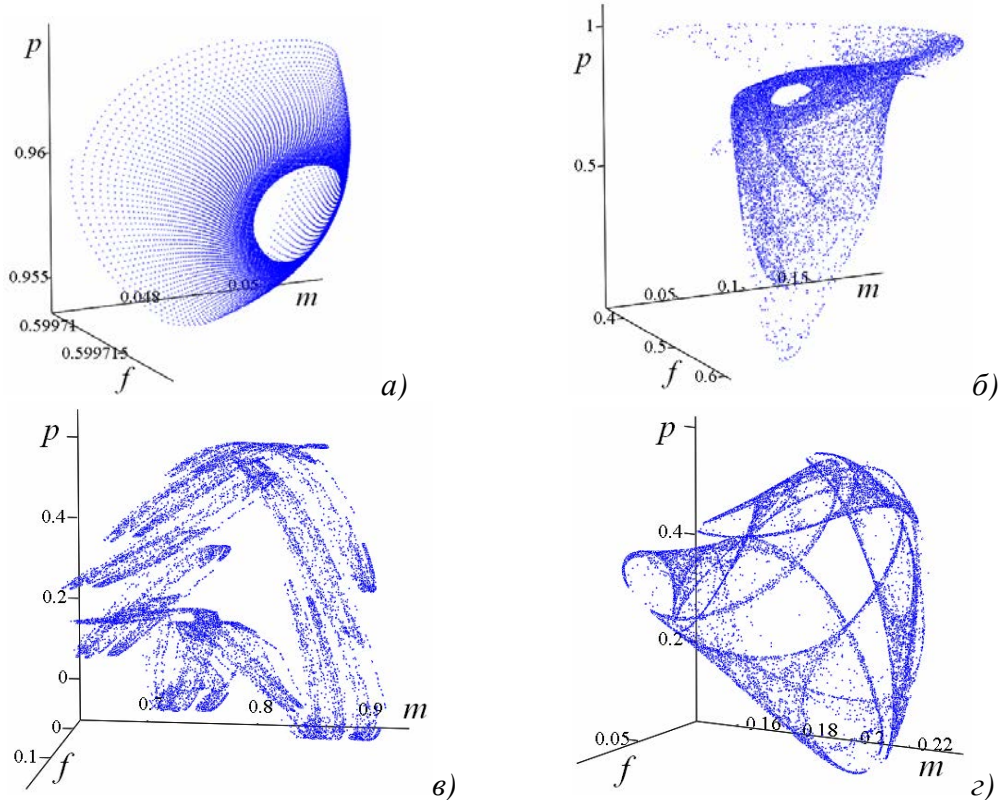


Рисунок. Предельные траектории системы ($h = 0,01$)

- а) $\bar{p} = 1/2b$, $a = 1,7978$, $s = 0,6$, $b = 0,52$; б) $\bar{p} = 1/2b$, $a = 1,845$, $s = 0,6$, $b = 0,517$;
 в) $\bar{p} = 1/2$, $a = 3,57$, $s = 0,9$, $b = 1,887$; г) $\bar{p} = 1/2$, $a = 5,15$, $s = 0,5$, $b = 1,61$.

Исследованы сценарии переходов динамических режимов при изменении параметров системы. Показано, что увеличение коэффициента a , характеризующего интенсивность рождаемости, приводит к потере устойчивости равновесного решения системы, причем, бифуркационное значение a уменьшается с ростом коэффициента выживаемости взрослых особей (s) и при больших s может оказаться даже меньше 1.

Уменьшение величины h , характеризующей зависимость рождаемости от соотношения полов, (фактически, уменьшение «роли» самцов) также приводит к потере устойчивости равновесного решения и переходу к циклическим и хаотическим режимам.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке ДВО РАН (конкурсные проекты № 09-I-P15-01, №09-I-ОБН-12, № 09-II-СО-06-006) и РФФИ (проект № 09-04-00146).

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПОЧВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ И СРАВНЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИЙ

Рожков В.А.

ГНУ Почвенный институт им. В.В.Докучаева Россельхозакадемии, Москва, Россия

rva39@mail.ru

Аннотация: оценка информативности признаков для создания их информативных комбинаций имеет содержательный и экономически обоснованный смысл. Предлагаемые достаточно апробированные методы применимы для всех типов шкал признаков и основаны на средствах многомерной статистики и кластер-анализа так же как и сравнение ординатных или иерархических классификаций, осуществляемое по критериям качества, структуре и составу классов.

Тектологический подход предполагает построение общей теории организации и структуры классификационной системы (Богданов, 1989). Уровень обобщения при этом обеспечивает возможность анализа системных отношений и явлений из одной области с помощью средств из другой. Основная идея направлена на формализацию описаний и организацию единого пространства признаков, определяющих тот или иной таксономический уровень. Идеи подхода успешно реализованы в разработке идей экологической кибернетики (Черныш, 1990).

Самый простой метод оценки информативности признаков многомерных объектов основан на очевидности. На рисунке представлены дендрограммы объектов, построенные по убывающим количествам признаков.

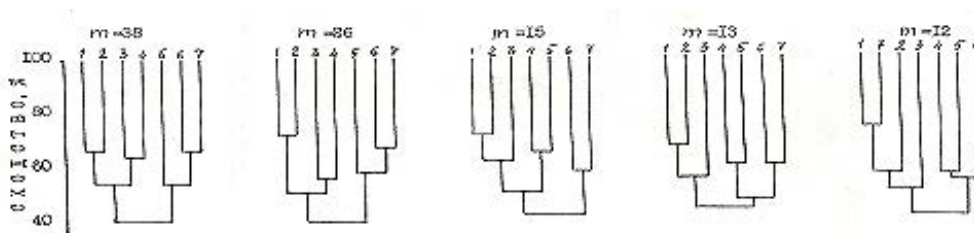


РИС. 8. ДЕНДРОГРАММА ТИПОВ ГТМВ ПО РАЗНЫМ НАБОРАМ ПРИЗНАКОВ (m)

Рисунок. Дендрограммы объектов

Очевидно, что сокращение числа признаков с 38 до 12 не сказалось на структуре исследуемых объектов. И вопрос состоит в том, как оценить информативность каждого признака, чтобы построить их минимальную информативную комбинацию.

Некоторое указание дает простая вариация значений признаков: слабая вариация означает слабую относительную информативность и наоборот.

Довольно распространена оценка – корреляция. Из двух высоко коррелирующих признаков можно оставить один, т.к. другой не добавляет информации. Контролем допустимого исключения признаков служат дендрограммы, подобные вышеприведенным. Способ оценки достоверности различий изменяющихся при сокращении числа признаков дендрограмм – это уже сравнение иерархических классификаций, что обсуждается далее.

Случайный поиск с адаптацией (Лбов, 1981; Рожков, 1989) осуществляет случайный отбор из совокупности признаков заданных классов многомерных объектов и последующим подсчетом ошибок распознавания принадлежности объектов с новым описанием к исходным классам. Запоминаются признаки и их комбинации, обеспечивающие наименьшую ошибку. При этом в зависимости от начальных значений датчика случайных чисел могут оказаться равноправными различные комбинации признаков.

Наконец, многомерная ситуация. Оценка потери информации осуществляется сопоставлением сходства классов объектов по полному (p) и сокращенному (q) набору показателей:

$$\chi^2 \hat{r} = -n(p+k)/2 * \ln(\lambda_q / \lambda_p)$$

где $\hat{r} = p(k-1)$, k – число классов; $\lambda_q = |\mathbf{W}|/|\mathbf{T}|$ - отношение определителей матриц внутри- и межклассового варьирования (сходства) с p и q признаков.

Сходные результаты дает сравнение расстояний Махаланобиса между классами по полному и сокращенному набору признаков, а также методом линейного дискриминантного анализа (Рожков, 1989). Строгость этих подходов состоит в требовании значительного объема данных – по крайней мере, превосходства числа объектов над числом выбранных признаков.

Оценка качества классификаций в общем случае осуществляется с использованием ряда специальных критериев, наиболее распространенным из которых является отношение среднего внутриклассового сходства объектов к межклассовому: чем оно больше, тем более четкое разделение на классы.

Сравнение двух ординатных классификаций проводится с помощью полихорического показателя связи Чупрова по количеству совпадающих объектов по классам обоих разбиений (к примеру, на 5 и 8 классов с данного рисунка) (Рожков, 1989).

Сравнение иерархических классификаций (дендрограмм) проводится методом, предложенным в (Sokal, Rohlf, 1962).

Сечения дендрограмм одного множества объектов по полному и сокращенному наборам признаков позволяют выделить некоторые классы, номерами которых кодируются исходные объекты. Корреляция этих номеров служит мерой сходства корреляций. При малом числе объектов используются непараметрические критерии (тот же полихорический показатель). Применим так же подход, используемый для ординатных классификаций.

Сложность алгоритмов и требований, отсутствие доступных компьютерных программ, видимо, объясняют недостаточно широкое приложение этих методов, хотя они позволяют порой в 2-5 раз уменьшить затраты на лабораторные анализы почв.

Литература

- Богданов А.А. Тектология. Всеобщая организационная наука.- М.: Финансы, 2003.- 496 с.
Лбов Г.С. Методы обработки разнотипных экспериментальных данных.- Новосибирск: Наука, 1981.- 160 с.
Рожков В.А. Почвенная информатика.- М.: Агропромиздат, 1989.- 222 с.
Черныш В.И. Введение в экологическую кибернетику.- М: Центральная аэрологическая обсерватория, 1990.- 568с.
Sokal R.R., Rohlf F.I. The comparison of dendrograms by the objective methods //TAXON, 1962. № 11, pp. 33-40.

К ВОПРОСУ О СТОХАСТИЧЕСКОМ ОБЪЯСНЕНИИ ЦИКЛИЧНОСТИ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Розенберг Г.С.

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, Россия
genarozenberg@yandex.ru

Аннотация: обсуждаются возможности закона распределения количества независимых, одинаково распределенных случайных величин, разделяющих одноименные поворотные точки временного ряда.

Практически любой природный процесс может быть представлен временным рядом (результаты наблюдений за изменением некоторых параметров во времени). Естественно, что при обработке таких временных рядов следует учитывать некоторые их вероятностные характеристики. Более 30 лет тому назад (Розенберг, Рудерман, 1977; Розенберг, 1980) был получен закон распределения количества независимых, одинаково распределенных случайных величин, разделяющих одноименные поворотные точки временного ряда (назовем его $P(S)$; S – расстояние между двумя смежными поворотными точками одного типа [локальными максимумами наблюдаемой реализации исходной случайной величины X]). В последствии Н.Ф. Реймерс (1990, с. 401-402) назвал это распределение *принципом (гипотезой) скользящих среднемаксимальных случайного ряда*. На возможность нахождения этого закона распределения указывал Е.Е. Слуцкий [1927; 1960, с. 109]: «когда-нибудь, вероятно, удастся вычислить математическое ожидание величины расстояния от максимума до максимума и её колеблемость». Этот закон распределения имеет следующий вид (если X – непрерывная случайная величина):

$$P(S) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{(S-1)/2} \frac{6}{(2i+1)!(S-2i)!(S-2i+2)}, & S - \text{нечетное}, \\ \sum_{i=1}^{S/2} \frac{6}{(2i+1)!(S-2i)!(S-2i+2)} - \frac{3(S+2)}{(S+3)!}, & S - \text{четное}. \end{cases}$$

Этот закон распределения $P(S)$ обладает рядом уникальных свойств: для любой непрерывной случайной величины X [с функцией распределения $f(x)$] $F(S)$ не зависит от вида $f(x)$, то есть закон $F(S)$ обладает значительной общностью; математическое ожидание $M(S)$ для непрерывной случайной величины равно 3, дисперсия равна 1,1664; закон распределения для дискретной равновероятной случайной величины X асимптотически сходится к закону распределения $F(S)$ [см. таблицу]; математическое ожидание «вторичных», «третичных» и т.д. максимумов (максимумов из максимумов) для непрерывной случайной величины X будет равно $3^2 = 9$, $3^3 = 27$ и т. д.

Закон распределения X	S				
	2	3	4	5	6
Непрерывная случайная величина X	0.4000	0.3333	0.1714	0.0667	0.0212
Дискретная случайная равновероятная величина X ($p = 1/m$)					
	$m = 6$	0.2434	0.2792	0.1904	0.0756
$m = 10$	0.3640	0.3197	0.1826	0.0837	0.0336

Наличие данного закона $P(S)$ для реализации любой случайной величины совершенно по-другому ставит проблему объяснения «наблюдаемой» в природе цикличности: этот закон распределения позволяет формулировать и проверять гипотезы о причинах возникновения такой цикличности. Если среднее расстояние между соседними максимумами

(«первичными», «вторичными» и пр.) исследуемого временного ряда достоверно не отличаются от 3, 9, 27, 81 и т. д., то у исследователя нет достаточных причин для поисков детерминистически заданного механизма такой цикличности – гипотеза о случайном характере ее возникновения не отвергается. Другое дело, когда такое расстояние достоверно отличается от 3^n .

Данный временной ряд получается при *независимых* наблюдениях над случайной величиной X . В отличие от этого было предложено использовать представления о «связанном ряде» (Слуцкий, 1927): вероятность возникновения на определенном месте ряда тех или иных конкретных значений зависит от того, какие значения случайная величина получила раньше или получит позже (во многом, эти результаты Е.Е. Слуцкого предвосхитили представления о том, что временной ряд на некотором интервале масштабов самоподобен (фрактален) и, как следствие, процессы идущие в настоящий момент, определялись предыдущими состояниями). Им была даже получена формула для определения периода (L) синусоиды, с помощью которой можно описать связанный ряд.

Пример. Случайность колебаний прироста сосны горной (*Pinus mugo*). Используя данные по динамике величины прироста сосны горной (*Pinus mugo*) за 272 года (Колищук, 1966, с. 711), удалось получить следующую картину:

Сравнение эмпирического распределения с теоретическим при помощи критерия λ позволяет сделать вывод о том, что гипотеза о независимости членов ряда по данным эксперимента не отвергается и, следовательно, наблюдаемая «периодичность» ряда есть результат случайных эффектов. Однако, в работе (Колищук, 1966) проводится выравнивание исходного временного ряда методом скользящей средней (тем самым, получая связанный ряд, для которого справедливы все выводы Е.Е. Слуцкого, 1927) и на этом основании делается вывод о возникновении «цикличности» величины прироста под периодическим воздействием солнечной активности...

Используя формулу Е.Е. Слуцкого для определения периода (L) синусоиды для связанного ряда, можно решить обратную задачу: каков должен быть коэффициент автокорреляции между соседними годами (или, что равнозначно, какое число выравниваний необходимо провести, чтобы получить этот коэффициент), чтобы период аппроксимирующей ряд синусоиды был равен, например, 11 годам (средний период солнечной активности). Несложные вычисления дают величину $r_1 = 0,84$. Определение коэффициента автокорреляции по экспериментальным данным было несколько затруднено (в статье данные приведены графически), однако даже с учетом погрешностей округления первое же выравнивание дает значение $r_1 \approx 0,80$.

Этот пример показывает, что «периодичность» временного ряда (под которую подводится то или иное физико-биологическое обоснование) возможна в результате сложения случайных причин. Этот факт должен обратить на себя внимание исследователей, т. к. работы такого плана продолжают появляться.

Литература

- Колищук В.Г. Динамика прироста горной сосны (*Pinus mughus* Scop.) в связи с солнечной активностью.– Докл. АН СССР.– 1966.– Т. 167, № 3.– С. 710-713.
- Розенберг Г.С. Вероятностный подход к изучению временной структуры растительного покрова // Журн. общ. биол.– 1980.– Т. 41, № 3.– С. 372-385.
- Розенберг Г.С., Рудерман С.Ю. О количестве независимых, одинаково распределенных случайных величин, разделяющих одноименные поворотные точки // Статистический анализ и моделирование процессов и систем. Вып. 4.– Таганрог: Изд-во ТРТИ, 1977.– С. 107-109.
- Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник.– М.: Мысль, 1990.– 637 с.
- Слуцкий Е.Е. О сложении случайных величин как причине циклических процессов // Вопросы конъюнктуры.– 1927.– Т. 3, № 1. (см.: Слуцкий Е.Е. Избранные труды. Теория вероятности и математическая статистика.– М.; Л.: АН СССР, 1960.– С. 99-132).

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПОСЕВОВ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ

Розенберг Г.С.

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, Россия
genarozenberg@yandex.ru

Аннотация: рассмотрены возможности потенциально-эффективного моделирования применительно к объяснению процессов в искусственных травосмесях.

Одна из основных целей теории потенциальной эффективности сложных систем (Флейшман, 1982) – это формулировка общих предельных законов, ограничивающих эффективность сложных систем любой природы.

Представим взаимодействие системы A со средой B как серию обменов некоторого количества расходуемых ресурсов U на некоторое количество потребляемых ресурсов V (U и V в этом случае являются параметрами системы A); Б.С. Флейшман такой обмен называет $(U;V)$ -обменом (примером может служить рост биомассы агроэкосистемы $[V]$ при внесении удобрений $[U]$). Тогда целью A_0 системы A можно определить «наиболее выгодный $(U;V)$ -обмен» (система стремится получить больше, отдавая при этом меньше). Для широких классов $\{\Omega\}$ и $\{\Psi\}$, таких, что $A \in \{\Omega\}$ и $B \in \{\Psi\}$, существует фундаментальная величина

$$v_0 = v(u, A_0, B_0) = \max_{A \in \{\Omega\}} \min_{B \in \{\Psi\}} v(u, A, B),$$

где A_0 и B_0 – оптимальные в классах $\{\Omega\}$ и $\{\Psi\}$ система и среда, соответственно (Флейшман, 1982).

Если представить $(U;V)$ -обмен как некоторый случайный процесс (для каждого фиксированного U система путем изменения своей структуры и поведения стремится максимизировать V), то характеризовать взаимодействие системы A со средой B можно через некоторую вероятность $P(U;V)$ достижения системой A своей цели A_0 .

Создание искусственных экосистем путем подбора и оптимизации их структуры – одно из актуальных направлений прикладной экологии. Например, создание травосмесей для газонов; при этом, естественно, требования к газонным травосмесям различны. Например, футбольное поле должно быть густым, выдерживать большие нагрузки, мяч не должен скользить, поле для гольфа должно еще обладать и повышенными декоративными качествами, газоны специального типа, имеют, в основном, санитарно-гигиеническое значение (дернина газона закрепляет почву, травостой поглощает из атмосферы часть пыли и газов, приглушает шум, повышает относительную влажность воздуха и пр.).

Однако, основное применение травосмесей связано с созданием посевов многолетних трав продленного долголетия (повышенная продуктивность и устойчивость к внедрению аборигенных видов, удешевление получаемой фитомассы и пр.). «При заведении постоянных лугов, к числу главных условий успешности принадлежит умение выбрать такую смесь трав, которая наиболее прилично характеру и свойствам почвы (выделено автором. – Г.Р.)» (Бажанов, 1863, с. 186). Именно решению последней задачи на основе принципа программированной сукцессии (Миркин, 1985) и были посвящены экспериментальные и теоретические работы башкирских геоботаников в 80-90-х гг. прошлого столетия (Миркин и др., 1987, 2002; Миркин, Горская, 1989).

Вся полученная совокупность эмпирических фактов позволяет привлечь для объяснения данного явления следующие теоретические конструкции (Миркин, 1990, с. 34-35; Розенберг и др., 1999).

- *Аксиома адаптивности* (адаптивный подход; не улучшать дорогим путем неблагоприятные условия среды для выращивания трав, а подбирать виды трав, которые достаточно продуктивны и устойчивы в этих неблагоприятных условиях).
- *Принцип «плотной упаковки» экологических ниш* (включать в травосмесь виды с разным отношением к факторам среды).

- *Принцип фитоценотической замкнутости* (закрытость травосмеси от внедрения незапланированных компонентов – сорняков и видов местных лугов; фактически, следствие из предыдущего принципа).
- *Принцип различных типов эколого-ценотических стратегий* (подбор видов с разными типами эколого-ценотических стратегий (подбор видов с разным положением корневой системы, разной ритмикой фенологического развития, с разной реакцией на климатические условия и пр.); оценка виолентности популяций; также следствие из принципа «плотной упаковки» экологических ниш).
- *Принцип сукцессионного замещения* (программированная сукцессия; обеспечивать постоянную «продукционную волну», когда виды трав закономерно перераспределяют используемые ресурсы и поочередно достигают максимального развития, что снижает конкуренцию и обеспечивает высокую урожайность травосмеси весь срок ее эксплуатации; Connell, Slatyer, 1977).
- *Правило обязательности заполнения экологической ниши* реализуется либо путем существенных различий видов по размерам, либо внедрением в состав травосмеси видов «дикой» флоры с окрестных территорий.

Формализовать эти теоретические представления можно с помощью следующей модели. Функционирование травосмеси (система A) можно представить как процесс ежегодного «обмена» плотности упаковки видов в экологической нише (будем говорить о «потребляемом ресурсе» U) на устойчивость травосмеси («расходуемый ресурс» V). Тогда целью A_0 системы A можно определить «наиболее выгодный ($U;V$)-обмен» (система стремится высокопродуктивно просуществовать достаточно долго, увеличивая [или сохраняя] степень плотности упаковки видов в травосмеси). Представляя ($U;V$)-обмен как некоторый случайный процесс (для каждого фиксированного U система путем изменения своей структуры и поведения стремится максимизировать V), зададим вероятность $P(U,V)$ достижения системой A своей цели A_0 ; тогда в соответствии с формулой Байеса:

$$P(U,V) = P(U) \cdot P(V/U) .$$

Вероятность $P(U)$ задается через относительные упаковочные удельные веса η для упаковок круга, соответствующих регулярным и полурегулярным составлениям мозаики на плоскости (Williams 1979, p. 49).

Литература

- Бажанов А. Об искусственно возделываемых лугах // Что можно заимствовать у иностранцев по части земледелия.– Спб.: Тип. Э. Стелловскаго, 1863.– С. 175-222.
- Миркин Б.М. Теоретические основы современной фитоценологии.– М.: Наука, 1985.– 136 с.
- Миркин Б.М. Экология растительности сельскохозяйственных земель Башкирии.– Уфа: Башк. кн. изд-во, 1990.– 128 с.
- Миркин Б.М., Горская Т.Г. Теоретические аспекты анализа сукцессии в травосмесах // Биол. науки.– 1989.– № 10.– С. 18-27.
- Миркин Б.М., Горская Т.Г., Григорьев И.Н. и др. Опыт анализа сукцессий в травосмесах.– Уфа: БФАН СССР, 1987.– 120 с.
- Миркин Б.М., Хасанова Г.Р., Абрамова Л.М., Суяндукоев Я.Т. Сукцессии в посевах многолетних трав: закономерности, вклад в биоразнообразие и устойчивость агроэкосистем // Бюл. МОИП, отд. биол.– 2002.– Т. 107, вып. 5.– С. 68-72.
- Розенберг Г.С., Мозговой Д.П., Гелашвили Д.Б. Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии.– Самара: СНЦ РАН, 1999.– 396 с.
- Флейшман Б.С. Основы системологии.– М.: Радио и связь, 1982.– 368 с.
- Connell J.H., Slatyer R.O. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization // Amer. Naturalist.– 1977.– V. 111.– P. 1119-1144.
- Williams R. Circle coverings // The Geometrical Foundation of Natural Structure: A Source Book of Design.– N.Y.: Dover, 1979.– P. 48-52.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПРОГНОЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПАХОТНЫХ ПОЧВ ЕТР В XXI В. ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ АДАПТАЦИИ

Романенков В.А.¹, Рухович Д.И.², Королёва П.В.², Шевцова Л.К.¹.

¹*Всероссийский НИИ агрохимии им. Д.Н.Прянишникова, Москва, Россия*
viua@online.ru

²*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия*
ruh@agro.geonet.ru

Разработан метод оценки влияния ожидаемых изменений климата на региональные системы сельскохозяйственного производства, основанный на создании совместимых между собой социально-экономических и экологических сценариев. Рассматривается возможность принятия решений о корректировке севооборотов и систем удобрения как составляющих системы адаптационных мер к изменению климата, используя критерий обеспечения стабильности запасов ОВ.

Исследована возможность объединения результатов прогнозов изменения биоклиматических ресурсов территории, урожайности сельскохозяйственных культур, запасов органического вещества почвы, экономических показателей земледелия на основе построения контуров, имеющих единую экономическую базу и агрохимические характеристики при однородной сельскохозяйственной эксплуатации. Целью работы являлось установление взаимосвязи между рентабельным ведением сельского хозяйства и устойчивым функционированием агроландшафтов.

Для расчётов изменения содержания ОВ использованы две модели – статистическая модель динамики ОВ, разработанная на основе обобщения данных многолетних опытов Нечернозёмной зоны Геосети по влиянию различных агротехнических факторов на баланс гумуса (Shevtsova et al., 2003; Романенков и др., 2005); а также динамическая модель RothC-26.3, предназначенная для моделирования круговорота углерода в верхнем слое автоморфных почв (Coleman, Jenkinson, 1997). Для расчётов поступления растительных остатков использована модель КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ (Сиротенко и др., 1995). Урожайность зерновых культур и трав рассчитывалась при оптимальном азотном питании и при частичном азотном стрессе для условий богарного земледелия. Изменение в абсолютном количестве поступающих растительных остатков оценивалось по пропорциональному изменению урожайности на основе прогноза изменения продуктивности раздельно для каждого сценария изменения климата и сценария адаптации.

Прогноз до 2070 г. показывает возможность снижения потерь ОВ на 30-45% при применении адаптационных мер, а для большинства территорий Нечернозёмной зоны – увеличение запасов ОВ. При этом в центре НЗ существует ядро областей, где затраты на поддержание положительного баланса ОВ минимальны, а наиболее затратной оказывается территория северо-западных и юго-восточных районов НЗ. Влияние адаптационных мер в Нечерноземной зоне является более значимым фактором для изменения запасов С почвы, чем влияние контрастных климатических сценариев.

Расчеты для Северо-Западного и Центрального ФО показывают, что в период 2000–2070 гг. комплекс адаптационных мер обеспечивает рост урожайности при расширенном воспроизводстве плодородия почв, что позволяет получить максимальную прибыль региональной системы ведения хозяйства. Установлено, что для Нечерноземной зоны влияние климата проявляется в большей степени в растениеводческом секторе по сравнению с сектором животноводства РССП. Данные регионы можно рассматривать как наиболее перспективные для осуществления адаптационных мер, которые могут иметь существенный выигрыш от изменения климата, но должна быть обеспечена адекватность во времени адаптационных программ. В 2030-40 гг. управление депонированием С возможно при

относительно меньшей доли многолетних трав в севообороте. Увеличение ареала потенциальных потерь ранее накопленного С происходит в 2050–60 гг., прежде всего за счет ожидаемой потери С для слабоокультуренных почв с низким содержанием ОВ в широком диапазоне изменения гранулометрического состава. В связи с этим эффективным периодом внедрения адаптивной стратегии земледелия являются 2010–2030 гг.

При внедрении единой системы адаптационных мер в пределах одной области эффективно обеспечивается депонирование С только некоторыми контурами, в то время лишь ослабляется процесс потери для соседних, что связано как со степенью окультуренности почвы, так и с ее гранулометрическим составом. Эффективность управления запасами С при реализации адаптационных мероприятий гораздо выше для окультуренных почв тяжелого гранулометрического состава.

Полученный прогноз динамики С по статистической модели согласуется с данными модели RothC. Статистическая модель оказывается более чувствительна к агрегированию данных почв разного гранулометрического состава, обуславливая возможность занижения полученных результатов по усредненным данным.

Правильный подбор доли многолетних трав в севообороте играет существенную роль в снижении затрат при реализации эколого-экономического сценария адаптации по сравнению с оптимальным экономическим. В областях Нечерноземной зоны, относящихся к Центральному ФО, доля трав в севооборотах достаточна для обеспечения расширенного воспроизводства почвенного плодородия, позволяет поддерживать положительный баланс органического вещества в условиях 2050 г., за исключением Брянской, Рязанской и Московской областей. В почвах Нечерноземной зоны Привожского ФО доля трав в структуре севооборотов недостаточна для осуществления эколого-экономического устойчивого сценария, иногда значительно – дефицит доли трав в севооборотах может составлять 25–35 %. Снижение затрат на поддержание запасов органического углерода почвы возможно за счет планируемых изменений в секторе животноводства, что требует более детального анализа на районном уровне, а также на основе снижения доли пропашных культур в севооборотах. Для областей, где доля трав в севооборотах меньше оптимальной, поддержание бездефицитного баланса ОВ возможно на основе снижения интенсивности в производстве растениеводческой продукции.

Литература

- Романенков В.А., Шевцова Л.К., Сиротенко О.Д. Использование моделей трансформации органического углерода в комплексной оценке плодородия и устойчивости почв // Методы исследования органического вещества почв.– Владимир: ВНИПТИОУ, 2005.– С. 494-509.
- Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н. Чувствительность сельского хозяйства России к изменениям климата, химического состава атмосферы и плодородия почв//Метеорология и гидрология.– 1995.–№ 4.– С. 107–114.
- Coleman K, Jenkinson D.S, Crocker G.J, et al. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. // Geoderma.-1997.- V.81.- P.29–44.
- Romanenko I.A., Romanenkov V.A., Smith P., Smith J.U., Sirotenko O.D., Lisovoi N.V., Shevtsova L.K., Rukhovich D.I., Koroleva P.V. Constructing regional scenarios for sustainable agriculture in European Russia and the Ukraine for 2000 to 2070 // Regional Environmental Change.- 2007.-V. 7.- P.- 63-77.
- Shevtsova L., Romanenkov V., Sirotenko O. [et al.] Effect of natural and agricultural factors on long-term organic matter dynamics in arable soddy-podzolic soils – modeling and observation // Geoderma.– 2003.– Vol. 116, N 1/2.– P. 165–189.

РАСЧЁТ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР И ЭФФЕКТИВНОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ОДНОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЫ

Романенков В.А.¹, Сиротенко О.Д.², Беличенко М.В.¹, Павлова В.Н.²

¹ *Всероссийский НИИ агрохимии им. Д.Н.Прянишникова, Москва, Россия*
viua@online.ru

² *Всероссийский НИИ сельскохозяйственной метеорологии, Обнинск, Россия*
vnp2003@bk.ru

Аннотация: разработан метод оценки влияния ожидаемых изменений климата на региональные системы сельскохозяйственного производства, основанный на создании совместимых между собой социально-экономических и экологических сценариев. Рассматривается возможность принятия решений о корректировке севооборотов и систем удобрения как составляющих системы адаптационных мер к изменению климата, используя критерий обеспечения стабильности запасов ОВ.

До настоящего времени основой для расчетов эффективности применения удобрений, нормативов зависимости урожаев от показателей окультуренности почв, а также оптимальных показателей плодородия почв служат обобщения выборок с одинаковыми или очень близкими дозами внесения удобрений, в которых не учитывается взаимодействие климатических факторов, почвенных условий и минеральных удобрений.

Целью работы являлось уточнение полученных ранее оценок эффективности удобрений для разных уровней плодородия почв определенного типа, на основе развернутой характеристики агрометеорологических условий произрастания растений, полученных как в динамической системе расчётов КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ (Сиротенко и др., 1995), так и на основе прямых агроклиматических наблюдений.

Набор моделей продуктивности получен на основе полиномиальных уравнений регрессии методом последовательного перебора переменных. Выбор наиболее информативных параметров проводился на основе статистически значимых оценок коэффициентов регрессии и с учетом результатов сравнения моделей для различных территорий. Устойчивость моделей определялась на основе численных экспериментов для различных типов реализации погодных условий и при уровне плодородия, близком к оптимальному и отличному от него. Модели, показывающие наиболее близкие к экспериментальным данным оценки окупаемости удобрений и реализации уровня продуктивности по контрастным погодным условиям и уровням окультуренности почвы, выбирались в качестве рабочих. На основании выбранных моделей рассчитывались прогностические тренды изменения эффективности удобрений с учетом одновременного изменения климатических условий и плодородия почвы за пределами временных и пространственных рамок конкретного полевого опыта (группы опытов), а также проводилась корректировка прогноза окупаемости удобрений и прибавок урожая в зависимости от конкретных почвенно-геохимических условий территории.

Используя данные, привлеченные Федосеевым (1979) для оценки средней эффективности удобрений и данные гидрометеорологических наблюдений по 455 станциям на территории бывшего СССР за период с 1975 по 2004 г., нами получены оценки возможных изменений эффективности минеральных удобрений дифференцированно по каждому региону России. Эффективность удобрений для большинства важных в сельскохозяйственном отношении регионов нашей страны за последние 30 лет росла или сохранялась на прежнем уровне, потенциальный выигрыш при этом составил от 0,5 до 3 ц/га. Этот вывод относится, прежде всего, к территории Северо-Кавказского, Поволжского и Уральского экономических районов. Вместе с тем, как результат увеличения засушливости климата в отдельных районах Сибири (Алтайский край, Забайкалье), а также на Дальнем Востоке и в некоторых районах Нечерноземья (Смоленская, Тверская, Ярославская,

Вологодская, Новгородская) потенциальная эффективность удобрений снизилась на 0,5 -2 ц/га.

Установлено, что окупаемость азотных удобрений может быть рассчитана, исходя из устойчивого набора факторов, определяющих взаимодействие внесённых доз с количеством осадков в период возобновления вегетации для озимой пшеницы и начала вегетации – для ячменя. зная условия увлажнения весеннего периода, можно составлять прогноз окупаемости азотных удобрений на ранних этапах вегетации. Исследование выборок с различной степенью окультуренности почв, на основе оценки обеспеченности подвижным фосфором, дало возможность определить, что нелинейность возрастает с ростом окультуренности и при применении высоких доз N (>120 кг/га). Окупаемость азотных удобрений, выраженная в виде приращения урожайности на единицу действующего вещества азотных удобрений, является убывающей функцией N. При этом увеличение дозы N на каждые 10 кг приводит к снижению окупаемости в среднем на 0,8 кг зерна/кг азота. Такое снижение происходит на 20% быстрее на сравнительно менее окультуренных почвах. Свободный член зависимости отражает некоторое снижение окупаемости с ростом окультуренности, что заметно при применении малых доз N удобрений, но нивелируется более быстрым падением окупаемости на низкоокультуренных почвах при средних дозах N (50-70 кг/га). Максимум приращения урожайности на единицу действующего вещества азотных удобрений для озимой пшеницы пропорционален сумме апрельских осадкам, которые определяют условия увлажнения после возобновления вегетации, способствуют повышению окупаемости удобрений прибавкой урожая озимых на 0,6-1,5 кг зерна/кг азота на каждые 10 мм осадков. На территории Московской области межгодовая изменчивость суммы апрельских осадков достаточно велика. Так, в 1972 г. за апрель выпало 62 мм осадков, а в 1984 г. – всего 7 мм. В соответствии с этим максимальная окупаемость азотных удобрений в 1972 г. не превышала 16, а в 1984 г. – 6 кг зерна/кг азота. Для ярового ячменя прибавка составляет 0,5-0,9 кг зерна/кг азота на каждые 10 мм осадков мая - в период начала интенсивного роста культуры. Таким образом, зная условия увлажнения весеннего периода, можно составлять прогноз окупаемости азотных удобрений на ранних этапах вегетации.

Показано, что возможность устойчивого управления прибавками урожая и окупаемостью удобрений реализуются для зерновых культур на территории Нечернозёмной зоны в диапазоне доз азотных удобрений 60-90 кг/га, при этом варьирование, связанное с изменением окультуренности почвы, сопоставимо с влиянием погодных условий. Оптимальная доза удобрений возрастает до 120-180 кг/га в годы с благоприятными климатическими условиями, и её ежегодная корректировка требует обязательного учёта степени окультуренности почв. Предлагаемый подход уточняет закономерности формирования урожая зерновых для уровня отдельного сельскохозяйственного предприятия, позволяя осуществить прогноз эффективности минеральных удобрений с включением в нормативные расчёты ожидаемых или наблюдаемых погодных показателей.

Литература

Сиротенко О. Д., Абашина Е. В., Павлова В. Н. Чувствительность сельского хозяйства России к изменениям климата, химического состава атмосферы и плодородия почв // Метеорология и гидрология, – 1995. – № 4. – С. 107–114.

Федосеев А.П. Агротехника и погода.- Л.: Гидрометеиздат, 1979.- 240 с.

МАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ ПОПУЛЯЦИОННОЙ ДИНАМИКИ БЕЛОПЛЕЧЕГО ОРЛАНА НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ САХАЛИНА В 2004-2008 ГГ.

Романов М.С.¹, Мастеров В.Б.²

¹*Институт математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия*
michael_romanov@inbox.ru

²*Биологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия*
haliaeetus@yandex.ru

Аннотация: Расчеты популяционной динамики белоплечего орлана на Сахалине, выполненные с помощью матричной модели с учетом новых данных (2008 г.), выявили наличие отрицательного тренда (не менее 1,4 % в год) из-за низкой продуктивности размножения (0,21 птенцов на 1 взрослую особь в год). Они также показали, что, помимо хищничества бурых медведей, вероятно, существуют и другие факторы, отрицательно влияющие на воспроизводство популяции.

1. Введение

Выполненное ранее моделирование популяционной динамики белоплечего орлана на северо-востоке Сахалина (Романов, Мастеров, 2008) за 4-летний период 2004-2007 г. выявило наличие отрицательного тренда, связанного с мощным прессом хищничества бурых медведей, уничтожающих в среднем 28,4 % птенцов в год. В ходе исследований 2008 г. были получены новые данные о продуктивности популяции и численности территориально-возрастных групп. Несмотря на некоторое снижение пресса хищничества медведей (14,5 %), данный сезон ознаменовался низкой продуктивностью орланов, которая составила 0,18 птенцов на 1 взрослую особь, вероятно, в результате воздействия других факторов (например, связанных с погодными условиями или состоянием кормовой базы). Новые данные были инкорпорированы в ранее разработанную матричную модель, в которой выполнены новые расчеты популяционной динамики за 5-летний период.

2. Результаты

Оценки продуктивности и структуры популяции (численности территориально-возрастных групп) основаны на полевых данных, усредненных за весь период исследований, что позволило сгладить межгодовые колебания оценок численности и продуктивности популяции и охватить сезоны с разными кормовыми условиями. В районе исследований (площадь ≈ 1000 км²) выявлено 284 гнездовых территории орланов, на которых обитает 663 особи орланов, включая 412 взрослых территориальных, 133 взрослых нетерриториальных и 118 молодых особей. За гнездовой сезон популяция выращивает в среднем 152 птенцов, из которых около 40 подвергаются хищничеству медведей, а 112 доживают до вылета из гнезда. Продуктивность в пересчете на 1 взрослую особь составляет 0,21 птенцов в год.

Рассматривались следующие сценарии развития популяции. 1) Основной сценарий: развитие «как есть». Продуктивность равна 0,21 птенцов на 1 взрослую особь в год. 2) Снятие пресса хищничества медведя. Потенциальная продуктивность в этом случае составит 0,28 птенцов на 1 взрослую особь в год. 3) Компенсация потерь от хищничества путем включения в размножение популяционного резерва — нетерриториальных взрослых особей. Продуктивность равна продуктивности территориальных птиц: 0,27 птенцов на 1 особь в год.

Выживаемости взрослых особей и молодых особей после 1-го жизни в модели было присвоено заведомо оптимистичное значение (0,95), соответствующее благополучной растущей популяции близкородственного вида — белоголового орлана в неволе (Kohler et al., 2006). Оценки выживаемости молодых особей в течение 1-го года жизни рассчитаны из соотношения численности слетков и молодых особей. В разных сценариях они варьировали от 0,209 до 0,216.

Результаты моделирования представлены в таблице 1. Все три рассматриваемых сценария демонстрируют отрицательные темпы роста популяции ($\lambda < 1$). При основном сценарии расчетные темпы сокращения популяции составляют не менее 1,4 % в год, что соответствует сокращению вдвое примерно за 50 лет. Моделирование прекращения прессы хищничества медведей (сценарий 2) недостаточно для стабилизации популяции, хотя оно может замедлить темпы сокращения до 0,3 % в год. Буферных возможностей популяционного резерва (сценарий 3) также недостаточно для стабилизации популяции (темпы сокращения составят не менее 0,4 % в год). Для стабилизации популяции требуется повышение продуктивности размножения до 0,30 птенцов на 1 взрослую особь в год.

Таблица 4 – Результаты моделирования темпов роста и стабильной возрастной структуры популяции при различных сценариях развития

Значения параметров	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
<i>Значения входных параметров</i>			
Плодовитость взрослых особей	0,21	0,28	0,27
Выживаемость в течение 1-го года жизни	0,209	0,216	0,215
Выживаемость после 1-го года жизни	0,95	0,95	0,95
<i>Результаты моделирования</i>			
Главное собственное число матрицы перехода, λ	0,986	0,997	0,996
Темпы роста популяции (% в год), r	-1,4	-0,3	-0,4
Доля молодых особей N_{im}/N	16,9 %	21,6 %	21,2 %

Матричные модели не позволяют делать прогнозы дальнейшего развития популяции, давая лишь «моментальный» срез ее текущего состояния. Однако на основании моделирования можно утверждать, что за минувший 5-летний период популяционный баланс был отрицательным. С учетом новых данных о размножении орланов в сезоне 2008 г. оценки темпов роста популяции оказались еще более неблагоприятными, несмотря на снизившийся пресс хищничества медведей. Это означает, что, помимо хищничества медведей, существует и другой, пока не установленный фактор, отрицательно влияющий на воспроизводство популяции.

Литература

- Романов М.С., Мастеров В.Б. Матричная модель популяции белоплечего орлана *Haliaeetus pelagicus* на Сахалине. Математическая биология и биоинформатика.- 2008. 3 (2). С. 36-49.
 Kohler I. V., Preston S. H., Lackey L. B. (2006) Comparative mortality levels among selected species of captive animals. Demographic Research. 2996. 15, Article 14. 413-434.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА ПОЧВ ЗАЛЕЖНЫХ ЗЕМЕЛЬ РОССИИ

Романовская А.А., Слепнева Ю.В.

Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, Москва, Россия
an_roman@mail.ru

Аннотация: запасы углерода почв залежных земель России оценены на основе откалиброванной по данным полевых исследований модели RothC. Выявлено 1206 полигонов пахотных земель для проведения моделирования. Результаты расчета показывают, что за период с 1990 по 2005гг. залежные земли России аккумулировали 248 млн. тонн С, что соответствует 910 млн. тонн CO₂ (± 14,9%).

Оценка запасов органического углерода в почвах залежных земель России выполнена на основе модели RothC (Coleman, Jenkinson, 1996). Эта модель пригодна для использования на территории России. В качестве исходных данных требуются сравнительно легко доступная информация по климату, почвам и растительности. Модель имеет удобное временное разрешение и позволяет рассчитывать содержание органического углерода ежемесячно. По данным государственной статистики нами была оценена площадь земель, выведенных из сельскохозяйственного использования с 1990 по 2005 г. включительно, которая составляет 27,9 млн. га.

Для верификации и калибровки модели нами были проведены экспериментальные исследования изменений запасов углерода почв залежных земель на территории зоны северной тайги (Мурманская обл.), смешанных и широколиственных лесов (Московская и Свердловская обл.) и степной зоны (Ставропольский край). Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют, что во всех исследованных регионах содержание углерода почв постепенно увеличивалось в ряду пашня – залежи – целина. Для почв залежей около 5 лет получены самые высокие степени неопределенности оценок содержания углерода, которые свидетельствуют о возможности потерь почвенного углерода в этих землях по сравнению с пахотными почвами. После трех лет зарастания брошенных посевов многолетних трав на болотных низинных почвах Мурманской области в слое почвы 0–20 см накоплено 0,07% С от уровня пашни. В среднем для шести- и восьмилетних залежей этих почв содержание органического углерода увеличилось соответственно на 0,2% и 0,46% С. В Свердловской области в течение 16 лет зарастания содержание органического углерода чернозема оподзоленного увеличилось на 0,94% С ($15,2 \pm 1,7$ т С/га), а дерново-подзолистые суглинистые почвы накапливали в среднем $0,08 \pm 0,03\%$ С/год ($1,40 \pm 0,46$ т С/(га/год)). В Московской области серые лесные почвы в среднем накопили около 0,5% С ($14,8 \pm 1,6$ т С/га) в течение 15ти лет; дерново-подзолистые суглинистые почвы – 0,3% С ($8,9 \pm 0,9$ т С/га) и дерново-подзолистые супесчаные – 0,6% С ($17,8 \pm 1,9$ т С/га) за этот период. Почвы молодых залежей Ставропольского края характеризовались потерями органического углерода в течение первых 3-5 лет зарастания ($2,2 \pm 1,2$ тонн С/га в год). К 12 годам зарастания почвы в среднем накопилось $11,0 \pm 5,3$ тонн С/га (Романовская, 2008).

На основании анализа данных полевых исследований были уточнены входные данные модели по запасам углерода исходных пахотных почв. Для адаптации модели RothC к специфике скоростей микробных процессов в зарастающих землях проведена калибровка констант минерализации органического вещества. Полученные экспериментальные результаты по интенсивности дыхания почв Московской области свидетельствуют, что наблюдается тенденция увеличения величины минерализованного углерода почв по отношению к его общему пулу в ряду пахотные земли, залежи разного возраста и лесные биоценозы. На примере исследования почв Мурманской области получен калибровочный коэффициент для условий северной тайги (понижение константы минерализации гумифицированного органического вещества почвы с четвертого года зарастания на 10%). Входные параметры модели RothC по ежегодному поступлению растительных остатков на

залежах были изменены в целях получения максимально приближенных результатов модельных расчетов к экспериментальным данным. Продуктивность растительности в зоне смешанных и широколиственных лесов Европейской части РФ и Урала имеет сходные зависимости: резкое нарастание продуктивности в течение первых 5-6 лет зарастания в результате развития однолетних и корневищных растений и затем снижение продуктивности. В менее благоприятных условиях северной тайги и сухих степей продуктивность растений нарастает практически линейно, постепенно достигая значений, характерных для целинных сообществ.

Для проведения моделирования поглощения CO_2 почвами залежных земель нами составлена карта ГИС, имеющая три взаимосвязанных слоя: почвенная карта России, карта типов растительности и административная карта страны. Выявлено 1206 полигонов пахотных земель, каждый из которых характеризуется уникальным набором почвенных, растительных характеристик и областной принадлежности. Для всех полигонов заданы начальные параметры модели по среднемесячным погодным данным в течение всех лет периода с 1990 по 2005 год. Начальный запас почвенного органического углерода определен по информации справочников и обзоров литературы и результатам собственных исследований. Ежегодную продуктивность растительности рассчитывали как долю от максимально возможной продуктивности луговых сообществ в данной растительной зоне, полученную по данным литературы. Значение долей определяли для каждого года на основе полученных зависимостей. Распределение площадей залежных земель по типам почв в каждом административном субъекте России было выполнено на основе соотношения площадей этих типов почв.

Результаты расчета с использованием откалиброванной для залежных земель модели RothC и на основании полученных входных параметров модели и рассчитанных площадей залежных земель показывают, что за период с 1990 по 2005гг. залежные земли России аккумулировали 248 млн. тонн С, что соответствует 910 млн. тонн CO_2 ($\pm 14,9\%$). В течение периода с 1990 по 1999 среднее ежегодное поглощение атмосферного CO_2 общей площадью залежных почв составляло около $41,1 \pm 28,5$ млн. тонн $\text{CO}_2/\text{год}$, а с 2000 по 2005 г. $83,3 \pm 15,6$ млн. тонн $\text{CO}_2/\text{год}$, что соответствует $1,08 \pm 0,45$ и $0,97 \pm 0,21$ тонн С/га в год по России. Постепенное снижение скорости удельной аккумуляции между 1990-ми годами и 2000-2005г. объясняется увеличением возраста залежей, которое сопровождается уменьшением интенсивности нарастания запасов почвенного углерода и, соответственно, скорости поглощения атмосферного CO_2 . Распределение величин удельного накопления почвенного углерода на залежных землях по территории России показывает увеличение поглощения углерода от северных регионов к центральным, при переходе от зон северной и средней тайги к южной тайге и смешанным лесам. И затем снижение аккумуляции углерода и даже его потери при переходе к южным регионам и степной зоне. Это распределение в целом повторяет изменение продуктивности луговых сообществ, которая может считаться ведущим фактором, воздействующим на изменение запасов углерода залежных земель. Максимальная продуктивность луговой растительности определена для зон южной тайги и смешанных лесов, а также в зоне луговых степей.

Литература

- Coleman K., Jenkinson D.S. RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil. In: Evaluation of Soil Organic Matter Models, Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U., Springel- Verlag Berlin Heidelberg.- NATO ASI Series.- 1996.- V. 138.- P. 237-246.
- Романовская А.А. Основы мониторинга антропогенных эмиссий и стоков парниковых газов (CO_2 , N_2O , CH_4) в животноводстве, при сельскохозяйственном землепользовании и изменении землепользования в России: Дис. ... докт. биол. наук.- М., 2008.- 419 с.

МОДЕЛИ АДАПТАЦИИ И ЭВОЛЮЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМ

Ростопшин Ю.А.

Институт системного анализа РАН, Москва, Россия
yurost@isa.ru

Аннотация: сделана попытка получения общего методологического подхода к моделированию самоорганизации и эволюции объектов современной биосферы.

В модельных биофизических теориях, моделях самоорганизации и эволюции (Эйген, 1973; Романовский и др., 1975) отбор осуществляется в соответствии с критерием селективной ценности. Более того, отбор реализуется как процесс оптимизации. Наибольшая приспособленность означает достижение максимальной селективной ценности. На рисунке 1 приведен пример отбора по Эйгену (Эйген, 1973) в системе четыре конкурирующих видов. ($W_1 > W_2 > W_3 > W_4$; W_i , ($i = 1, 2, 3, 4$) - величины параметра селективной ценности). Экспоненциальный характер решений указывает на высокую скорость отбора.

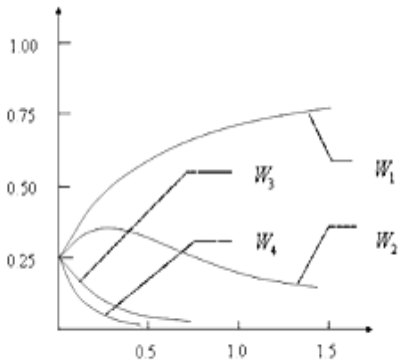


Рисунок 1.

Абсолютное большинство имеющихся моделей не учитывает влияние параметров среды внутренней и внешней среды системы на скорость воспроизводства.

Представляется, что включение в рассмотрение факторов, определяющих существенную нелинейность интенсивности процессов воспроизводства (Блюменфельд, 1974), может обогатить методологию моделирования их эволюции.

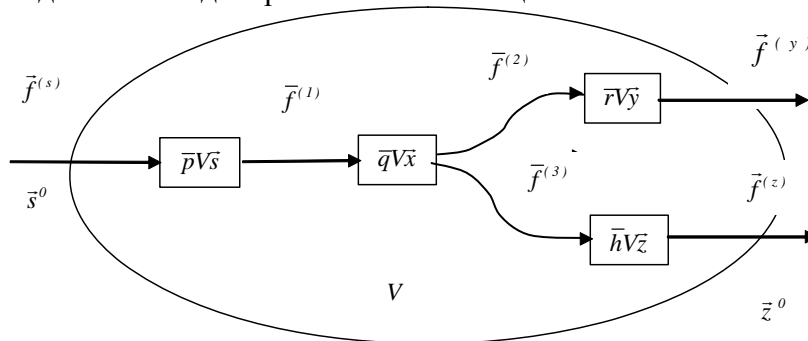


Рисунок 2. Схема открытой неравновесной системы

На схеме рисунка 2: f - потоки энергии между компонентами системы и между внутренней и окружающей средой; s, x, y, z - концентрации субстратов, энергоносителей, структурных элементов и конечных продуктов метаболизма в системе, а p, q, r, h - их удельные энергосодержания).

Рассматривается модель простейшего объекта, отвечающего схеме открытой неравновесной системы, представленной на рисунке 2. В предположении наличия субстратной стехиометрии, забуференности системы по субстрату и существенного отличия характерных времен процессов синтеза энергоносителя от характерных времен процессов синтеза элементов структуры $\tau_x \ll \tau_{y_i}$ можно ограничиться рассмотрением модели вида:

$$r_k V \dot{y}_k = f_k^{(2)} - f_k^{(y)}, \quad (k = 1, 2, \dots, K); \tag{1}$$

$$h_l V \dot{z}_l = \sum_{k=1}^K f_{k,l}^{(3)} - f_l^{(z)}, \quad (l = 1, 2, \dots, L).$$

Если принять, что $f_k^{(2)} = \alpha_k y_k$ и $f_k^{(y)} = \beta_k y_k$, то первая строка системы уравнений 1 идейно совпадает с моделями Эйгена М. и Чернавского Д.С. (Эйген, 1973; Романовский и др., 1975), а учет наличия зависимостей $\alpha_k = \alpha_k(\bar{z})$, $\beta_k = \beta_k(\bar{z})$; ($k = 1, 2, \dots, K$) от конечных продуктов метаболизма позволяет расширить познавательные свойства существующих моделей.

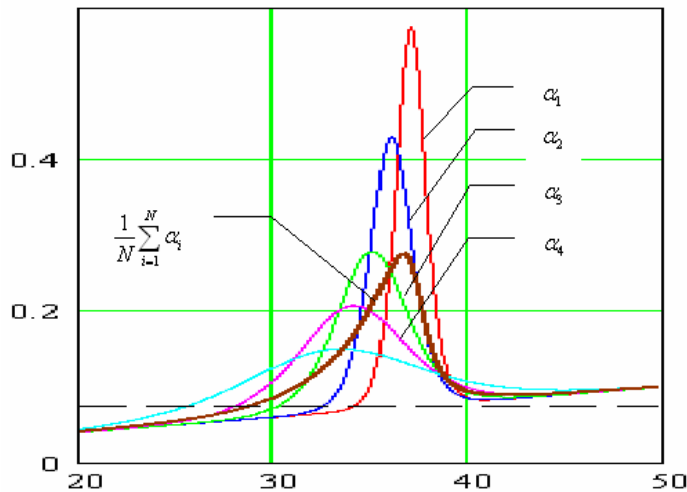


Рисунок 3.

$$\dot{y}_i = \beta_i \left(\frac{\alpha_i}{\bar{\alpha}} - 1 \right) y_i, \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

где: $\bar{\alpha}$ - меняющееся в процессе отбора среднее значение воспроизводства в системе.

Решения этой системы уравнений и динамика параметра $\bar{\alpha}$ имеют вид, представленный на рисунке 4.

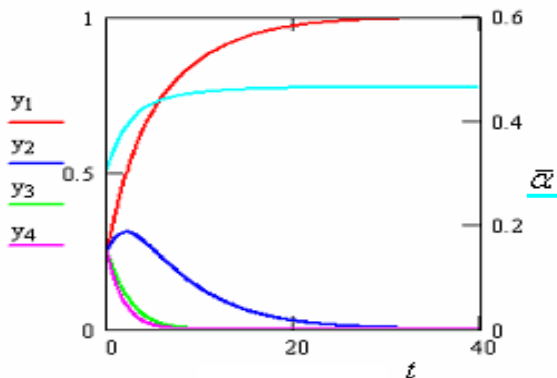


Рисунок 4.

Дальнейшая эволюция в направлении максимума продуктивности может осуществляться за счет изменений параметров состояния внутренней среды (за счет изменений площади контакта с внешней средой, проводимости границ и т.д.) в соответствии со вторым уравнением системы уравнений 1.

В докладе рассматривается возможная общая постановка методологии моделирования эволюции объектов современной биосферы, относимых к разряду неравновесных систем. Приводятся примеры моделирования таких объектов.

Литература

- Блюменфельд Л.А. Проблемы биологической физики.- М.: Наука, 1974.- 368 с.
 Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул.- М.: «Мир», 1973.- 216 с.
 Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическое моделирование в биофизике.- М.: Наука, 1975.- 344 с.

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВТ-РЕЗИСТЕНТНЫХ НАСЕКОМЫХ-ВРЕДИТЕЛЕЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ВТ КУЛЬТУРЫ

Русаков А.В.¹, Гоник М.М.¹, Нуриева Н.И.², Медвинский А.Б.^{1,2}

¹Институт теоретической и экспериментальной биофизики, Пущино, Россия
rusakov_a@rambler.ru

²Пушчинский государственный университет, Пущино, Россия

Аннотация: мы представляем и анализируем результаты математического моделирования сельскохозяйственной экосистемы, содержащей инсектицидные Вт-растения в условиях инвазии Вт-резистентных насекомых вредителей. Динамика продуктивности Вт культуры исследуется в пространстве параметров модели. Показано, что динамика и продуктивность Вт культуры зависит от пространственного распределения Вт-резистентных насекомых в ходе их инвазии в экосистему.

1. Введение

Использование генетически модифицированных (трансгенных) сельскохозяйственных культур в агротехнологиях 20-го века открыло большие перспективы в увеличении урожая. Трансгенные сельскохозяйственные культуры (Вт-растения), вырабатывающие Вт-токсин, открытый в бактериях *Bacillus thuringiensis* и наносящий повреждения личинкам насекомых-вредителей, получили широкое применение в агротехнологиях 20-21-х веков (Armstrong, 1995, Groot, 2002). Поскольку насекомые-вредители оказываются под постоянным воздействием токсина, их естественная селекция может привести к развитию устойчивости к такому воздействию. Полевые наблюдения, а также лабораторные исследования, показали возможность увеличения устойчивости к токсину основных видов насекомых-вредителей (Frutos, 1999, Janmaat, 2003, Tabashnik, 2003).

В связи с вышеизложенным, большой интерес представляют ответы на следующие вопросы: к чему может привести инвазия Вт-резистентных насекомых в агроэкосистему, содержащую Вт-растения и как такая инвазия повлияет на урожайность растений? Изучение механизмов, лежащих в основе нерегулярных колебаний биомассы растений и, соответственно, урожая на основании полевых наблюдений часто затруднено. Это связано с необходимостью длительных серий наблюдений; к тому же, на результаты таких наблюдений влияет множество трудно учитываемых факторов. В связи с этим, математическое моделирование является востребованным инструментом изучения динамики агроэкосистем. Исследования относительно простых, концептуальных моделей, описывающих основные связи между компонентами экологических систем, дают возможность распознать и проанализировать механизмы изменения размеров популяций (Medvinsky, 2002, Базыкин, 2004). Нами разработана математическая модель популяционной динамики системы, компонентами которой являются Вт-растения и насекомые-вредители.

2. Модель

Математическая модель учитывает следующие аспекты развития и взаимодействия насекомых и Вт-культуры: растения пересеваются в начале каждого сельскохозяйственного года (начальная биомасса растений распределяется равномерно по одномерной модельной среде), биомасса растений увеличивается за счет роста растений в течение всего сельскохозяйственного года и уменьшается за счет поедания растений насекомыми-вредителями. В начальный момент времени Вт-чувствительные насекомые-вредители распределены равномерно по всей среде. Модель учитывает негативное влияние Вт токсина, вырабатываемого растениями, на биомассу Вт-чувствительных насекомых. В отличие от Вт-чувствительных, Вт-резистентные насекомые в начальный момент времени распределены в узкой области в центре среды, их биомасса существенно ниже биомассы Вт-чувствительных насекомых, и Вт токсин не оказывает на них никакого действия. Изменение биомассы

насекомых зависит от пищевого ресурса, доступной биомассы растений. В модели учитывается увеличение биомассы насекомых во время их репродуктивного периода, а также время созревания личинок насекомых, которое является одним из исследуемых параметров модели.

3. Результаты

Результаты нашего исследования показывают, что инвазия Bt-резистентных насекомых-вредителей может приводить к существенным изменениям внутригодовой динамики биомассы растений, а также – динамики урожаев (наблюдались три типа динамики урожаев – неизменная год от года, регулярная и нерегулярная). Показано, что с течением времени Bt-резистентные насекомые-вредители могут вытеснять Bt-чувствительных насекомых. Пространственное распределение Bt-резистентных насекомых при такой сукцессии коррелирует с типом динамики урожаев. А именно, равномерное в пространстве распределение насекомых соответствует неизменным год от года урожаям, тогда как неравномерное распределение приводит к колебаниям урожая. Нами дана численная оценка неравномерности пространственного распределения насекомых (“шероховатость” распределения) и показано, что с увеличением “шероховатости” уменьшается урожайность и увеличивается нерегулярность урожаев.

Литература

- Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. Институт компьютерных исследований.- Москва, Ижевск.- 2004.
- Armstrong C.L., Parker G.B., Pershing J.C., Brown S.M., Sanders P.R., Duncan D.R., Stone T., Dean D.A., De Boer D.L., Hart J., Howe A.R., Morrish F.M., Pajean M.E., Petersen W.L., Reich B.J., Rodriguez R., Santino C.G., Sato S.I., Schuler W., Sims S.R., Stehling S., Tarochione L.J., Fromm M.E. Field evaluation of European corn borer control in progeny of 173 transgenic corn events expressing an insecticidal protein from *Bacillus thuringiensis*. // Crop Science. 1995. V. 35, PP. 550-557.
- Frutos R., Rang C., Royer M. Managing resistance to plants producing *Bacillus thuringiensis* toxins // Critical Reviews in Biotechnology. 1999. V. 19. PP. 227-276.
- Groot A.T., Dicke M. Insect-resistant transgenic plants in a multi-trophic context. // The Plant Journal. 2002. V. 31, 387-406.
- Janmaat A.F., Meyers J. Rapid evolution and the cost of resistance to *Bacillus thuringiensis* in greenhouse populations of cabbage loopers. // Trichoplusia ni. Proceedings of the Royal Society of London B. 2003. V. 270. PP. 2263-2270.
- Medvinsky A.B., Petrovskii S.V., Tikhonova I.A., Malchow H., Li B.-L. Spatiotemporal complexity of plankton and fish dynamics. // SIAM Review. 2002. V. 44. PP. 311-370.
- Tabashnik B.E., Carriere Y., Dennehy T.J., Morin S., Sisterson M.S., Roush R.T., Shelton A.M., Zhao J.-Z. . Insect resistance to transgenic Bt crops. Lessons from the laboratory and the field. // Journal of Economic Entomology. 2003. V. 96. PP. 1031-1038.

МОДЕЛИ ЭКОСИСТЕМЫ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Руховец Л.А.¹, Астраханцев Г.П.¹, Меншуткин В.В.¹, Минина Т.Р.¹, Петрова Н.А.², Полосков В.Н.¹

¹Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН, Санкт-Петербург, Россия

emi@emi.nw.ru

²Учреждение Российской академии наук Институт озераедения РАН, Санкт-Петербург, Россия

lake@spb.org.ru

Аннотация: представлен комплекс моделей экосистемы Ладожского озера, воспроизводящих круглогодичное функционирование его экосистемы. В моделях учитывается обмен субстанциями на границах вода – атмосфера, вода - дно; воспроизводятся процессы переноса субстанций, турбулентная диффузия и оседание, трансформация органического вещества и биогенов. Все процессы описываются с помощью начально-краевых задач для уравнений в частных производных.

Введение

Процесс перехода Ладожского озера за период 1961-1983 гг. из олиготрофного состояния в развитое мезотрофное стимулировал развитие исследований озера. Создание моделей его экосистемы было начато В.В. Меншуткиным. Третья по счету из этих моделей была создана в 1987 году (Меншуткин, Воробьева, 1987). На базе этих моделей авторами была создана серия трехмерных моделей экосистемы Ладожского озера с разной степенью подробности воспроизводящих функционирование основных звеньев экосистемы. В более ранних моделях использовалось два биогена – азот и фосфор. В моделях из (Астраханцев и др., 2003) функционирование экосистемы представлено как внутриводоемный круговорот фосфора, который является основным элементом, лимитирующим развитие экосистемы. Другие биогены – азот, углерод и кремний, поскольку их концентрация в воде Ладожского озера выше пороговых значений, лимитирующих создание первичной продукции, не включены в модель.

В моделях экосистемы Ладожского озера из (Астраханцев и др., 2003) наиболее подробно описан фитопланктон. В базовой модели (Menshutkin et al., 1998) фитопланктон представлен тремя экологическими группами (весенний, летний и осеннее-летний). В модели сукцессии (Rukhovets et al., 2003) фитопланктон представлен в виде совокупности девяти групп видовых популяций, названных по преобладающему в группе виду (доминанту). Представление зоопланктона в виде единой обобщенной биомассы в одной из моделей заменено представлением его в виде совокупности двух групп – мирного и хищного зоопланктона. В одну из моделей включен зообентос в виде единой обобщенной биомассы, распределенной по дну озера. В этой модели воспроизведен обмен фосфором на границе вода-дно. Во всех моделях учтен обмен кислородом на границе вода-атмосфера (Астраханцев и др., 2003).

В 2008 году авторами создана комплексная модель экосистемы Ладожского озера, в которой представлены все элементы и все моделируемые процессы из созданных ранее моделей.

Формулировка комплексной модели экосистемы Ладожского озера.

В новой модели, как и в предыдущих, воспроизводятся следующие процессы: перенос субстанций течениями, турбулентная диффузия и оседание, трансформация органического вещества и биогенных элементов, обмен кислородом на границе вода-атмосфера, обмен фосфором на границе вода-дно, В модели используется только один биоген – фосфор. Гидробионты представлены 9 комплексами фитопланктона, мирным и хищным зоопланктоном, зообентосом. Мертвое органическое вещество представлено в двух формах – детрит и растворенное в воде органическое вещество. К числу переменных, описывающих

состояние экосистемы, относятся также растворенный в воде минеральный фосфор и растворенный в воде кислород.

Перечислим переменные модели и их обозначения. В состав фитопланктона входят следующие комплексы (в мг/л сырой биомассы): диатомовые (*Ph1 – Aulacosira islandica*, *Ph2 – Asterionella Formosa*, *Ph3 – Diatoma elongatum*, *Ph4 – Fragilaria crotonensis*); желтозелёные (*Ph5 – Tribonema affine*); синезелёные (*Ph6 – Oscillatoria tenuis*, *Ph7 – Aphanisomenon flos-aquae*, *Ph8 – Microcystis aeruginosa*). Зоопланктон – это две экологические группы (в мг/л сырой биомассы): Z_f – мирный зоопланктон (фильтраторы), Z_p – хищный зоопланктон (хищники). Кроме того, в модели представлены: B – зообентос (в г P/м²); P – растворенные в воде минеральные формы фосфора (мкг P/л), DP – детритный фосфор, называемый далее детритом (в мкг P/л), DOP – растворенное в воде органическое вещество (в мкг P/л), OX – растворенный в воде кислород (в мг OX/л).

Всего в модели используется 16 переменных – больше, чем во всех предыдущих моделях авторов. Здесь уместно отметить, что это уже достаточно большое число переменных. Как показали вычислительные эксперименты, настройка модели оказалась достаточно трудоемкой.

Как и в предыдущих моделях (Астраханцев и др., 2003) все процессы описываются с помощью начально-краевых задач для систем дифференциальных уравнений в частных производных. Исключением является уравнение для биомассы зообентоса – это обыкновенное дифференциальное уравнение.

Существенной особенностью функционирования экосистем больших стратифицированных озер является долговременность их реакции на изменения внешних воздействий. Это время сравнимо со временем условного водообмена. Для Ладожского озера это время не менее 12 лет. В этой связи для воспроизведения круглогодичного функционирования экосистемы Ладожского озера созданы дискретные модели, позволяющие проводить расчеты на времена, сравнимые со временем условного водообмена. Для этого модели были согласованы с дискретными моделями гидротермодинамики водоема, и для них выполняются дискретные законы сохранения (изменения) субстанций.

Применение моделей.

С помощью созданных моделей для Ладожского озера были решены следующие задачи:

- воспроизведен процесс антропогенного эвтрофирования Ладожского озера для периода 1961-2005;
- определены допустимые пределы антропогенной, прежде всего, фосфорной нагрузки на водоем;
- получены оценки возможных изменений в экосистеме озера в результате изменения климата на его водосборе под влиянием глобального потепления;

В настоящее время с помощью моделей исследуется проблема, которую кратко можно сформулировать как вопрос: может ли озеро «вернуться» в олиготрофное состояние при снижении антропогенной нагрузки.

Литература

- Астраханцев Г.П., Меншуткин В.В., Петрова Н.А., Руховец Л.А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер (Под ред. Л.А. Руховца).- СПб.: Наука. 2003.- 364 с.
- Меншуткин В.В., Воробьева О.Н. Модель экосистемы Ладожского озера // Современное состояние экосистемы Ладожского озера.- Л.: Наука, 1987.- С. 187-200.
- Menshutkin V.V., Astrakhantsev G.P., Egorova N.B., Rukhovets L.A., Simo T.L. Mathematical modeling of the evolution and current conditions of the Ladoga Lake ecosystem // Ecological Modelling.- 1998.- V.107.- P. 1-24.
- 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.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ ЮЖНОЙ ТАЙГИ НА ОСНОВЕ ДИСТАНЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Сандлерский Р.Б.

Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия
srobert_landy@mail.ru

Аннотация: выполнен расчет термодинамических параметров преобразования энергии экосистемами южной тайги (Центрально-лесной заповедник) по мультиспектральной дистанционной информации для различных сезонов. Проверена реализуемость фундаментальных термодинамических соотношений в системах с активным функционированием живого вещества с различными собственными свойствами и в различных состояниях.

Введение

Развитие данных дистанционного зондирования в последние десятилетия позволяет расширить область их применения в качестве инструмента для измерения параметров функционирования ландшафтного покрова. Измерения отраженной солнечной энергии в различных спектральных диапазонах в сопоставлении их с солнечной постоянной позволяют количественно оценить приходящую, отраженную и поглощенную экосистемой солнечную энергию. Мультиспектральность дистанционных измерений дает возможность оценить основные составляющие энергетического баланса экосистем: затраты приходящей солнечной энергии на эвапотранспирацию, производство биологической продукции, аккумуляцию в экосистеме и тепловое рассеяние.

Оценку составляющих энергетического баланса для экосистем логично осуществлять в терминах термодинамической модели. В настоящее время наиболее полная термодинамическая модель, позволяющая оценивать основные параметры преобразования энергии экосистемой по дистанционной информации, предложена С.Э. Йоргенсенем и Ю.М. Свирежеевым в монографии «Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems» (Jorgensen, Svirezhev, 2004). Предложенная модель позволяет получить для экосистемы основные термодинамические параметры функционирования на основе оценки неравновесности преобразования солнечной энергии экосистемой как степени отклонения реального спектра поглощения от равновесного. Ключевым параметром термодинамической модели является эксергия, максимальная работа, которую может совершить термодинамическая система при переходе в состояние равновесия со средой. Согласно авторам «Towards...» в экосистеме эксергия соответствует энергетическим затратам на два основных процесса функционирования – производство биологической продукции и эвапотранспирация. Существенным положением термодинамического подхода является также гипотеза увеличения эксергии экосистемами в процессе эволюции.

В настоящей работе на основе информационно-термодинамического подхода осуществлена параметризация преобразования энергии в ненарушенных экосистемах южной тайги (Центрально-лесной заповедник) по мультиспектральным данным дистанционного зондирования. Для оценки адекватности рассматриваемой системы измерения проверена реализуемость для рассчитанных параметров фундаментальных термодинамических соотношений.

Методы и материалы

Для экосистем южной тайги Центрально-Лесного заповедника (Тверская обл.) по пяти сценам съемки Landsat (март, апрель, май, июнь, сентябрь) с пространственным разрешением 28.5 x 28.5 м. были рассчитаны термодинамические параметры: приход солнечной энергии (Вт/м^2), поглощенная солнечная энергия (Вт/м^2), неравновесность преобразования поглощенной солнечной энергии (энтропия Кульбака, nit), эксергия (Вт/м^2) – затраты

энергии на эвапотранспирацию и производство биологической продукции $\text{Вт}/\text{м}^2$), энтропия отраженной солнечной энергии (nit), температура деятельной поверхности ($^{\circ}\text{C}$) и тепловой поток ($\text{Вт}/\text{м}^2$), связанная энергия ($\text{Вт}/\text{м}^2$) – переход энергии в тепловой поток и энтропию, приращение внутренней энергии ($\text{Вт}/\text{м}^2$) – аккумуляция энергии системой, идущей на поддержание межкомпонентных и межвидовых взаимодействий, локальные круговороты (почвообразовательные процессы, накопление углерода), вегетационный индекс ($\text{Вт}/\text{м}^2$) – отражает чистую биологическую продукцию. Расчет пришедшей и поглощенной солнечной энергии (энергетический баланс) осуществлялся по стандартным калибровочным формулам, приведенным в руководстве Landsat 7 Science Data Users Handbook. Расчет составляющих энергетического баланса и других параметров преобразования солнечной энергии осуществлялся по методике предложенной Йоргенсеном и Свирежевым (Jorgensen, Svirezhev, 2004). Для рассчитанных термодинамических параметров были осуществлены: верификация модели – проверка выполнимости основных термодинамических соотношений; оценки средних значений параметров для обобщенных типов экосистем территории Центрально-лесного заповедника (хвойные леса, лиственные леса, вывалы и вырубки, зарастающие поля, верховые сфагновые болота); оценка пространственно-временной динамики и инвариантности основных параметров преобразования энергии экосистемами для исследуемого ландшафта и для обобщенных типов экосистем.

Результаты и их обсуждение

Анализ соотношений термодинамических параметров для вегетационного периода показал, что, поток энергии поглощенный экосистемой перераспределяется по составляющим баланса с несколько различными механизмами и это перераспределение зависит от структуры системы выраженной через неравновесность. В период со снежным покровом преобразование солнечной энергии, по-видимому, определяется в основном теплоемкостными свойствами деятельной поверхности. Затраты энергии на синтез биологической продукции определяются степенью неравновесности системы преобразования солнечной энергии, однако при этом, эксергия – доля поглощенной солнечной энергии затрачиваемой на транспирацию и производство биологической продукции, рассчитываемая по алгоритму предложенному Йоргенсеном и Свирежевым (Jorgensen, Svirezhev, 2004) на основе оценки степени неравновесности системы, позволяет оценить только ту составляющую, которая связана с затратами энергии на эвапотранспирацию, то есть с исключительно физическими процессами, определяемыми разностью парцельных давлений влаги в почве и атмосфере и возможностями различных жизненных форм растений восстанавливать равновесие. Соответственно, трактовка эксергии в термодинамической модели Йоргенсона и Свирежева, определяющая ведущее значение вклада нестационарности в эксергию солнечной радиации, не получает полного подтверждения. Анализ пространственно-временного варьирования термодинамических переменных так же дал возможность оценить области несоответствия модели, в частности показано, что функционирование верховых болот не укладывается в предлагаемую термодинамическую модель.

Благодарности

Профессору, д.г.н. Ю.Г. Пузаченко (ИПЭЭ РАН) за постановку проблемы и общее руководство исследованием. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-05-00292-а.

Литература

Jorgensen S. E., Svirezhev Y. M. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems - Elsevier Ltd. The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford OX5 1GB UK, 2004. 369 p.
Landsat 7 Science Data Users Handbook, <http://ftpwww.gsfc.nasa.gov>

ИМИТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Саранча Д.А.

ВЦ РАН, Москва, Россия

saran@ccas.ru

Аннотация: предложен комплексный подход для моделирования эколого-биологических объектов. Он опирается на полный набор операций - от обоснования выбора объекта, построения набора моделей до формулирования гипотез о ведущих механизмах исследуемого явления. Данный подход использовался для построения набора моделей тундровых популяций и сообществ.

В проведенных эколого-биологических исследованиях под *имитационным моделированием* понималось следующее – это искусство использования ЭВМ в качестве инструмента интеллектуальной поддержки в междисциплинарном процессе *создания и анализа математических моделей* сложных иерархических систем *при неполных данных* о свойствах изучаемого объекта. Это способ создания моделей разной степени детализации, метод существенным, если не основными элементами которой, являются *методика обработки разноплановых данных* о моделируемом объекте.

Имитационное моделирование исходно создавалось как некоторая технология («имитационный конструктор»), включающая в себя наряду с методами использования вычислительных возможностей и указания по формированию моделей и ее анализу. Эта технология опирается на искусство использования *экспертных оценок* и результатов вычислительных экспериментов в процессе формирования, модификации и анализа математических моделей разной степени детализации, на искусство экологической интерпретации полученных результатов. Использование имитационных технологий дает возможность снять зависимость от «математического аппарата», выбирать функциональные зависимости «произвольного вида», требуемый уровень детализации, позволяет эффективно рассмотреть последствия введения различных гипотез, упрощений, проанализировать следствия из них. Открытость для междисциплинарного диалога, «модифицируемость, наглядность» имитационных моделей позволяют эффективно подойти к пониманию сути описываемого явления и выражению этого понимания в математической форме.

Процесс моделирования, особенно в переходной период, это задача с одновременно избыточностью, неполной и неизбежно неточной информацией. Имитационное моделирование позволяет собрать всю доступную информацию, перевести не только числовые, но и качественные (интуитивные) соображения биологов в компоненты имитационной модели. В рамках конкретной модели с помощью экспертных оценок, опираясь на физику процесса, происходит заполнение «информационных лагун». «Конкретность» существенна и при выборе упрощений, соответствующего уровня агрегирования. Главная сила имитационных моделей в возможности перестраивать модель в ходе вычислительного эксперимента, дать несколько моделей для количественного описания явления, что позволяет рассмотреть объект с возможно большего количества разных ракурсов.

Сдерживает широкое использование имитационных технологий неразвитость традиций их применения, наличие элементов недоверия к эффективности имитационных подходов. Ряд моментов связаны с «болезнями роста» и могут быть устранены при грамотном применении компьютерных технологий. Но есть принципиальный, неустранимый аспект – «угроза необозримости модели». Сложность анализа свойств моделей большой размерности приводит к необходимости согласования всех этапов моделирования, к проведению *комплексных исследований*. Такие исследования включают в себя всю последовательность операций от отбора и переработки исходной (биологической) информации, построения набора моделей до формулирования гипотез о ведущих механизмах

исследуемого объекта. Комплексные исследования наиболее полно представляют процесс создания, анализа и применения экологических моделей. Заложенные в таком подходе диалоговые возможности позволяют экспертам (биологам) проверять качество моделей, как в целом, так и по отражению отдельных механизмов. Методика комплексных исследований позволяет сформировать представление об изучаемом объекте, найти аналогичные механизмы в других сферах (формальных и неформальных) и реализовать их, с помощью предлагаемых средств интеллектуальной поддержки, в соответствующий набор моделей.

Эффективность комплексного подхода показана на примере *моделирования тундровых популяций и сообществ* (Саранча, 1997). Построение конкретных имитационных моделей тундровых популяций и сообществ привело к обоснованию упрощенных уравнений в виде *дискретных отображений* (Саранча, 2006), которые отражали важнейшие свойства исходной модели и в то же время допускали параметрические исследования. В результате проведенных исследований удалось *сформулировать количественные гипотезы о ведущих механизмах формирования колебаний численности тундровых животных*. Это позволило перейти на другой уровень описания, на использование индивидуально-ориентированных моделей (Перминов и др., 2003).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 07-01-00473).

Литература

Саранча Д.А. Количественные методы в экологии. Биофизические аспекты и математическое моделирование.- М.: МФТИ, 1997.- 283 с.

Перминов В. Д., Саранча Д. А. Об одном подходе к решению задач популяционной экологии // Математическое моделирование.- 2003. N 11.- С 45-53.

Саранча Д.А. Дискретные отображения и их применение в одной задаче количественной экологии // Сб. научн. тр.: Математика. Компьютер. Образование.- М.-Ижевск,- 2006,- вып. 13, т. 2.- С. 63-84.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНО – ОРИЕНТИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА КОЛЕБАНИЙ ЧИСЛЕННОСТИ ПОПУЛЯЦИЙ ЖИВОТНЫХ

Саранча Д. А.¹, Недоступов Э. В.²

¹Вычислительный центр им А. А. Дородницына РАН, Москва, Россия
saran@ccas.ru

²”МАТИ”- Российский государственный технологический университет им К.Э Циолковского, Москва, Россия
enedostupov@gmail.com

Аннотация: настоящий этап в развитии количественной экологии связан с привнесением в математическое моделирование нового метода исследования, получившего название индивидуально – ориентированного моделирования.

Индивидуально – ориентированное моделирование (ИОМ) – это новый способ использования компьютерных технологий в процессе создания математических моделей сложных иерархических систем при неполных и разноплановых данных об их свойствах. Использование моделей данного класса позволяет перейти на новый уровень детализации, позволяющий учитывать: эколого-физиологические свойства особей; особенности их взаимодействия - социальные механизмы; влияние на их поведение окружающей среды; сезонные факторы. Динамика моделируемого объекта определяется набором правил, определяющих поведение индивидуума, взаимодействующего с окружающей средой.

Основная трудность в изучении поведения животных - необходимость выделения из общего, сложного поведения отдельных деталей - элементарных составляющих. В данной работе, в качестве элементарной единицы используется достаточно сложный фрагмент поведения – «поведенческий акт» или активность. Каждая активность (или целый набор активностей) объединяются в отдельный программный модуль. Основная характеристика активности – приоритет. Параметр введен для возможности упорядочивания поведенческих актов, начиная с самого приоритетного - занимающего основное место среди всех проявлений жизнедеятельности моделируемого индивидуума. Это позволяет решить проблему выбора преобладающей активности. Если окружающая среда или другие раздражители, побуждают особь сразу к нескольким активностям – выбирается наиболее приоритетная.

Программу, реализующую описываемую модель, можно разделить на три основные составляющие: вычислительная; набор модулей, реализующих активности; программа вывода и анализа результатов численных экспериментов. Вычислительная составляющая позволяет настроить модель, провести численный эксперимент и сохранить результат на физическом носителе. Она регистрирует новые модули, тем самым расширяет список доступных активностей в модели. Позволяет добавлять или исключать активности в численные эксперименты, предоставляет возможность динамической настройки всех параметров модели.

Регистрируя в модели очередной модуль, вы расширяете рамки моделируемых видов животных. Что придает данной модели статус универсальности. Становится возможным моделировать динамику численности популяций различных видов животных, формируя свойственный им набор поведенческих актов и манипулируя с их параметрами. Как пример, удаляя из эксперимента строительные активности (поиск убежища, строительство, благоустройство прилегающей территории), меняется биологическая группа моделируемого индивидуума. Вид, не способный существовать без убежища на протяжении всей жизни (сумчатые, насекомоядные, рукокрылые), перестает нуждаться в нем (копытные). Другая особенность используемой технологии – возможность самостоятельного создания модулей.

Данная модель относится к классу пространственно-распределенных моделей. Все моделируемые объекты ассоциированы с определенным положением в пространстве.

Пространство - дискретное, двумерное, описывается в виде дискретной сетки, состоящей из ячеек, размерностью $m \times v$. Каждая ячейка сетки характеризуется: высотой, наличием убежища, набором растительности, набором животных, набором видимых ячеек и сезонно – погодными характеристиками климата.

Предлагаемый подход к построению индивидуально – ориентированных моделей базируется на законе сохранения энергии. Изменение состояния особей и участков ареала представляет собой взаимные преобразования вещества и энергии. Источником энергии в модели является пищевой ресурс: растительность или другие индивидуумы. Каждая особь потребляет пищевой ресурс для восполнения своих энергетических расходов, и создания энергетического запаса. Для связи энергетических единиц и единиц измерения биомассы, в модели введено понятие энергетической ценности ресурса.

Все моделируемые объекты характеризуются базовым набором параметров: возрастом, полом, стадией полового созревание, потенциалом жизнестойкости, весом, типом потребляемого ресурса, генотипом, скоростью передвижения, набором поведенческих актов. Каждая активность расширяет базовый набор, добавляя исключительные параметры. Потенциал жизнестойкости представляет собой некоторую переменную с областью изменения от нуля до единицы, которая описывает физиологическое состояние особи и изменяется при различных процессах. Энергетические запасы особи характеризуются весом. Если потребленное количество энергии превосходит энергетические затраты, особь увеличивает свой вес (создаются жировые отложения), в противном случае вес особи уменьшается.

В качестве объекта моделирования для вычислительного эксперимента выбрана популяция копытных леммингов (*Dicrostonyx torquatus chionopyes*) Западного Таймыра, для которых характерны достаточно регулярные колебания численности с периодом в три года.

Лемминги активны круглый год. Зиму часто проводят в гнёздах, устроенных под снегом, питаюсь прикорневыми частями растений. Кормится лемминг целый день с небольшими перерывами. Как правило, ведут одиночный образ жизни. В бесснежный период у самок с выводками часто выражена территориальность, а самцы беспорядочно передвигаются в поисках пищи. Самка приносит в год до шести помётов в среднем по 5-6 детёнышей; при обилии кормов лемминги размножаются даже под снегом. Молодые самки могут принести свой первый приплод в возрасте всего 2-3 месяцев; самцы половой зрелости достигают на 6-8 неделе. Продолжительность жизни — 1-2 года.

В данной работе, процесс индивидуального развития леммингов определен следующим набором поведенческих актов: поиск пищевого ресурса, его поедание, переваривание и запасание; поиск убежища, его строительство; спаривание, вынашивание потомства, роды с последующим выкармливанием; половое созревание, расставание с семьей; агрессия внутри семьи, охрана территории.

В результате проведения вычислительных экспериментов удалось воспроизвести характерные для Западного Таймыра колебания численности, с чередованием пиков численности через три года. Получена типичная зависимость численности популяции от времени. При различных начальных условиях значения численности популяции между максимумами и в них могут отличаться, но период остается тем же. Рост численности является следствием рождения новых членов популяции в период репродукции, а падение численности – следствием уменьшения потенциала жизнестойкости и смертности в остальное время года. Резкое падение численности в конце третьего года цикла – результат гибели животных во время бескормицы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 07-01-00473).

ГОРОДА КАК КОМПАРТМЕНТ БИОСФЕРЫ: ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРОДСКИХ УГЛЕРОДНОГО И АЗОТНОГО ЦИКЛОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

CITIES AS A COMPARTMENT OF BIOSPHERE: INVESTIGATING URBAN CARBON AND NITROGEN FLUXES AND FORECASTING CROSS-BOUNDARY POLLUTION

Свирижева-Хопкинс А.Ю.

Потсдамский Институт Климата (PIK), Потсдам, Германия
hopkins@pik-posdam.de

Abstract: most of the global population lives in urban areas where biogeochemical cycles are controlled by complex interactions between society and environment. We try to quantify urban alterations of C and N biogeochemical cycles and forecast the dynamics of local fluxes, as well as their contribution to the global level.

1. Most of the global human population lives in urban areas where biogeochemical cycles are controlled by complex interactions between society and the environment. An initial step towards understanding urbanisation interactions with the Biosphere is to characterize the area that contemporary cities occupy and their alterations of the main biogeochemical cycles, namely Carbon and Nitrogen. Although at present time the area of urban territories is relatively small (1,5-2%) and one could argue that the fluxes are relatively insignificant compared to the total ones, the paradoxes of exponential growth are well known, so that the factor being negligibly small these days could become significantly important in the near future. Even more, at present, cities are responsible for up to 97% of all anthropogenic carbon emissions. The urban population is growing rapidly, especially in the developing countries that creates additional pressure by overpopulated unsustainable cities on the environment and significantly changes the cycles. There are also more subtle, and up until the present time, weaker processes associated with the conversion of natural lands of the surrounding natural ecosystems and landscapes into urban lands. Such conversion inevitably takes place when cities are sprawling and additional “natural” lands become “urbanized”. Therefore, we first consider the dynamics of urbanization in order to assess its influence on the Biogeochemical cycles. Figure 1 shows the dynamics of relative urban area growth for the world, calculated for the eight regions using the two-parametric gamma-model (Svirejeva-Hopkins, Schellnhuber, 2008).

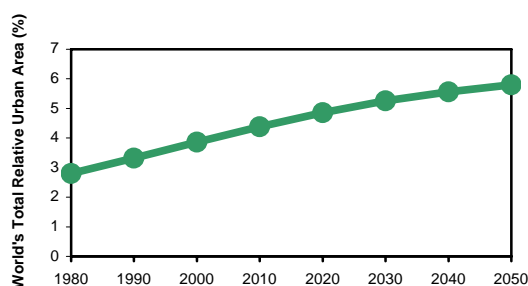


Figure 1. Dynamics of the world relative urban area

2. Next, we construct the local carbon cycle model for urbanized territories (Figure 2).

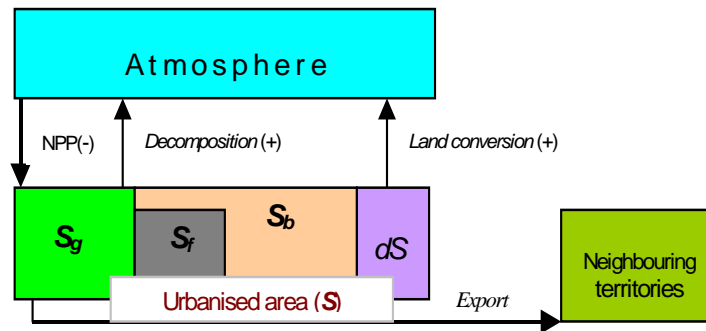


Figure 2. Diagram of carbon fluxes for a city

Here we consider two processes: carbon emissions as a result of conversion of natural lands caused by urbanization and the transformation of carbon flows by “urbanized” ecosystems, when carbon, accumulated by urban vegetation, is exported to the neighboring territories. The total carbon flow in the model depends, in general, on two groups of parameters. The first includes the Net Primary Production and the sum of living biomass and dead organic matter of ecosystems involved in the process of urbanization, derived from the Bazilevich’s Biome map. The second group of parameters deals with the areas of urban territories, (S_g - green area, S_b - build up and S_f - favelas- informal settlements and their annual increments, dS). As a result we determine whether regional urban areas are the source, sink or neutral in relation to the Global Carbon Cycle.

3. Nitrogen cycle is more complex than Carbon cycle and is even more closely interlinked with the other major biogeochemical cycles, such as oxygen and water. Figure 2 shows the diagram of in and out fluxes of urban nitrogen.

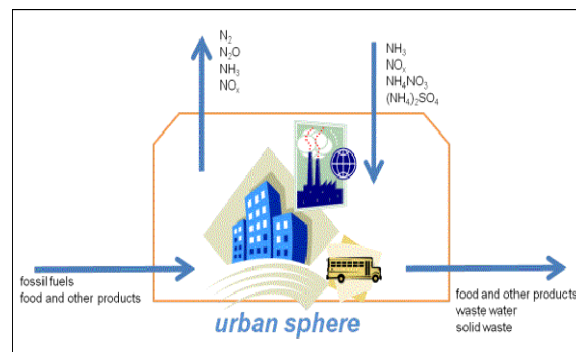


Figure 3. Diagram of urban nitrogen fluxes

The system of food and water supply, NO_x emissions from energy use and transportation, as well as liquid waste carried by water out of the system “city” is investigated. When we know the yearly amounts of carbon and nitrogen, produced by a hypothetical city, we are capable of coming up with what could be called a complex “biogeochemical portrait” of urban territory and its functions; and based on the scenarios of population growth forecast the dynamics of anthropogenic emissions.

Literature:

- Svirejeva-Hopkins, A., Schellnhuber H.-J. Modeling Carbon Emissions from Urban land conversion: Gamma distribution Model. “Ecological Modelling”, 216/1. 2008. Special issue.
- Svirejeva-Hopkins, A. Urbanization as a Global Ecological Process. In Encyclopedia of Ecology, Elsevier. 2008.
- Svirejeva-Hopkins, A. et al. European Nitrogen Assessment Report. Chapter 10. Dispersion and managements of nitrogen in urban landscapes. (www.nine.esf.org) (in writing).

ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПАСОВ ПОДСТИЛКИ В БОЛОТНЫХ БЕРЕЗНЯКАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Секретенко О.П.¹, Ефремова Т.Т.², Аврова А.Ф.

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия

¹sekretenko@forest.akadem.ru

²efr2@ksc.krasn.ru

Построены эмпирические вариограммы, описывающие пространственную вариабельность запасов подстилки в болотных березняках различных типов. Корреляция запасов подстилки после вычитания трендовой составляющей значима на расстояниях до 30 метров и объясняется мозаичностью растительного покрова типов леса, связанных с особенностями гидрологического режима.

Пространственная изменчивость запасов подстилки, содержащей существенную часть органического вещества лесных экосистем, в настоящее время признается высокой, однако изучена недостаточно. В наибольшей мере это справедливо в отношении болотных лесов, особенно болотных березняков, занимающих в Западной Сибири значительные территории. Цель данной работы состоит в количественном описании пространственного распределения запасов подстилки на примере экологического профиля, заложенного в болотном березняке, методами геостатистики, широко используемыми в последние десятилетия в экологии и почвоведении (Гумматов и др., 1992; Благовещенский и др., 2006; Wang et al., 2009).

Объектом исследования послужили насаждения берёзы пушистой, расположенные в пределах евтрофной часть Еловочного болота – одного из наиболее крупных лесоболотных массивов междуречья Оби и Томи. На массиве сформировалась локально обособленная внутриболотная гидрографическая сеть, стержневым элементом которой является река Еловка. От ее русла вглубь торфяного массива был проложен экологический профиль размером 270 м × 50 м, на котором в течение трех лет (2004 – 2006 гг.) запас подстилки определялся в семидесяти точках опробования (рисунок 1). Вдоль профиля наблюдается смена типов леса от крупнотравных до сфагново-мёртвопокровных. Средняя часть профиля на расстояниях от 100 до 140 метров от реки имеет понижение на глубину 20-30 см, так как пересекается тальвегом – одним из боковых ответвлений сети стока, по которому весной проходит поток талых вод. По мере удаления от русла изменяется уровень почвенно-грунтовых вод, снижается их проточность, уменьшается плотность сложения и зольность торфяного субстрата, возрастает его кислотность, что обуславливает соответствующую смену доминирующих растительных группировок. Таким образом, свойства подстилки, зависящие как от гидрологических условий, так и от характера растительного покрова, закономерно изменяются вдоль профиля. Тренд, характеризующий распределение средних за период наблюдения запасов подстилки (Z) по площади профиля, описывается полиномом второго порядка: $Z = 5.25 + 2.8 \cdot 10^{-2} X + 7.6 \cdot 10^{-5} X^2$, в котором коэффициенты при X и X^2 оказались значимо от нуля не отличающимися.

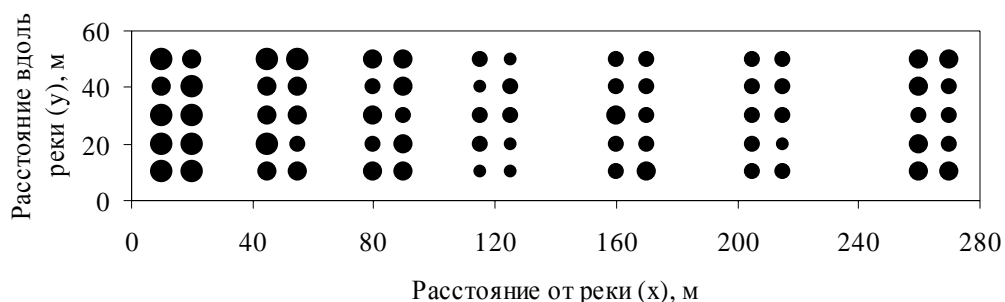


Рисунок 1. Схема расположения на экологическом профиле мест отбора образцов подстилки. Площади маркеров пропорциональны запасам подстилки

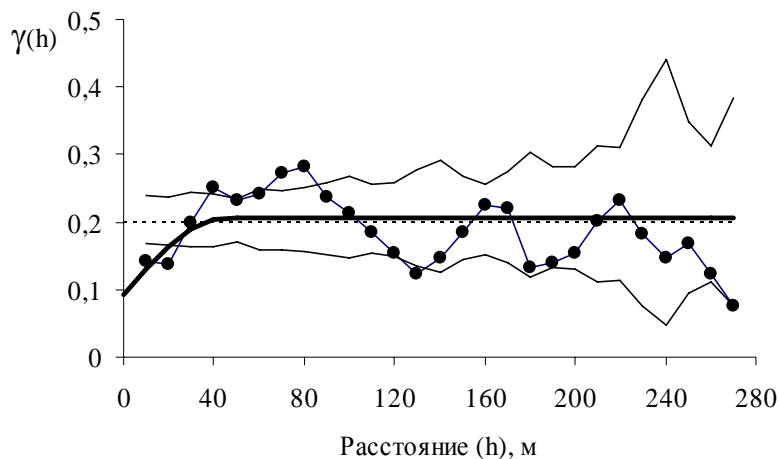


Рисунок 2. Эмпирическая вариограмма остатков средних запасов подстилки (линия с маркерами) с 95%-ными доверительными интервалами (тонкие линии), дисперсия (пунктир) и сферическая модель вариограммы (сплошная линия) с параметрами: самородок 0,098, порог 0,21, радиус влияния 46м.

Эмпирическая вариограмма остатков, полученных после вычитания тренда из наблюдаемых значений, вычислялись по формуле

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(r_i) - Z(r_i + h)]^2$$

где r_i – координата i -той точки опробования, $Z(r_i)$ – значение показателя в этой точке, h – расстояние между двумя точками, $N(h)$ – число пар точек, отстоящих друг от друга на расстоянии h (Diggle, 2007). Для проверки гипотезы о независимом распределении значений остатков по площади методом Монте-Карло (Stoyan, Stoyan, 1994; Grabarnik, Särkkä, 2009) получены 95%-ные критические области вариограммы. Определены параметры сферической модели вариограммы (Демьянов и др, 1999), характеризующие вариабельность на малых расстояниях (нагет, или самородок), расстояние, на котором проявляется корреляция значений показателя (ранг, или радиус влияния) и значение вариации, которое имеет вариограмма на расстояниях, превышающих радиус влияния (плато, или порог).

В нашем случае после вычитания тренда пространственная корреляция запасов подстилки средней интенсивности проявляется на расстояниях до 46 метров, доля структурной составляющей по соотношению нагет/порог составляет 47%. Значимая корреляция наблюдается только до 30 метров, так как на этих расстояниях значения вариограммы находятся ниже критической области, соответствующей них независимому размещению (рисунок 2).

Литература

- Благовещенский Ю.Н., Богатырев Л.Г., Соломатова Е.А., Самсонова В.П. Пространственная изменчивость мощности подстилки в лесах Карелии // Почвоведение.- 2006.- №9.- С. 1029-1035.
- Гумматов Н.Г., Жиромский С.В., Мироненко Е.В., Пачепский Я.А., Щербаков Р.А. Геоэстатистический анализ пространственной изменчивости водоудерживающей способности серой лесной почвы // Почвоведение.- 1992.- № 6.- С. 52–62.
- Демьянов В.В., Каневский М.Ф., Савельева Е.А., Чернов С.Ю. Вариография: исследование и моделирование пространственных корреляционных структур // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. Обзорная информация. Вып. № 11. М.: ВИНТИ, 1999.- С. 33–54.
- Diggle P.J., Ribeiro P.J. Jr. Model-based geostatistics. NY.: Springer New York, 2007.- 228 p.
- Grabarnik P., Särkkä A. Modelling the spatial structure of forest stands by multivariate point processes with hierarchical interactions // Ecological Modelling.- 2009.- V 220.- P. 1232–1240.
- Stoyan D., Stoyan H. Fractals, random shapes and point fields. Chichester: John Wiley and Sons, 1994. 389 p.
- Wang L., Okin G.S., Caylor K.K., Macko S.A. Spatial heterogeneity and sources of soil carbon in southern African savannas // Geoderma.- 2009. V. 149.- P. 402–408.

НОВЫЙ ИНДЕКС КОНКУРЕНЦИИ НА ОСНОВЕ УГЛОВОЙ ОЦЕНКИ ЗОН ВЛИЯНИЯ СОСЕДНИХ ДЕРЕВЬЕВ

Сизов И.Е.

ИМПБ РАН, Пущино
iesizov@gmail.com

Аннотация: определение конкуренции за экологические ресурсы в древостое является задачей, при решении которой часто удобно использовать индексы конкуренции. Целью данной работы было создание нового индекса конкуренции, который мог бы учитывать не только разницу в размерах отдельных деревьев, но и оценивать неоднородность пространственного расположения соседних деревьев.

В данной работе предложен индекс конкуренции между отдельными деревьями в древостое, при вычислении которого влияние соседних деревьев на анализируемое дерево оценивается с помощью площади круговых секторов, построенных на основе касательных из центра анализируемого дерева к окружностям зон влияния соседних деревьев (рисунок 1).

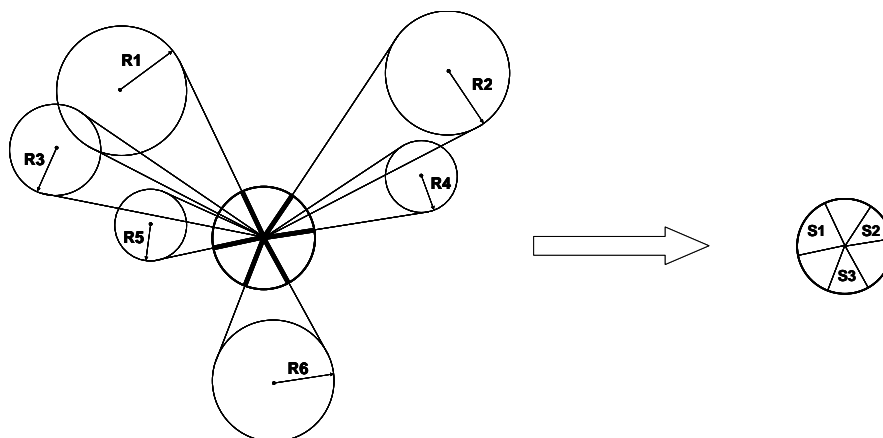


Рисунок 1. Зоны влияния соседних деревьев образуют круговые секторы на единичной окружности с координатами центра анализируемого дерева. Объединение данных секторов позволяет получить новые секторы S_1 , S_2 , S_3 , не имеющие пересечений друг с другом. R_1 - R_6 - радиусы зон влияния соседних деревьев

На рисунке 1 показано, что после того, как для каждого соседа вычислены радиусы зон влияния, из центра анализируемого дерева i проводится два луча, которые являются касательными к окружности зоны влияния дерева-соседа. Если построить единичную окружность с центром в точке, соответствующей центру анализируемого дерева i , то эти лучи будут образовывать сектор на единичной окружности. Объединение пересеченных секторов, образованных касательными к зоне влияния каждого соседа, является первым шагом алгоритма. В результате образуются секторы, не имеющие пересечений друг с другом (S_1 , S_2 , S_3 на рисунке 1).

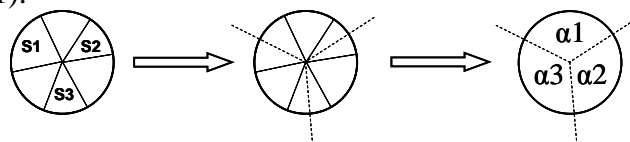


Рисунок 2. Углы α_1 , α_2 и α_3 образованы лучами, которые делят круговые секторы S_1 , S_2 , S_3 пополам

Далее (рисунок 2) откладываются лучи из центра единичной окружности, которые проходят по центру каждого образованного сектора и делят его пополам. Следующим шагом, необходимым при вычислении индекса, является вычисление углов между этими лучами (α_1 , α_2 , α_3 на рисунке 2).

Используя описанный выше алгоритм, можно построить индекс, который будет учитывать не только степень влияния каждого соседа по отдельности, но и совместное влияние всех соседей с учетом их взаимного расположения:

$$I_i = \frac{\bigcup_{j=1}^n S_j}{Q_i},$$

где

S_j – площадь сектора, образованного зоной влияния дерева-соседа j ,

$$Q_i = 1 + \frac{\sum_{j=1}^z \varphi_j}{2\pi},$$

$$\varphi_j = \begin{cases} 0, & \alpha_j \leq \frac{2\pi}{z} \\ \alpha_j - \frac{2\pi}{z}, & \alpha_j > \frac{2\pi}{z} \end{cases},$$

α_j – углы, полученные с помощью алгоритма, показанного на рис. 2,

z – число секторов, образованных в результате объединения (для рис. 1 и рис. 2 $z = 3$),

Q_i – показатель, определяющий насколько значения углов α_j близки к среднему углу ($2\pi / z$), если все углы α_j равны между собой, Q_i равен единице,

φ_j – функция, принимающая либо значение 0, если угол α_j меньше или равен среднему ($2\pi / z$), либо значение $(\alpha_j - 2\pi / z)$, если α_j больше ($2\pi / z$).

Данный индекс может быть полезен при моделировании конкуренции за экологические ресурсы в древостоях, имеющих сложную пространственную и возрастную структуры. Представляется интересным сравнение индекса на основе экспериментальных данных с другими индексами конкуренции, учитывающими неравномерность пространственного расположения соседних деревьев по отношению к анализируемому дереву. Проведение такого сравнения является предметом наших дальнейших исследований.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ КЛАССИФИКАЦИИ РАСТЕНИЙ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Смирнов В.Э.

*Учреждение Российской академии наук Институт математических проблем биологии РАН,
г. Пущино, Российская Федерация*
vesmirnov@rambler.ru

Аннотация: функциональный тип растений определяется как группа видов растений, сходных по некоторому набору функциональных свойств и по отношению к определенным средовым факторам, без учета филогенетической связи между этими видами. Функциональные типы растений могут быть использованы в качестве генерализованного описания почвенного покрова, что делает их важным инструментом в задачах моделирования динамики растительности.

Задачи выделения типов (групп видов) растений, так или иначе связанных с их функциональной ролью в экосистеме, имеют давнюю историю в экологии (обзор в Pillar, Orloci, 1993).

Функциональный тип растений (ФТР) определяется чаще всего как группа растений, образованная без учета их филогенетических связей, но с учетом сходства свойств видов и/или сходства их отношений к определенным внешним условиям, например, абиотическим факторам среды или степени нарушенности местообитаний. При этом различают функциональные группы отклика и функциональные группы эффекта (Lavorel, Garnier, 2002). Для формирования первых важен отклик видов на изменение экосистемных параметров, а для формирования вторых важна степень воздействия видов на экосистему (например, через продукцию биомассы или скорость разложения опада).

В большинстве случаев, однако, трудно разграничить отклик видов от их воздействия. Например, выпас зависит от структуры растительности и в то же время селективно удаляет биомассу – соответственно, можно разделить виды на ФТР по такому критерию, как влияние на интенсивность выпаса (некоторые растения поедаются лучше, некоторые – хуже), но сам выпас приводит к изменениям в растительном покрове (увеличивается «вес» ФТР, состоящих из видов, более устойчивых к поеданию животными). Кроме того, хотя растения, принадлежащие к разным ФТР, действительно могут играть разную роль в экосистемах, именно отклик видов на средовую вариацию, а не их экосистемные функции, формирует основу для большинства функциональных классификаций.

В отечественной геоботанике популярна концепция эколого-ценотических групп (ЭЦГ), которые более всего соответствуют функциональным группам отклика, поскольку ЭЦГ видов формируются по принципу сходства экологических и ценотических условий, в которых они произрастают.

Функциональные группы видов служат для обобщенного, генерализованного описания растительности, что делает их удобным инструментом при моделировании динамики экосистем с учетом воздействий разного рода. Так, например, они используются при построении моделей, связанных с воздействием пожаров на растительный покров, при моделировании динамики ландшафтной структуры, островных экосистем, эффектов вырубок леса, моделировании различных режимов землепользования, лесопользования, выпаса, влияния опада на биоразнообразие (Смирнов, 2008).

Опубликованные подходы к функциональному описанию растительности включают как дедуктивные методы, когда функциональные группы определяются в соответствии с личным опытом исследователя и аутоэкологической информацией, так и индуктивные, количественно анализирующие полевые данные или результаты полевых экспериментов. Индуктивные подходы могут быть, в свою очередь, разделены на неконтролируемые (unsupervised) классификации (приводящие к эмерджентным группам sensu Lavorel et al., 1997), получаемые кластеризацией матрицы «виды-функциональные свойства», и контролируемые (supervised) классификации, в основе которых лежат функциональные свойства или группы свойств, которые в наибольшей степени объясняют отклик видов на

средовую вариацию. Результат неконтролируемой классификации сильно зависит от входных данных, поэтому может заметно измениться при добавлении новых видов или видовых свойств. Хотя в последующем анализе эмерджентные группы могут обнаружить корреляцию со средовыми градиентами, такие классификации остаются неконтролируемыми в том смысле, что изначально игнорируют отклик видов на средовые градиенты. Это приводит к функциональным группам меньшей предсказательной ценности. Контролируемые классификации лишены этого недостатка, поскольку учитывают отклик видов на средовую вариацию, но при их проведении возникают иные трудности, прежде всего методического характера.

Из многочисленных опубликованных методов функциональной классификации растений только подход, при котором учитываются связи между свойствами видов, описаниями сообществ видов и средовыми факторами (или нарушениями), позволяет напрямую получать ФТР. Любой метод, не учитывающий один из указанных компонентов, ведет к выделению групп видов, которые, строго говоря, могут и не являться ФТР. Однако, получение всех трех типов данных представляет проблему, сужающую возможности применения подобных методов.

Предлагаемый нами подход (Смирнов и др., 2006) к разделению видов растений на ЭЦГ (которые мы рассматриваем как частный случай ФТР) позволяет обойти указанные проблемы путем привлечения экспертных данных. Эксперт фактически использует всю информацию о виде, хотя и не представленную в виде формальных данных, непосредственно пригодных для количественного анализа. В этом случае требуется лишь проверка, уточнение экспертной классификации видов.

Существенной особенностью нашего подхода является то, что такая проверка производится на основе стандартных геоботанических данных по видам с использованием общедоступных статистических методов. Эксперт может произвести классификацию видов по самым различным критериям, в зависимости от задачи: по отношению видов к тем или иным средовым факторам, нарушениям и т.п.

Следовательно, как было указано выше, наш подход может быть отнесен к контролируемым (supervised) функциональным классификациям комбинированного дедуктивно-индуктивного типа (или экспертно-статистического). Отметим также, что в результате анализа для каждого вида определяется количественная мера его принадлежности ко всем группам в системе, поэтому состав групп может пересекаться, т.е. получаемая классификация видов не обязательно является дискретной. Возможно определение видов, образующих ядра групп, и видов, занимающих промежуточное положение между группами, т.е. близких по свойствам к нескольким ЭЦГ. Алгоритм позволяет работать с любыми видовыми свойствами и классификациями видов, полученными не только экспертным путем, но и формальными методами.

Литература

- Смирнов В.Э. Функциональная классификация растений методами многомерной статистики // Математическая биология и биоинформатика.- 2007.- Т. 2.- № 1.- С. 1–17
([http://www.matbio.org/downloads/Smirnov2007\(2_1\).pdf](http://www.matbio.org/downloads/Smirnov2007(2_1).pdf)).
- Смирнов В.Э., Ханина Л.Г., Бобровский М.В. Обоснование системы эколого-ценотических групп видов растений лесной зоны Европейской России на основе экологических шкал, геоботанических описаний и статистического анализа // Бюлл. МОИП. Сер. Биологическая.- 2006.- Т. 111.- № 1.- С. 36–47.
- Lavorel S., Garnier E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits – revisiting the Holy Grail // *Funct. Ecol.*- 2002.- 16.- P. 545–556.
- Lavorel S., McIntyre S., Landsberg J., Forbes T.D.A. Plant functional classifications: From general groups to specific groups based on response to disturbance // *Trends Ecol. Evol.*- 1997.- 12.- P. 474–478.
- Pillar V.D., Orloci L. Character-based community analysis: The theory and application program. SPB. The Hague. NL. 1993.

ПОТОКИ КАРТ ПЛАСТИКИ РЕЛЬЕФА – ФОРМАЛИЗОВАННЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Степанов И.Н.

Институт биологического приборостроения Российской академии наук, Пущино, Россия
CEK-MO@rambler.ru

Аннотация: земная (почвенно-экологическая, ландшафтная, геологическая) поверхность суши материков, дна морей и океанов представлена живописными древовидными структурами, которые мало кому известны. Для их обнаружения разработан картографический метод пластики рельефа, описанный ниже.

Введение. Имея многолетний опыт картирования почв и экосистем, могу с уверенностью сказать, что выделяемые на современных тематических картах формы природных объектов не отражают реальность. Причина – игнорирование форм горизонталей топографических карт. Отсюда – произвол в проведении границ экосистем и почв. Нами предложен, ныне широко используемый, метод пластики рельефа, который переводит семиконтинуум горизонталей в дисконтинуум, создавая выпуклые ареалы – потоки.

Объекты и методы. Любая тематическая карта создается на основе горизонталей, которые являются объектом наших исследований (рисунок 1, А). Нами найден способ их преобразования. Технология преобразования заключается в том, что на каждой горизонтали выделяются точки нулевой плановой кривизны, которые затем соединяются изолинией – морфоизографой (рисунок 1, В). В результате создается «карта пластики рельефа» с естественными ареалами – «динамическими потоками». Каждый такой поток имеет начальную точку (репеллер), а его концевые части всегда «устремлены» к самым низким точкам (или линиям) бассейна стока, названным аттракторами. Метод пластики противопоставлен традиционному методу (рисунок 1, С), на основе которого построены все ныне существующие почвенные и ландшафтные карты. Если метод пластики (В) обязывает выделять на карте каждое понижение и повышение, фиксированное изгибами горизонталей (А), то традиционный метод (С) не замечает этих различий, произвольно, без правил, объединяя в один выдел все понижения и повышения.

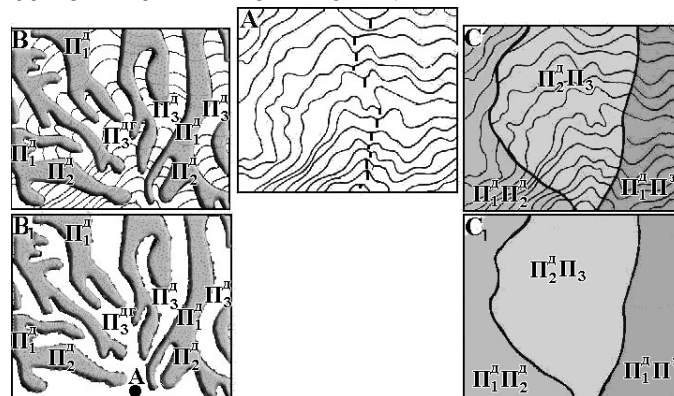


Рисунок 1. Сравнение узоров двух почвенных карт В и С, составленных по одним и тем же горизонталям карты М 1:10 000 (А). В – карта пластики рельефа; С – карта элементарных ареалов (Методические рекомендации, 1989). На карте В выпуклости-потоки (закрашены), белый фон – вогнутости. На картах В₁ и С₁ горизонталы сняты

Результаты. Необычные по красоте древовидные узорами возникли в результате длительного взаимодействия гравитационных, электромагнитных и других полей (рисунок 2). Обычно используемые географами понятия «равнины», «долины», «холмы»

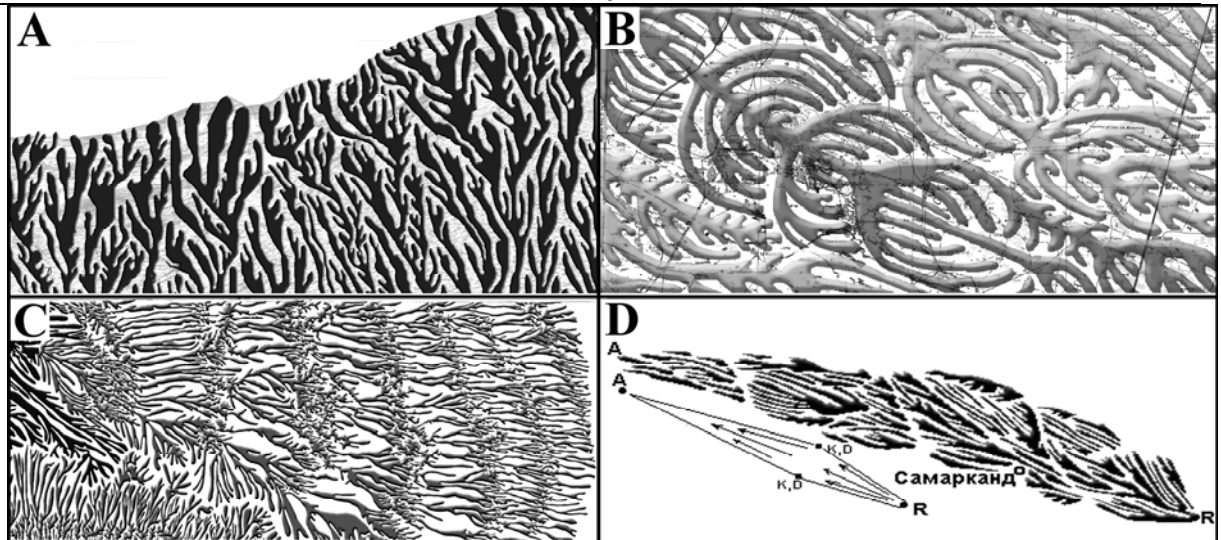


Рисунок 2. Древоподобные системы на картах пластики рельефа длиной около 100 км (В - Прикаспий, С – долина р. Терек, D – долина р. Зеравшан), а также вертикальный геологический профиль толщи рыхлых отложений Африки (Нигерия) до глубины 3 км (А)

на самом деле представлены потоками, сплошь покрывающими континенты, дно морей и океанов. В природе нет вымышленных «равнин» и «долин»; им суждено оставаться только в эмпирии наук о Земле. В теории же имеют место естественные тела – древоподобные потоки. Характерно, что эти потоки пронизывают земную кору не только в виде вулканических пород, но и землистых масс (рисунок 2, А), напоминая рост деревьев и ставя загадки в их генезисе (Степанов, 1986, 2003, 2006).

Обсуждение результатов. Видимо, экологам следует фиксировать на тематических картах естественные формы потоков, согласно правилам (рисунок 1,В), а не придумывать не существующие в природе ареалы (см. рисунок 1, С). Потоки приближают нас к точным наукам, так как имеют сходство с диссипативными структурами и фракталами. Потоки – носители информации о прошлом и настоящем движении земного вещества в поле земного тяготения. Прежние статические формы ареалов почвенных и экологических экосистем (рисунок 1, С) заменены динамическими ареалами – потоками (рисунки 1,В; 2). Потоки – одна из форм почвенно-экологического движения земного вещества. Люди, не ведая того, ходят по этим живописнейшим каркасам земной коры. Они строят на них дома, заводы, каналы, мелиоративные системы, извлекают из них полезные ископаемые, не отдавая себе отчета в том, что этими действиями они активно изменяют не только вещество (на что всегда обращалось внимание), но и хрупкую структуру древоподобных потоков. Выявление древоподобных узоров и установление механизма их происхождения, распространения, влияния на эволюцию живого вещества – важная задача экологии XXI в.

Выводы. Стремление формализовать процедуру составления тематических карт привело к установлению на новых картах пластики рельефа потоков – реальных физических структур земной поверхности. К их изучению можно привлечь методы приближенной симметрии, а не обозначать произвольные ареалы традиционных карт буквенными индексами или значки, под которыми ошибочно привыкли понимать слово «структура». По сути, истинными структурами земной поверхности еще никто не занимался. Их установление возможно только на картах пластики рельефа.

Литература

- Методические рекомендации. Составление крупномасштабных почвенных карт с показом структуры почвенного покрова. Почвенный институт им. Докучаева, 1989.- 56 с.
Степанов И.Н. Формы в мире почв.- М., Наука, 1986.– 192 с..
Степанов И.Н. Пространство и время в науке о почвах.- М.: Наука, 2003.– 184 с.
Степанов И.Н. Теория пластики рельефа и новые тематические карты.- М.: Наука. 2006.-230 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПОЧВЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ВЛАЖНОСТИ НАБУХАНИЯ

Сулейманов Н.Р., Аббасова Р.Я.

Институт почвоведения и агрохимии НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан
terrasoil@rambler.ru, reyxan_abbasova@rambler.ru

Аннотация: параметром несущей суммарную информацию о действующих сил на влагу в дисперсной среде, сочетающих в себе быстрые и медленные сорбционные процессы, является влажность набухания почвы, куда входят все почвенные гидролитические константы. Предлагается математическая модель определения глубины активного слоя набухающих почв относительно лимитирующего фактора распределения влаги в набухающей почвенной среде – влажности набухания почвы.

1. Введение

В формировании солончаков естественного происхождения преобладающая роль принадлежит аридности климата региона, что обуславливает экстремальность гидротермического режима почв, проявляемую в абсолютно высоких и низких граничных значениях диапазона температуры колебаний в течение года. Экстремальность почвенно-мелиоративной ситуации проявляется на фоне низкой естественной водопроницаемости тяжелых почв, что делает невозможным опреснение почв под влиянием естественных климатических факторов, а отсутствие естественной дренированности территорий делает невозможным применения интенсивных мелиоративных приемов с применением больших промывных норм на фоне постоянного горизонтального дренажа.

В связи с вышеизложенным приобретает актуальность разработка более совершенных почвенно-экологических приемов, предусматривающих лучшее согласование процессов влаго- и солепереноса с естественными природными процессами, с максимальной адаптацией к потенциальным возможностям почвенной среды элементарного почвенного ареала, в частности, ландшафта в целом.

2. Объект и методы исследований

Опытный участок расположен на территории Сиязань-Сумгаитского массива, физико-химические показатели почв дают возможность классифицировать почвы данной территории тяжелоглинистым, омергелованным, примитивным, сильносолонцеватым солончаком, с элементарными признаками естественного плодородия (гумус 0,9%), недостаточного для развития традиционной обильной степной растительности. Плотность почвы естественного сложения $d_v = 1,38 \text{ г·см}^{-3}$, а капиллярная влагоемкость – 23,2 % [8].

Для разработки приемов, основанных на принципах экологической оптимизации земельных мелиораций, выдвинутых академиком В.Р.Волобуевым, предусматривающих лучшее согласование процессов, происходящих под влиянием природных факторов с процессом выщелачивания солей (Волобуев, 1963, 1981), и получивший развитие в работах Н.Р.Сулейманова, выдвигавшего теорию реальной пористости набухающих дисперсных сред, концептуальную основу которого составляет идея трансформации структурного состояния почвенной среды в смешанную, с реальной пористостью, больше объема набухания почву (Сулейманов, 2002, 2005). Теоретической предпосылкой идеи является компенсация отрицательного эффект набухания – потеря свободной пористости почв при увлажнении (Воронин, 1986; Злочевская, 1969, Овчаренко, 1961, Сулейманов, 2002, 2005, 2007) и обеспечении обратимости процесса.

3. Результаты исследований

Исследование связи между кинетикой набухания и капиллярным насыщением влаги почвой указывает на тесную асинхронность кривых, что дает возможность оценить процессы с позиции гидратации почвенных частиц и дифференциации кривых на характерные участки, обуславливаемые гидролитическими константами почвы (рисунок).

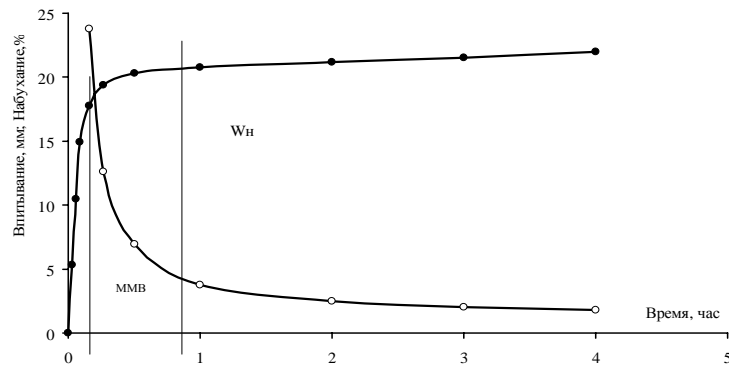


Рисунок. Согласование кривых кинетики набухания и впитывания с гидролитическими константами почвы

Из рисунка следует, что главным параметром несущим суммарную информацию о действующих силах, сочетающих в себе быстрые и медленные сорбционные процессы, является влажность набухания (W_n) почвы, куда входят все почвенные гидролитические константы.

Исследование механизма набухания почв и процесса поэтапного развития увлажнения почв дало возможность разработать модель расчета глубины увлажнения относительно влажности набухания, которая приводится ниже:

$$h_m = P_{at} h_n [W_s^{-1} + \exp(W_s - HB + 1)]$$

где, h_m – глубина промачивания почвы, см; P_{at} – атмосферные осадки, мм; h_n – высота почвенного образца, мм; W_s – влажность набухания, мм; HB – наименьшая влагоемкость почвы.

5. Выводы

Влажность набухания является лимитирующим фактором передвижения влаги между слоями почв тяжелого механического состава, склонными к набуханию, что делает этот показатель основным при расчете глубины промачивания. Предлагается формула расчета предельных значений зоны увлажнения почв от воздействия атмосферных осадков с использованием этого показателя.

Литература

- Волбуев В.Р. Экология почв.- Баку: Элм, 1963.- 259 с.
Волбуев В.Р. Некоторые философские вопросы почвоведения // Почвоведение.- 1981.- №2.- С. 5-11.
Воронин А.Д. Основы физики почв.- М.: МГУ, 1986.- 244 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. Определение плотности тяжелых почв в монолитах // Труды Всерос. Конф. «Экспериментальная информация в почвоведении: теория и пути стандартизации».- М.: МГУ, 2005.- С.223-224.
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 International Congress. Baku: 2007.- P.452-455.

МОНИТОРИНГ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОЧВЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИРОДНОЙ МОДЕЛИ

Сулейманов Э.Н.

Институт почвоведения и агрохимии НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан
astadan@rambler.ru

Аннотация: в статье рассматриваются различные экосистемы, подвергнутые трансформациям в процессе эволюции, предлагается параметр–коэффициент экологической напряженности почвенной среды $K_{эн}$ и приводятся математическая модель расчета значения этого параметра для различных экосистем ландшафта в интервале 0,4-1,0. Модель выделяется высокой адаптативностью к изменениям почвенной среды в процессе эволюции почвы.

1. Введение

Ландшафт как географический элемент земной поверхности является целостным динамически развивающимся телом, что делает ландшафтный проект природы совершенным. Составляющие её экосистемы и почвы взаимозависимы. Природа - это высокоорганизованная система, каждый элемент, которой должен рассматриваться в неразрывной связи с развивающимся целым. Это справедливо как для мира природы, так и для взаимодействия человека с природой, процесса познания вообще (Волобуев,1981).

Интенсивное земледелие, получившее широкое распространение после осуществления ирригационных проектов, предусматривает все большее вовлечение площадей под сельскохозяйственное использование. Появляется необходимость оценки сельскохозяйственной составляющей в потере естественного плодородия почв, в целях прогнозирования порога необратимых почвенных процессов (Мамедов, Гасанова, 2003; Сулейманов,2003).

2. Объект и методы исследований

Объектом исследований являются почвы бассейна реки Геокчай.

Созданная В.Р.Волобуевым теоретическая модель развития природы в целом, агроландшафта в частности является ключевым моментом теории эволюции почв, основной методологией в изучении функциональной зависимости элементов ландшафта.

Концептуальную основу экологического мониторинга почв составляет определение количественного развития между основными почвенными параметрами в определенном историческом отрезке времени. Методология экологического мониторинга почв допускает его осуществления относительно почвы, занятой естественной высшей растительностью, соответствующий высокому благополучному, экологическому состоянию – естественной модели, то есть под пологом леса.

3. Результаты исследований

Математическая модель, предложенная автором, дает возможность оценить почвенно-экологическую устойчивость почв ландшафта под различным углом зрения, то есть: оценка эволюционных изменений иерархически связанных–подчиненных почв ландшафта под различными экосистемами; оценка антропогенных изменений в связи ирригационными проектами в зоне нового орошения, как в отношении природного эталона выделяющегося по естественному плодородию соответствующей её высокому состоянию, так и по исходному состоянию почв; оценка почвенно-экологических изменений экосистем под воздействием естественных природных процессов более длительного времени (Сулейманов, 2003,2005).

$$K_{эн} = d_v^3 + G_3 + P_{Na}^3 + S^3 / [d_v^3 + G_\phi + \ln(P_{Na}^\phi / d_v^\phi C_{из}) + \ln(S_\phi / S_3)]$$

где, $K_{эн}$ -коэффициент экологической напряженности почвенной среды; d_v^3 – плотность почвы, г см⁻³; G_3 -содержание гумуса, %; P_{Na} -содержание Na в составе ППК, мэкв на 100 г почвы; S^3 -засоление почвы соответствующее состоянию почв под естественной

растительностью, %; d_v^ϕ -плотность почвы в момент измерения, г см⁻³; I_ϕ -содержание гумуса почвы в момент измерения, %; II_{Na}^ϕ -содержание Na в составе ППК в момент измерения, мэкв; S^ϕ -засоление почвы соответствующий к состоянию почвы в момент измерения (фактические значения), %; $C_{ил}$ -коэффициент, выражающий содержание илистой фракции почвы в момент измерения.

Исследование по применению математической модели для оценки почвенно-экологической ситуации показывает состоятельность коэффициента в отслеживании динамики (качественных и количественных) изменений почвенной среды поэтапного, генетического развития и смены экосистемы (таблица 1.).

Таблица 1. Оценка почвенно-экологического состояния горных почв по этапам развития

Тип почвы	Мощность, м	Плотность, г см ⁻³	Гумус, %	Ил, <0.001 мм, %	ППК, мэкв	Na в ППК, мэкв	Плотный остаток, %	$K_{эн}$
Горно-лесные бурые типичные (лес)	0,2	1,02	4,12	4,38	11,79	0,75	0,04	0,746
	0,5	1,12	1,48	1,74	4,41	0,29	0,02	
Горно-лесные бурые остепненные	0,2	1,12	7,54	8,68	17,94	1,28	0,07	0,585
	0,5	1,21	1,76	1,98	17,94	0,29	0,02	
Горно-коричневые лесные	0,2	1,18	2,71	6,70	20,81	0,568	0,17	0,893
	0,5	1,25	2,12	6,28	17,27	0,321	0,15	
	1,0	1,27	1,58	6,04	11,93	0,151	0,14	
Горно-коричневые послелесные	0,2	1,12	2,93	7,07	30,11	0,98	0,20	0,716
	0,5	1,21	2,18	6,75	26,53	0,94	0,15	
	1,0	1,30	1,59	5,47	24,82	0,78	0,15	

Значения коэффициента экологической напряженности почв – $K_{эн}$, приведенные в табл. наглядно показывают изменения почвенно-экологической ситуации по этапам развития почв в цифровом выражении, согласно схеме эволюции почв горных областей.

5. Выводы

Математическая модель, предложенная автором, дает возможность оценить почвенно-экологическую состояние почв ландшафта под различным углом зрения, то есть: оценка эволюционных изменений иерархически связанных–подчиненных почв ландшафта под различными экосистемами; оценка антропогенных изменений в связи ирригационными проектами в зоне нового орошения, как в отношении природного эталона выделяющегося по естественному плодородию соответствующей её высокому состоянию, также по исходному состоянию почв; оценка почвенно-экологических изменений экосистем под воздействием естественных природных процессов более длительного времени.

Литература

- Волбуев В.Р. Некоторые философские вопросы почвоведения // Почвоведение.- 1981.- №2.- С. 5-11.
 Мамедов Г.Ш., Гасанова А.Ф. Экологическая модель плодородия пастбищных земель Аджинаурской степи.- Баку: Элм, 2003.- 74 с.
 Сулейманов Э.Н. Мониторинг экологической напряженности почвенной среды агроландшафтов // Материалы Научно-практич. конф. посвященной 75-летию проф. Г.Б. Гальдина, Пенза: Россия, 2003.- С. 156-158.
 Сулейманов Э.Н. Показатель экологической напряженности почвенной среды агроландшафтов, Тезис. Докл. X Междунар. Конф. Студентов и аспирантов по фундаментальным наукам "Ломаносов-2003".- М.: МГУ, 2003.- С.134-135.
 Сулейманов Э.Н. Математическая модель расчета экологического состояния почвенной среды агроландшафтов // Мат. Общ. Почв. Азерб.- Т X.- Ч. I.- Баку: Элм, 2005.- С. 410-419.

МЕТОДЫ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Суховольский В.Г.

Институт леса им.В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия
soukhovolsky@yandex.ru

Аннотация: рассмотрена возможность использования при решении задач экологического моделирования подходов и методов физики конденсированного состояния. Предложены модели таких процессов, как вспышки массового размножения насекомых, сукцессии в лесных ценозах, лесные пожары, воздействия климатических факторов, реакция компонентов экосистемы на внешнее воздействие и др. Модели верифицированы на основе данных полевых исследований.

Существует определенное сходство между проблемами физики (в частности, теории конденсированного состояния и фазовых переходов) и проблемами экологического моделирования. Сложные системы (как физические, так и экологические) характеризуются огромным числом компонентов, между отдельными элементами системы существует разнообразные взаимодействия, пространственная структура систем характеризуется наличием ближнего и дальнего порядка. Поведение как физических, так и экологических систем зависит как от характера внешнего воздействия на них, так и от восприимчивости самих систем.

Безусловно, наличие такого сходства не означает, что методы, развитые в теории конденсированного состояния, можно автоматически переносить для решения задач экологического моделирования. Тем не менее, эти физические принципы (Абрикосов и др, 2004; Займен, 1982; Ландау, Лифшиц, 1964; Лебедев, 2004) можно использовать для решения задач экологического моделирования.

В работе рассмотрены следующие основные понятия, которые предлагается использовать для моделирования экологических систем:

- понятие о функции экологического риска и принцип минимума экологического риска для устойчивых экосистем и сообществ;
- понятие об экологических фазовых переходах первого и второго рода;
- понятие параметра порядка как макроскопической характеристики, описывающей поведение популяции, сообщества или экосистемы;
- понятие о внешних экологических полях и восприимчивости экосистем и сообществ к внешнему экологическому полю;
- представления о флуктуациях параметра порядка в ходе экологических фазовых переходов;
- понятие о ренорм-групповых преобразованиях в сообществах и экосистемах;

На основе предлагаемого подхода, в частности, показано, что смену пород в таежных лесных ценозах в ходе сукцессии, когда лиственные насаждения, сформированные березой и осинкой, заменяются на пихту, можно рассматривать как экологический фазовый переход второго рода, при котором параметр порядка q – доля деревьев хвойных пород в насаждении изменяется от нуля до величин, близких к единице (рисунок 1). При этом связь между фитомассой лиственных в насаждении и квадратом параметра порядка линейная, как и в простейшей модели Ландау фазовых переходов второго рода (Ландау, Лифшиц, 1964).

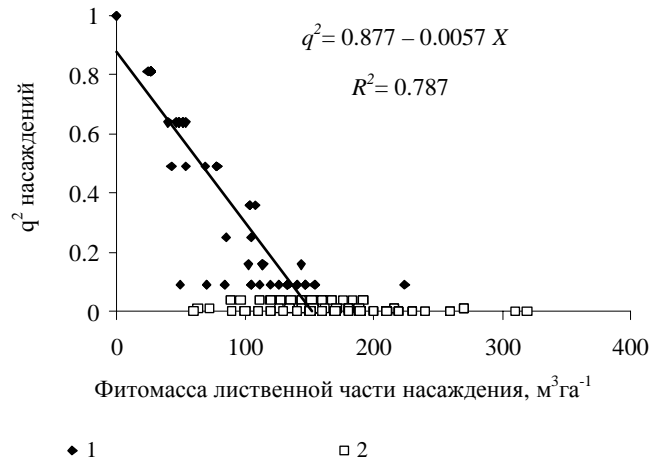


Рисунок 1. Связь между величинами параметра порядка q и запасом X лиственной части насаждений для смешанных и лиственных насаждений вейниково-крупнотравной серии типов леса (критическое расчетное значение $X_r = 150 \text{ м}^3 \text{га}^{-1}$, 1 – смешанные и хвойные насаждения, 2 – лиственные насаждения)

С гипотезой универсальности фазовых переходов второго рода в физических системах хорошо согласуются и полученные данные об экологических фазовых переходах. Так, модель фазового перехода в ходе вспышки массового размножения аналогична модели сукцессионных фазовых переходов (рисунок 2).

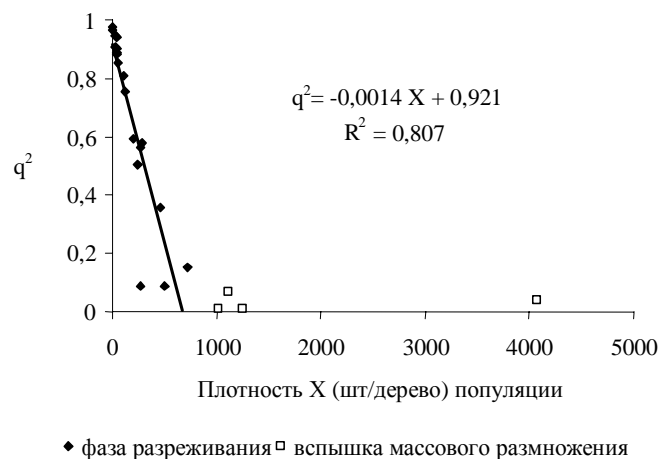


Рисунок 2. Связь квадрата параметра порядка q^2 и плотности X популяции сибирского шелкопряда *Dendrolimus superans sibiricus* Tschetv. на разных фазах градационного цикла.

Подобная универсальность существенно упрощает построение моделей процессов, происходящих в экосистемах (Суховольский, 2004; Суховольский и др, 2008).

Работа поддержана РФФИ (гранты 08-04-00217 и 09-04-00412).

Литература

- Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е. Методы квантовой теории поля в статистической физике.- М.: Добросвет, 2004.- 512 с.
 Займен Дж. Модели беспорядка.- М.: Мир, 1982.- 592 с.
 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика.- М.: Наука, 1964.- 567 с.
 Лебедев В.В. Флуктуационные эффекты в макрофизике.- М.: МЦИМО, 2004.- 256 с.
 Суховольский В.Г. Экономика живого.- Новосибирск: Наука, 2004.- 160 с.
 Суховольский В.Г., Исхаков Т.Р., Тарасова О.В. Оптимизационные модели межпопуляционных взаимодействий.- Новосибирск: Наука, 2008.- 168 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОЛИ БИОСФЕРЫ В КОМПЕНСАЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Тарко А.М.

*Учреждение Российской академии наук Вычислительный центр им. А. А. Дородницына
РАН, Москва, Российская Федерация*

tarko@himki.net

Аннотация: с помощью пространственной математической модели глобального цикла углерода в биосфере рассчитана роль биосферы в стабилизации количества двуокиси углерода, температуры атмосферы, параметров биоты суши в результате действия факторов глобального потепления: выбросов двуокиси углерода, вырубки лесов и эрозии почв. Сделаны расчеты последствия ограничений выбросов CO_2 в атмосферу на основе требований Киотского протокола к Рамочной конвенции о стабилизации климата и других сценариев.

Разработана система математических моделей глобальных и региональных процессов в биосфере. Система содержит точечные и пространственно распределенные модели биогеохимических циклов углерода и азота в системе «атмосфера – растения – почва» и «атмосфера – океан».

Были проведены расчеты динамики биосферных процессов с учетом влияния хозяйственной деятельности для всего мира, стран и регионов с помощью пространственной математической модели цикла углерода в системе атмосфера - экосистемы суши – океан (Моисеев и др., 1985, Тарко, 2005). В модели территория всей планеты разделена на ячейки размером $0.5 \times 0.5^\circ$ географической сетки (приблизительно 50×50 км). Предполагается, что на территории каждой ячейки суши находится растительность одного типа. Модель описывает процессы роста и отмирания растительности, накопления и разложения гумуса в терминах обмена углеродом между атмосферой, растениями и гумусом почвы в каждой ячейке суши. Климат в данной ячейке характеризуется среднегодовой температурой воздуха у поверхности земли и количеством осадков за год. Значения температуры и осадков для каждой ячейки суши в зависимости от количества двуокиси углерода в атмосфере рассчитываются с помощью климатической модели общей циркуляции атмосферы и океана ВЦ РАН (Пархоменко, 1988). Модель была дополнена моделью цикла углерода в системе «атмосфера – океан» (Тарко, 2005).

Моделировалась динамика биосферы с 1860 г. по 2100 г. Был принят следующий сценарий. Антропогенное поступление CO_2 в атмосферу происходит в результате промышленных выбросов CO_2 от сжигания ископаемых органических топлив (Marland et al., 2008), вырубки лесов, эрозии почв. После 2005 г. темпы роста промышленных выбросов сохраняются такими же, какими они были предыдущее десятилетие. С 1950 г. по 2100 г. идет вырубка и последующее уничтожение тропических лесов. Также идет эрозия почв, связанная с неправильной сельскохозяйственной эксплуатацией земель, соответствующее количество CO_2 поступает в атмосферу. Для вырубки и эрозии задаются соответствующие пространственные распределения.

Расчет динамики биосферных параметров показывает, что во все годы происходил рост CO_2 в атмосфере. Биосферная реакция на воздействия в целом замедляла его рост и приводила к росту продуктивности растений суши и увеличению их биомассы. Количество гумуса почвы сначала снижалось, а затем по мере проявления компенсаторных свойств биосферы увеличивалось. Согласно расчету, к 2050 г. следует ожидать роста концентрации углекислого газа в атмосфере Земли в среднем на 80% и средней температуры атмосферы на 0.85°C по сравнению с их значениями в 1860 г.

В большинстве стран выбросы углекислого газа в результате сжигания ископаемых топлив (каменного угля, нефти и газа) существенно превышают их поглощение биотой. Наибольшие выбросы в 2005 г. были у США, Китая и России. Больше всех стран CO_2

поглощает Россия, за ней идут Канада и Бразилия. У большинства стран выбросы превышают поглощение. Исключение составляют лишь Канада, Австралия, Бразилия и Швеция, у которых поглощение выбросов больше, чем выделение.

В теперешнем виде Киотский протокол не учитывает, что для учета выделения и поглощения двуокиси углерода важны не абсолютные значения, а разность выбросов и поглощения экосистемами суши. Для России и ряда других стран, у которых поглощение CO_2 максимально, такая постановка была бы выгодна.

Сейчас у России разность между выделением CO_2 при сжигании топлив и поглощением экосистемами близка к нулю. В результате, наибольшее возмущение естественной атмосферы двуокисью углерода от России минимально, а наиболее сильное нарушение количества CO_2 происходит от промышленно развитых стран (США, Япония) и от стран с наибольшим населением (Китай, Индия).

Выполнено несколько расчетов полного и неполного выполнения условий Киотского протокола, имеющего целью уменьшить выбросы CO_2 в атмосферу. Оказалось, что в девяти активно развивающихся и развивающихся странах с большим населением годовые темпы роста индустриальных выбросов CO_2 высоки и опережают темпы прироста численности населения (Индия, Индонезия, Бразилия, Пакистан, Бангладеш, Нигерия, Мексика, Вьетнам, Филиппины). Проведенные расчеты показали, что скоро в этих странах рост экономического развития и численность населения станут настолько высокими, что не будет другой альтернативы кроме развития энергетики и значительного увеличения роста выбросов CO_2 . В частности, если принять, что темпы роста выбросов в указанных девяти странах сохранятся, то к 2060 г. их суммарный выброс будет равным 11.6 Гт С/год, т.е. в 1.47 раза больше суммарного выброса всех стран мира в 2004 г. При таких условиях эффективность ограничений Киотского протокола и, соответственно, торможение глобального потепления могут оказаться незначительными.

Если протокол будет выполняться, то будет идти поглощение части CO_2 биосферой и океаном, воздействия на атмосферу и климат будут частично компенсироваться. Это интерпретируется как выполнение обобщенного принципа Ле-Шателье в биосфере. Если протокол не будет соблюдаться, то в период между 2050 и 2100 гг. возможно прекращение способности биосферы поглощать двуокись углерода, это приведет к уменьшению биомассы растений и количеству гумуса, а CO_2 атмосферы и температура увеличатся значительно сильнее, чем в первом случае. Принцип Ле-Шателье выполняться не будет.

Таким образом, если не будут предприняты предусмотренные Киотским протоколом меры по ограничению выбросов CO_2 в атмосферу, не исключена возможность прекращения компенсации биосферой антропогенных воздействий и может произойти нарушение устойчивого развития биосферы. Это является одним из конкретных математических выражений идеи Н.Н. Моисеева о возможной антропогенной потере биосферой устойчивости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 08-01-00607).

Литература

- Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями.- М.: Наука, 1985.- 272 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.
- Marland G., Boden T., and Andres B. Global CO_2 Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-2005. NDP-030. - Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.- 2008.

ОЦЕНКА И МИНИМИЗАЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДЫХАНИЯ ПОЧВЫ ПО ОТКРЫТОЙ СХЕМЕ

Татаринов Ф.А.¹, Сысоев Н.Е.², Молчанов А.Г.³

¹Институт проблем экологии и эволюции им. Северцова РАН, Москва, Россия
pedro2005@rambler.ru

²Center Graphics Development Services, Москва, Россия
nsysoev@mail.ru

³Институт лесоведения РАН, Успенское, Россия
a.georgievich@gmail.com

Аннотация: проведена аналитическая и экспериментальная оценка ошибки камерного измерения дыхания почвы по открытой схеме, вносимая за счет подсоса почвенного воздуха в камеру. Получена зависимость ошибки от общей площади входных отверстий камеры, показан путь ее уменьшения.

Введение

Камерные методы измерения дыхания почвы (R) сводятся к двум схемам, закрытой и открытой. При закрытой схеме воздух в камере во время измерений не обновляется, и $R \sim dC_{chamber}/dt$, где $C_{chamber}$ – концентрация CO_2 в камере. При открытой схеме воздух непрерывно прокачивается через камеру, и

$$R = F \frac{C_{chamber} - C_{air}}{S_{chamber}} \quad (1),$$

где C_{air} – концентрация CO_2 в приземном слое воздуха, $S_{chamber}$ – площадь почвы в пределах камеры и F – скорость потока воздуха через камеру. Открытая схема удобна тем, что легко позволяет проводить круглосуточные автоматические измерения без участия оператора. К недостаткам ее относится ошибка измерения, вносимая за счет подсоса в камеру почвенного воздуха с высокой концентрацией CO_2 . Т.о., к диффузии CO_2 из почвы, соответствующей измеряемому дыханию R , добавляется дополнительный привнос CO_2 из почвы за счет конвекции, что ведет к завышению $C_{chamber}$, а соответственно и R . Задача данной работы – оценить эту ошибку и условия, при которых она не превышает допустимых значений.

Постановка задачи и аналитическое решение

Пусть в камере, установленной на почве так, чтобы исключить прохождение воздуха между почвой и краем камеры, имеется n входных отверстий площадью s каждое (т.е. площадь всех входных отверстий $n \cdot s$). Из камеры насосом сосется воздух в газоанализатор. Взамен в камеру поступает самотеком воздух из атмосферы и из почвы. Сопротивление отверстий в камере и почвы обозначим как r_{in} , и r_{soil} , причем $r_{in} = \frac{k}{n \cdot s}$, где k – константа.

Тогда для потока воздуха в камеру можем записать:

$$F = (P_{air} - P_{chamber}) \left(\frac{1}{r_{soil}} + \frac{n \cdot s}{k} \right) \quad (2)$$

Запишем также баланс CO_2 на выходе из камеры и на входе в нее:

$$C_{chamber} \cdot F = C_{air} \cdot F + R + b \frac{P_{air} - P_{chamber}}{r_{soil}} \quad (3)$$

Здесь b – коэффициент вовлечения дополнительного CO_2 за счет подсоса из почвы. В правой части первый член соответствует притоку CO_2 с атмосферным воздухом, второй – дыханию и третий – притоку CO_2 за счет подсоса воздуха из почвы. Исключая из (3) разность давлений за счет выражения для потока (2), получаем:

$$(C_{chamber} - C_{air}) = R/F + \frac{b}{r_{soil} \cdot \left(\frac{1}{r_{soil}} + \frac{n \cdot s}{k} \right)} \quad (4)$$

Уравнение (4) демонстрирует как убывание концентрации с ростом числа входных отверстий (или их общей площади), так и то, что считая $R = F \frac{C_{chamber} - C_{air}}{S_{chamber}}$, мы переоцениваем

дыхание, а увеличение n приводит к более точной оценке. Относительную ошибку измерения, считая точным значением $(C_{chamber} - C_{air})_{true} = R/F$, можно оценить так:

$$err = \frac{(C_{chamber} - C_{air}) - (C_{chamber} - C_{air})_{true}}{(C_{chamber} - C_{air})_{true}} = \frac{b \cdot F \cdot k}{R \cdot (k + n \cdot s \cdot r_{soil})} \quad (5)$$

Обозначим для краткости $r = R/F$ и отношение притока воздуха через отверстие и через почву $d = s \cdot r_{soil}/k$. Тогда получим:

$$(C_{chamber} - C_{air}) = r + b/(1 + n \cdot d) \quad (6)$$

Эта дробно-линейная зависимость имеет 3 параметра, которые можно определить с помощью регрессии, измеряя концентрации при разных n .

Эмпирическая проверка

Эксперимент с измерением зависимости $C_{chamber}(n)$ проводился в Серебряноборском лесничестве при помощи газоанализатора Li-Cor-820. В камере было проделано от одного до 6 входных отверстий диаметром 4 мм. Измерения проводились при скорости потока 0.9 л/мин. Получена очень хорошая аппроксимация зависимости $(C_{chamber} - C_{air})(n)$ по формуле (6) (рисунок).

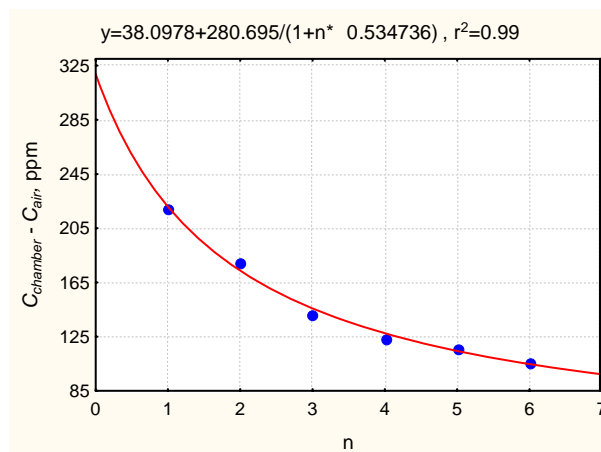


Рисунок. Зависимость разности концентраций CO_2 в камере и в воздухе от количества входных отверстий (диаметр отверстий 4 мм)

Рисунок показывает, что с ростом количества (или площади) входных отверстий $(C_{chamber} - C_{air})$ асимптотически приближается к константе, соответствующей реальному почвенному дыханию при данных условиях.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА CO2FIX В УСЛОВИЯХ ЧЕШСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Татаринов Ф.А.^{1,2}, Ченчала Э. (Cienciala, E.)²

¹*Институт проблем экологии и эволюции им. Северцова РАН, Москва, Россия*
pedro2005@rambler.ru

²*Institute for forest ecosystem research (IFER), Jilove u Prahy, Чехия*
emil.cienciala@ifer.cz

Аннотация: эмпирическая модель углеродного цикла в лесном хозяйстве CO2FIX была параметризована для ели, сосны, бука и дуба в условиях Чехии для средних бонитетов и по принятым в Чехии лесохозяйственным единицам. Моделирование по породам показало, что наибольшее накопление углерода происходит в буковых лесах. Проведен пересчет углеродного цикла в лесах для тестового региона.

Введение

Требования по международной отчетности в рамках Киотского протокола делают актуальной задачу моделирования углеродного цикла в наземных экосистемах, в частности в лесах. Одной из моделей, направленных на решение этой задачи, является эмпирическая модель CO2FIX (Maser et al., 2003). Модель точечная, с шагом по времени в 1 год, описывает динамику углерода в различных фракциях древесного насаждения (ствол, ветви, корни, листва), в почве, подстилке, различных типах древесной продукции, а также в биоэнергетике (т.е. в древесине, используемой как топливо). Климатические изменения в модели не предусмотрены. Целями настоящей работы были (1) параметризация модели в условиях Чехии и (2) отработка применения модели на региональном уровне.

Материал и методика

В работе использовалась версия 3.1 модели CO2FIX. Параметризация модели проводилась в два этапа. Сначала модель параметризовалась для основных лесохозяйственных пород Чехии – ели, сосны, бука и дуба – в условиях среднего бонитета. Затем модель дополнительно параметризовалась по каждой породе для каждой из основных лесохозяйственных единиц (ЛЕ), принятых в Чехии и различающихся по бонитету и предписанному лесохозяйственному сценарию. Параметризация основывалась на литературных данных, таблицах хода роста и предписаниях лесного законодательства. Затем было проведено модельный эксперимент на уровне тестового региона – Юго-Западной Богемии. Отдельные параметризации (всего 30) были сделаны для каждого сочетания ЛЕ и породы, представленного в тестовом регионе (кроме наиболее редких сочетаний, занимающих в сумме менее 5% лесопокрытой площади). Пересчет на территорию региона проводился путем суммирования за каждый год результатов по каждому сочетанию ЛЕ, породы и класса возраста, взвешенных площадями, занимаемыми соответствующими сочетаниями. Начальное распределение площадей бралось согласно данным последней таксации, смена пород в процессе моделирования не предполагалась.

Результаты

Моделирование на уровне отдельных пород показало, что наиболее высокий объемный прирост наблюдался у ели, однако наибольшее накопление углерода в экосистеме происходило в буковых насаждениях за счет более высокой плотности древесины бука (рисунок 1).

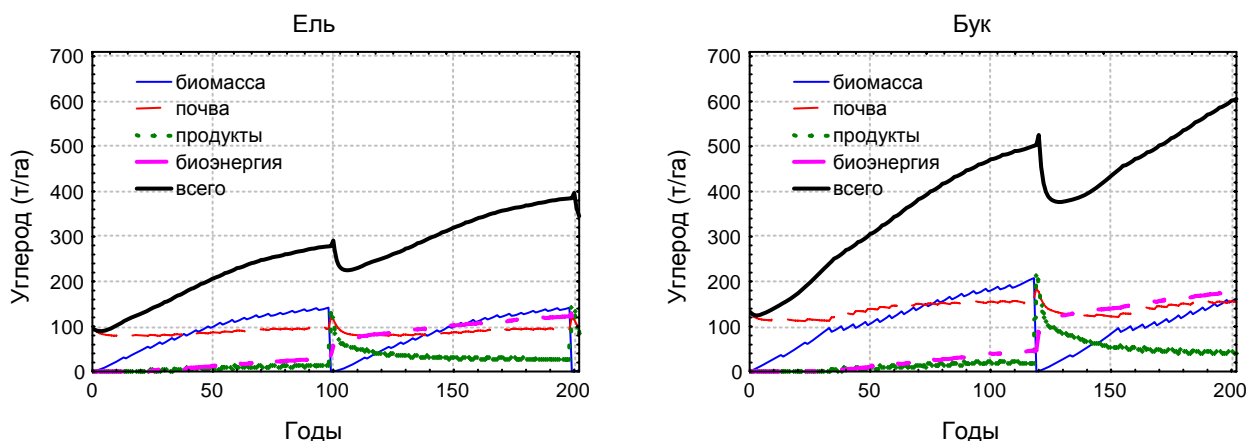


Рисунок 1. Примеры моделирования динамики углерода в течение двух оборотов рубки

На региональном уровне запасы углерода в деревьях и в почве колебались вблизи константы, что отражает устойчивую возрастную структуру лесов, сформировавшуюся за 200 лет организованного лесопользования (рисунок 2 слева). Прирост общего углерода происходит в основном за счет биоэнергии (эта величина по определению интегральная, а потому неубывающая).

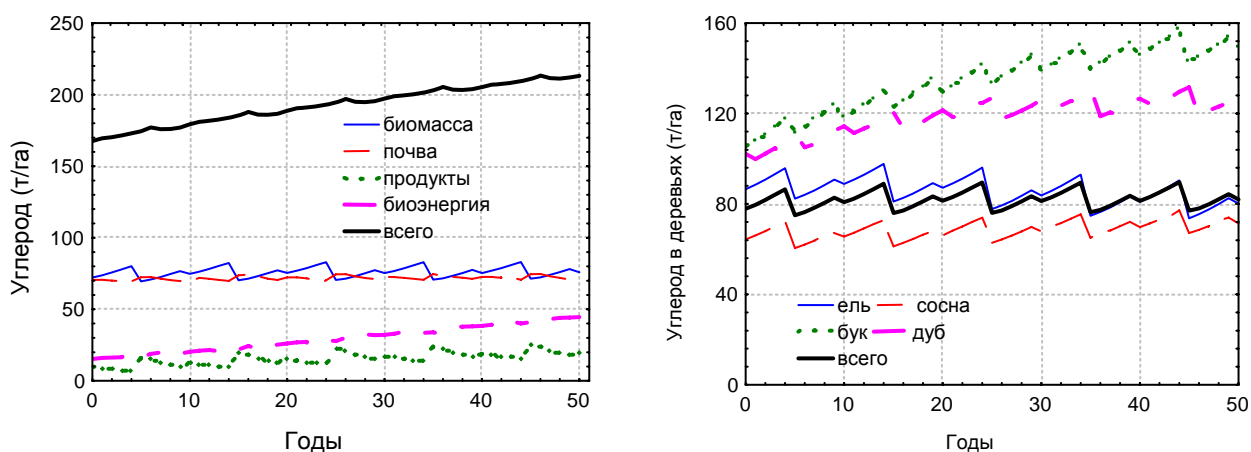


Рисунок 2. Средняя по региону динамика углерода: все пулы (слева) и в древостое по породам (справа)

При расчете по отдельным породам (рисунок 2 справа) заметен прирост запаса углерода в лиственных насаждениях при некотором снижении его у ели. Это связано с тем, что в исходной возрастной структуре у лиственных преобладают молодые насаждения, посаженные в последние десятилетия на месте хвойных в рамках тенденции экологизации лесного хозяйства.

Проведенный модельный эксперимент показал возможность применения модели CO2FIX на региональном уровне.

Литература

- 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 - №164,- p 177-199.

СУКЦЕССИИ И БИОТИЧЕСКИЙ КРУГОВОРОТ

Титлянова А.А.

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

argenta@issa.nsc.ru

Аннотация: изучение сукцессионных процессов проводили на свежесыпанных и старых отвалах угольной промышленности в Красноярском крае. Оказывается, что общих закономерностей в сукцессиях отдельных компонентов биоты не просматривается. Каждое сообщество характеризуется специфическим сукцессионным процессом и траектории перехода определенных параметров к стационарному состоянию различны.

Наши исследования (1988-1993 гг.) были посвящены сукцессиям различных компонентов биоты, вычленению общих сукцессионных закономерностей, количественной характеристике развивающихся циклов углерода и азота и анализу связи между экологическими сукцессиями и процессами биотического круговорота, включающими формирование почв.

В своих начальных воззрениях мы придерживались идеи Клементса, что сукцессия есть детерминированный направленный процесс, в ходе которого виды-пионеры модифицируют среду так, что она становится более благоприятной для видов, следующих за пионерными.

Мы разделяли также концепцию Одума, что сукцессия – это процесс, закономерно меняющий все структуры экосистемы и ведущий к накоплению углерода и питательных элементов в компонентах, при этом – в ходе сукцессии NPP/V снижается, а $NPP/Resp$ стремится к единице, где NPP – чистая первичная продукция, V – общая биомасса, $Resp$ – гетеротрофное дыхание.

Шестилетнее изучение сукцессий на свежих незаселенных поверхностях угольных отвалов позволило нам прийти к следующим выводам.

1. Анализ материала по отдельным компонентам (растительность, панцирные клещи, простейшие, коллемболы) показывает, что общих закономерностей в сукцессиях отдельных компонентов биоты не улавливается. Каждое сообщество характеризуется специфическим сукцессионным процессом и траектории перехода определенных параметров к стационарному состоянию различны.
Так, например, количество видов в фитоценозах повышается со временем, но за 25-27 лет первичной сукцессии сообщество не достигает видового богатства лугов. В ценозе же простейших количество видов, близкое к терминальному, устанавливается в первые же месяцы сукцессии.
2. Осадочные породы (остатки былых биосфер по Вернадскому) содержат ископаемые C (260 г/м^2) в слое 0-20 см и $25 \text{ г/м}^2 \text{ N}$ в том же слое. Ископаемые C и N – это изначальные фонды питания, которые доступны ряду гетеротрофных организмов. В поднятой с глубины 25 м породе присутствуют бактерии-гетеротрофы, таким образом, есть все условия для включения гетеротрофного звена в биогеохимическую работу с самого начала обнажения поверхности. Круговорот C и N начинается не с нуля, а с некоторого низкого старта, и функционирование экосистемы – не с автотрофов, а с гетеротрофов.
3. Свободная поверхность доступна для заселения. За первый год на нее поступает около $2,5 \text{ тыс. семян/м}^2$. В течение года приносится около $0,1\%$ бактерий от их пула в черноземе, т.е. около $0,2 \text{ г C/м}^2$. Еще выше привнос грибного мицелия – до 3 г/м^2 за год. Итак, с первого месяца экспозиции есть все условия для включения в работу биотического круговорота, его гетеротрофного звена.
4. В первый же год сукцессии на отвалах появляются высшие растения и водоросли, благодаря чему основной процесс биотического круговорота – фотосинтез –

начинается с первого года сукцессии. На второй год происходит отмирание растений и минерализация растительных остатков. На третий год включается процесс гумусообразования. Минерализационный поток быстро возрастает. Уже через семь лет сукцессии выделение CO_2 из образцов молодой почвы достигает 84% от терминальной величины.

По мере перехода свежеекспонированной породы в зрелую экосистему постепенно стабилизируются запасы всех компонентов биотического круговорота и растет доля гетеротрофного дыхания – от 4% от NPP в первый год до 50% - на шестой год сукцессии.

Литература

Сукцессии и биологический круговорот / А.А. Титлянова, Н.А. Афанасьев, Н.Б. Наумова и др.- Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1993.- 157с.

СТРУКТУРНЫЕ ИНВАРИАНТЫ ВИДОВОГО БОГАТСТВА РАСТЕНИЙ ДЕЛЬТЫ АМУДАРЬИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА (1944-1989 ГГ.)

Трофимова Г.Ю.

Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия
gala@aqualaser.ru

Изменения в структуре экосистемы дельты Аму-Дарьи и её функционировании вызваны снижением величины речного стока, поступающего в дельту через створ Саманбай. Анализ этих изменений позволил выявить структурные инварианты видового богатства растений дельты Аму-Дарьи на примере жизненных форм, и описать механизмы, обеспечивающие устойчивое функционирование экосистемы дельты.

Ресурсы поверхностных вод реки Амударьи на протяжении многих веков использовались человеком в хозяйственных целях. Однако с середины 1950-х гг. в бассейне Амударьи началось масштабное преобразование природной среды. Резкое снижение поступлений речного стока в дельту с 1960-х гг. было обусловлено быстрым ростом безвозвратных изъятий речного стока и его регулированием с помощью водохранилищ и гидроузлов (Георгиевский и др., 1991). С 1980-х гг. Южное Приаралье объявлено зоной экологического бедствия. В экосистеме дельты Аму-Дарьи, характеризующейся повышенной ранимостью (Залетаев, 1997), произошли необратимые нарушения в составе, структуре и ее функционировании.

Исследователям природных систем была предоставлена уникальная возможность изучения механизмов формирования структуры видового богатства растений аридной зоны в условиях изменяющегося гидрологического режима. Автором получены структурные инварианты видового богатства растений дельты Аму-Дарьи на примере жизненных форм, и приведены механизмы, обеспечивающие устойчивое функционирование экосистемы дельты.

Речной сток Аму-Дарьи, определявший обводненность дельты, уровень залегания грунтовых вод, и в конечном итоге – состав и структуру экосистемы дельты, являлся основной составляющей водного фактора в дельте с 1944 по 1989 г. На основе анализа гидрологических данных по створам дельты Аму-Дарьи была выделена и охарактеризована последовательность временных периодов с различными средними значениями речного стока, а именно: 1944–1960, 1961–1970, 1971–1977, 1978–1981, 1982–1989 гг. При этом учитывались как стабильность поступления водных масс в дельту и направленность тренда на протяжении всего периода, так и обобщенный анализ состояния почвенного и растительного покровов дельты по литературным источникам (Трофимова, 2008).

Каждый выделенный период был рассмотрен как зона нормальной жизнедеятельности (зона оптимума) для некоторого конечного набора видов растений. Поэтому наряду с последовательностью временных периодов использована также последовательность однотипных экосистем дельты, различающихся по количеству водных масс, поступающих в дельту через створ Саманбай.

Флористический список, зафиксированный в дельте Аму-Дарьи с 1947 по 1989 г., содержит 265 видов. Жизненная форма каждого вида определена по упрощенной системе жизненных форм (Серебряков, 1964; Нечаева и др., 1973).

Введем в качестве структурных элементов видового богатства растений обобщенные группы жизненных форм как наиболее информативные в нашем исследовании: группа древесно-кустарниковых видов растений (деревья + кустарники + кустарнички + полукустарники + полукустарнички), группа полудревесных видов растений (полукустарники + полукустарнички), группа древесных видов растений (деревья + кустарники + кустарнички), группа травянистых видов (однолетние + двулетние + многолетние), группа одно- и двулетних видов трав, группа многолетних видов трав.

Обозначим через T видовое богатство группы древесно-кустарниковых видов растений в каждом из выделенных временных периодов, через T_i видовое богатство группы

полудревесных видов, через T_2 видовое богатство группы древесных видов растений. Таким образом, видовое богатство группы древесно-кустарниковых видов растений (T) можно представить в виде суммы T_1 и T_2 . Видовое богатство группы травянистых видов растений обозначим через H , через H_1 видовое богатство группы одно- и двулетних видов трав, через H_2 видовое богатство группы многолетних видов трав. Тогда видовое богатство группы травянистых видов растений можно представить в виде $H=H_1+H_2$.

Связь между количеством видов в указанных обобщенных группах жизненных форм по выделенным временным периодам выражена формулой 1.

$$\frac{T}{H} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1)$$

Связь между H_1 и H_2 в структуре видового богатства трав дельты Аму-Дарьи обозначена формулой 2.

$$\frac{\min(H_1, H_2)}{\max(H_1, H_2)} \approx \frac{2}{3} \quad (2)$$

Формулы 1 и 2 не зависят от количества видов растений в экосистеме дельты Аму-Дарьи в выделенных временных периодах и тем более от численности каждого вида. Для последовательности однотипных экосистем дельты Аму-Дарьи, различающихся по величине речного стока, поступавшего в нее через створ Саманбай, формулы 1 и 2 являются структурными инвариантами и демонстрируют свойство самоподобия, характерное для природных систем (Мандельброт, 2002).

Формула 2 указывает на триггерный механизм взаимодействия, выражающийся во взаимном замещении обобщенных групп жизненных форм в структуре видового богатства трав экосистемы дельты Аму-Дарьи в разные временные периоды, соответствующие различным средним значениям речного стока. Благодаря сменам доминирующей составляющей в структуре видового богатства трав экосистемы дельты Аму-Дарьи обеспечивается сохранение структуры видового богатства травянистых растений дельты в условиях изменяющегося гидрологического режима реки. В конечном итоге обеспечивается устойчивое функционирование всей экосистемы дельты.

Доля травянистых видов H в структуре видового богатства растений дельты Аму-Дарьи по выделенным временным периодам составляла в среднем 75%, за исключением периода 1978–1981 гг., когда она стала чрезвычайно низкой (62%). Это означает, что группа видов трав одно- и двулетних и группа видов трав многолетних выступают как «экологическая сумма» (Залетаев, 1997) обобщенных групп жизненных форм, адаптационный спектр которой к среде обитания существенно превышает диапазон экологической лабильности каждой группы в отдельности. Взаимная дополняемость обобщенных групп жизненных форм в структуре видового богатства растений также обеспечивает устойчивое функционирование всей экосистемы дельты Аму-Дарьи.

Литература

- Георгиевский В.Ю., Владимирова Т.И. Ресурсы поверхностных вод бассейна Амударьи и их изменения // Мониторинг природной среды в бассейне Аральского моря.- СПб.: Гидрометеониздат, 1991.- С.52-58.
- Залетаев В.С. Структурная организация экотонов в контексте управления // Экотоны в биосфере.- М.: РАСХН, 1997.- С.11-29.
- Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. - М.: Институт компьютерных исследований, 2002. - 656 с.
- Серебряков И.Г. Жизненные формы высших растений и их изучение // Полевая геоботаника.- М.-Л.: Наука, 1964.- С.146-205.
- Трофимова Г.Ю. Влияние речного стока Амударьи на количество кормовых видов в её дельте (1944-1989 гг.) // География и природные ресурсы.- 2008.- №1.- С.169-174.
- Нечаева Н.Т., Василевская В.К., Антонова К.Г. Жизненные формы растений пустыни Каракумы.- М.: Наука, 1973.- 244 с.

КВАЗИ-ПАРЕТОВСКИЙ ЗАКОН В НОВОЙ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКЕ

Трубников Б.А.¹, Трубникова О.Б.²

¹Институт ядерного синтеза РНЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ

trubboris@yandex.ru

²Институт биологии развития РАН, Москва, РФ

oxtr@mail.ru

Аннотация: негауссовы распределения, описываемые эмпирическим законом Парето, широко известны в биологии, однако проблема теоретического обоснования этого закона остается нерешенной. В данной работе представлен результат решения задачи разбиения множества на подмножества в виде «квази-паретовского» закона, включающего закон Парето.

1. О трех квантовых статистиках

Статистика изучает распределения каких-либо объектов по определенным отличительным признакам. В квантовой статистике изучаемыми объектами являются элементарные частицы двух видов – фермионы и бозоны, отличающиеся статистическим весом, который обязан быть целым числом. В данной работе рассматривается возможность существования объектов третьего вида, которые также имеют целочисленный статистический вес, проявляющийся в ситуациях условной «конкуренции за ресурс» (условно назовем их «конкурентами»).

Рассмотрим случай, когда множество N частиц разбивается на n_k кластеров k -типа, а тип кластера определяется именно числом k попавших в него частиц. При этом считаются заданными суммы числа частиц и числа кластеров, а также некий суммарный ресурс R (где R_k - доля ресурса, приходящаяся на один кластер k -типа)

$$N = \sum_k N_k = \sum_k n_k k = const, K = \sum_k n_k = const, R = \sum_k R_k n_k = const, \quad (1.1)$$

Общий статистический вес всего множества, по определению, считается равным

$$\Omega = A/BC, \text{ где } A = N! \quad B = \prod_k (k!)^{n_k} \text{ и } C = \prod_k N_k!, \quad (1.2)$$

а энтропия определяется логарифмом стат-веса $S = \ln \Omega$.

Для сравнения укажем две известных в физике формулы:

$$\Omega_{\text{ФД}} = \frac{K!}{N!(K-N)!}, \quad \Omega_{\text{БЭ}} = (N+K-1)!/N!(K-1)! \quad (1.3)$$

Первая называется статистикой Ферми-Дирака и указывает стат-вес фермионов, вторая – статистикой Бозе-Эйнштейна для бозонов, где N – число частиц, K – число возможных состояний частиц (Ландау и Лифшиц, 1964). Важно отметить, что статистический вес Ω является квантовой характеристикой множества частиц и указывает число всех возможных состояний множества. Он обязан быть целым числом. В классической (не квантовой) статистике понятие статистического веса отсутствует – оно заменяется понятием относительной вероятности, которая не обязана быть целым числом.

Для всех трех случаев стат-вес имеет вид дроби $\Omega = M!/(Z_1 Z_2)$. В ней числитель $M!$ – максимально допустимое число перестановок всех рассматриваемых объектов, а два множителя знаменателя указывают числа тех перестановок, которые следует исключить из подсчета, так как они были излишним образом введены числителем.

2. Квазиклассическое приближение

В классическом пределе все факториалы можно заменить формулами Стирлинга, тогда статистический вес оказывается равным

$$S = \ln \Omega, \text{ где } \Omega_k \approx (eN/k^2 n_k)^{N_k} \quad (2.1)$$

Он уже не обязан быть целым числом, а требование максимума энтропии при трех дополнительных условиях (1.1) приводит к дифференциальному спектру кластеров

$$n_k \approx \frac{N}{k^2} \exp\left[-\alpha - \frac{\beta + \gamma R_k}{k}\right] = \frac{A}{k^2} \exp\left(-\frac{\beta + \gamma R_k}{k}\right), \quad (2.2)$$

где α, β, γ - три параметра Лагранжа и A - множитель общей нормировки системы «конкурентов». При больших значениях аргумента k эта формула дает закон Парето $n_k \approx A/k^2$, а при малых k необходимо учитывать влияние обрезывающей экспоненты на левом крае спектра.

Для макроскопических объектов параметр k означает не число частиц, а условную единицу измерения числа объектов. Например, массы галактик можно измерить, приняв за единицу массу Солнца. Тогда, делая замену $k \rightarrow m$ и полагая $R_k \equiv k^{2/3} \equiv m^{2/3}$, получим формулу Зельдовича-Новикова для распределения числа галактик по массам $n_m = A m^{-2} \exp[-(m_0/m)^{1/3}]$ (Зельдович и Новиков, 1992; Трубников, 2009).

Ниже приведены примеры хорошей применимости формулы (2.2), которую с учетом «левой» обрезывающей экспоненты условимся называть «квази - паретовским законом». В примерах (а), (б) и (в) влияние экспоненты не проявляется, в то время как для совокупности развивающихся ооцитов в яичнике лягушки оно очевидно (з).

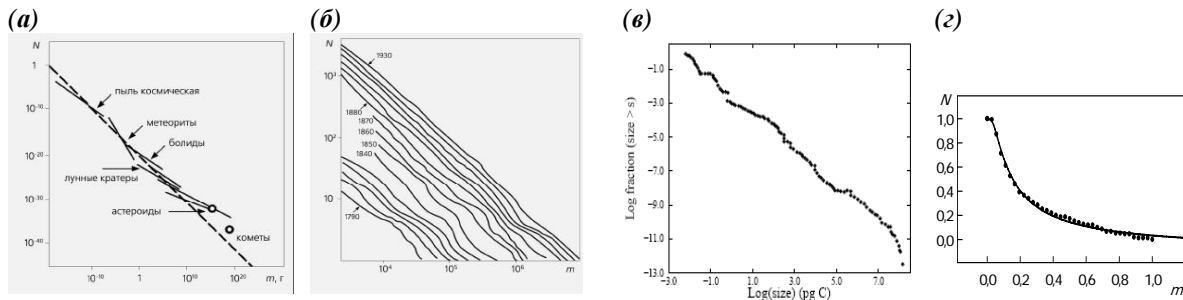


Рисунок. Интегральные спектры различных распределений: (а) - распределение малых космических тел по массам (Трубников, 1993); (б) - распределение городов (США) по числу жителей; (в) - распределение организмов океана по массам (Camacho, 2001); (з) - распределение ооцитов в яичнике лягушки по массам (данные Трубниковой О.Б.)

Мы предполагаем, что свойства формулы (2.2) отражают явление, известное в экологии как «конкуренция за ресурс» (Трубников, Трубникова, 2005), при этом ее управляющий параметр позволяет отслеживать состояние ресурса. Таким образом, формула квази - паретовского закона, полученная на основе предложенной новой статистики, может служить удобной моделью в изучении динамики сообществ и отдельных популяций.

Авторы выражают благодарность В.А. Курнаеву, И.М. Халатникову, А.В. Бялко, Б.И. Кудрину, Д.С. Чернавскому за полезные замечания, а также В.С. Курдюмову за проявленное внимание к работам.

Литература

- Зельдович Я.Б., Новиков И.С. Стрoение и эволюция Вселенной.- М.: Наука, 1992.
 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика.- М.: Наука, 1964.- С. 183.
 Трубников Б.А. Закон распределения конкурентов // Природа - 1993.- № 3.- Р. 3-13.
 Трубников Б.А. Фононы на гравитоне//ВАНТ, сер. «Термояд. Синтез».- 2009.-Вып. 1.- С.73-80
 Camacho J and Sole R.V. Scaling and Zipf's law in ecological size spectra // Europhysics Lett.- 2001.- V.55.-P.774-780
 Trubnikov V.A., Trubnikova O.B. Theory of Competition // 13th Gen. Conf. of the Euro Physical Society. EPS-13.
 «Beyond Einstein – Physics for the 21st Century». Bern, 11-15 July 2005. BR6-4-THU. P.119.

КВАЗИ-ПАРЕТОВСКИЙ ЗАКОН И ООГЕНЕЗ ЛЯГУШКИ

Трубникова О.Б.¹, Трубников Б.А.²

¹ИБР им. Н.К.Кольцова РАН, Москва, РФ

oxtr@mail.ru

²ИЯС РНЦ «Курчатовский институт», Москва, РФ

trubboris@yandex.ru

Аннотация: исследована популяция ооцитов в яичнике травяной лягушки *Rana temporaria* L. Представлены результаты применения модели «конкурентов», разработанной на основе «квази-паретовского закона», предложенного авторами ранее.

Популяция ооцитов в яичнике лягушки (*Rana temporaria* L.) состоит из нескольких возрастных генераций, объединенных тканями яичника (рисунок 1).

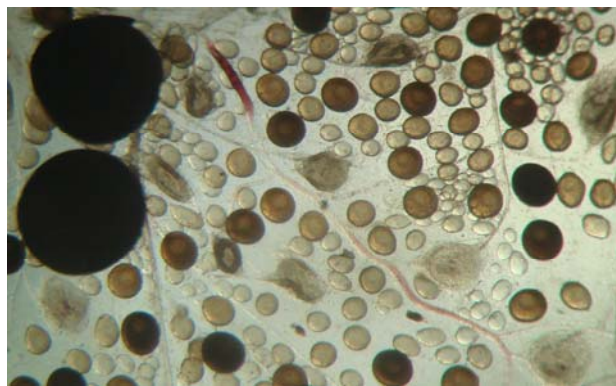


Рисунок 1. Фотография участка ткани яичника лягушки; видны ооциты разных размеров

Целью данного исследования было описание распределения совокупности ооцитов по морфометрическим характеристикам с помощью предложенной ранее авторами модели «конкурентов», основанной на квази-паретовском законе. Обоснование квази-паретовского закона получено как результат решения задачи о разбиении множества объектов на подмножества-кластеры при трех дополнительных условиях: задания полного числа объектов, числа кластеров и сохранения некоторого ресурса. Данные условия приводят к «конкуренции» объектов за место в кластерах, которые различаются числом попавших в них объектов. Таким образом, наша модель описывает наборы объектов, находящихся в состоянии условной «конкуренции за ресурс» и названа нами моделью «конкурентов».

Приведем формулы «квази - паретовского закона» в дифференциальной форме

$$P(m) = \frac{A}{m^2} \exp\left(-\frac{m_c}{m}\right), \text{ где } m_c = m_{crit} = 2m_{experimental}^{\max} \quad (1)$$

и в интегральной (кумулятивной) форме

$$Q(\geq m) = \int_m^{\max} P(m) dm = \frac{A}{m_c} \left[\exp\left(-\frac{m_c}{m}\right) - \exp\left(-\frac{m_c}{m_{\max}}\right) \right], \quad (2)$$

где A – коэффициент общей нормировки выбранного массива данных. При больших значениях аргумента $m \gg m_c$ из формулы (1) получаем собственно закон Парето $P(m) = A m^{-2}$, а в области малых значений, $m \leq m_c$, экспонента обеспечивает спад левого края дифференциального спектра (1). Формулы содержат управляющий параметр m_c , значение которого отражает влияние ресурса.

Для исследования применимости модели нами были получены морфометрические характеристики ооцитов (максимальные и минимальные диаметры каждого ооцита в пределах определенного участка ткани яичника). Обсчет проводился в программе Photoshop 8 по микрофотографиям, полученным с помощью цифровой камеры с разрешением 10 мегапикселей. На основании значений диаметров высчитывали условный объем и условную массу. Полученные данные мы аппроксимировали с помощью формул «квази – паретовского закона». Один из примеров распределений представлен на графиках (рисунок 2).

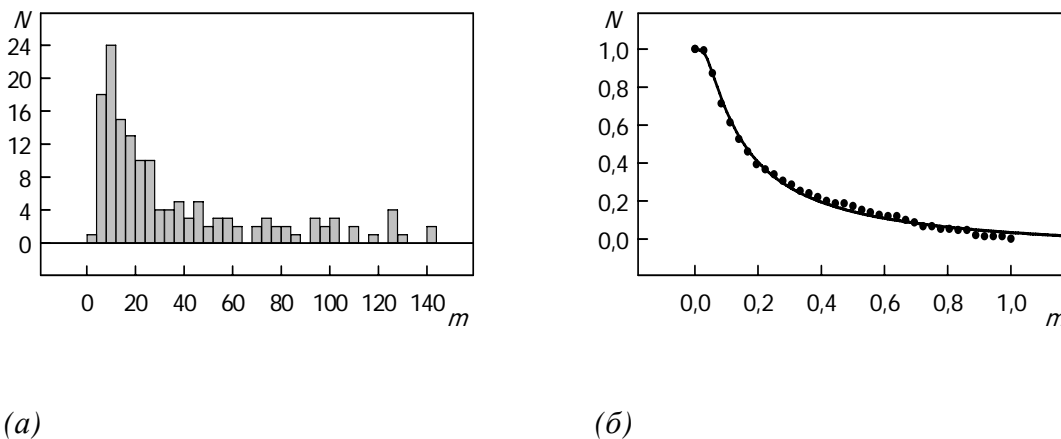


Рисунок 2. Дифференциальный (а) и интегральный (б) спектры распределения ооцитов по массам

При проведении регрессионного анализа было установлено, что предложенная модель «конкурентов» весьма хорошо описывает результаты измерений. Это позволяет надеяться, что ее применение окажется полезным в изучении сезонной динамики репродуктивной системы у низших позвоночных.

Литература

- Трубников Б.А. Закон распределения конкурентов // Природа.- 1993.- № 3.- С. 3-13.
Трубников Б.А., Трубникова О.Б. Пять великих распределений // Общая и прикл. ценология.- 2007. - № 11.- С. 13-20.
Trubnikov V.A., Trubnikova O.B. Theory of Competition // Book of abstr. of 13th Gen. Conf. of the Europ. Physical Soc. «Beyond Einstein – Physics for the 21st Century». Bern, 2005. BR6-4-THU.- P.119.
Trubnikov V.A., Trubnikova O.B. Распределение конкурентов с тремя параметрами // Матер. межд. конф. «Вперед в будущее».- М.: ИПМ РАН им. М.В. Келдыша, 2007.- <http://spkurdyumov.narod.ru/conf2007ipm.htm>).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ

Турков С.Л.

Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия
turkov@khn.ru

Аннотация: с позиций геосистемного подхода, новой теории энтропии А.Н. Панченкова (1999) и на основе математических аппаратов теории игр и распознавания образов рассматриваются теоретические проблемы и методы моделирования процессов устойчивого развития территорий.

Проблемы «коэволюции» природы и общества (Н.Н. Моисеев, 1982) и концепция устойчивого развития регионов (Sustainable Development, комиссия Г.Х. Брундтланд, 1967; КУР в аббревиатуре Международной комиссии ООН, 1993) на практике сводятся к функции управления биосферными (ноосферными) процессами (природопользование глобального, регионального и локального уровней). Научной основой данной функции служит ratio (исходное начало, принцип, смысл) современного естествознания и смежных с ним систем знаний.

Более других наук сегодня изучением этих проблем занимаются экономическая география, региональная экономика, экология и геоэкология. При этом геоэкология, согласно объекту, предмету и методам исследования, имеет определенные преимущества перед другими науками. При исследовании геосфер планеты и регионов, как универсальных территориальных единиц, она изучает их с синергетических, геолого-географических и биологических, позиций, имея в качестве конечной цели нахождение некоторого устойчивого (равновесного и динамически развивающегося; синтез известных из физики макро- и микро- подходов) системного состояния с точки зрения биоразнообразия их вещественной части и энергетической ценности.

Системное представление общего фазового (информационного) пространства экологии, геоэкологии и сферы природопользования, а также модели и методы принятия управляющих решений представлены в работах (Турков, 2003; Полумиенко и др., 2007). В них под фазовым пространством понимается некоторая определенная часть материального мира, которой ограничивается возможная область существования связанных с ней конкретных классов динамических систем (активные сложные системы (АСС) класса «природа-общество»). АСС представляют собой взаимно интегрированные целостности систем (согласно экологической аксиоматике по Н.Ф. Реймерсу, 1994) и объектов, свойства которых не могут быть сведены к свойствам составляющих подсистем; они рассматриваются как живые системы, где основным движущим механизмом функционирования и развития является конфликт (в условиях неопределенности). Под конфликтом здесь понимается стремление природы сохранить свое физическое (материально-вещественное), энергетическое и информационное состояние природы в противовес стремлению человека его нарушить.

По П.Я. Бакланову (2002) «Природопользование – это всегда взаимодействие, взаимопересечение двух систем, с одной стороны, природной, а с другой – общественной, или социально-экономической». Поэтому в данной схеме – в противовес ее определению, предложенного Э. Геккелем («наука об отношениях организмов к окружающей среде», 1866) – экология рассматривается как наука о физических, химических и биологических формах существования живой и неживой материи (включая ближний космос; А. Тенсли, 1935). Н.Ф. Реймерс, В.И. Булатов и другие называют ее «большой (или мега-) экологией»; у нее нет сегодня фундаментальных теоретических основ. А геоэкология – как область знаний о формах существования и пределах взаимодействия геосферных оболочек (или – по А.Д. Арманду, 1988 – геосистем высшего уровня) планеты (космо-, лито-, педо-, гидро-, атмо-, био-, и антропо- сферы). Отсюда сегодня может быть предложена следующая формула геоэкологии (специальность 25.00.36): ГП, ЖР (объект – геосферы планеты, предмет –

жизнеобеспечивающие ресурсы) \Rightarrow БС, НС (исходная теория – теория биосферы и ноосферы) \rightarrow РВ, УР (цель – равновесие и устойчивое развитие); ГЛ, РН, ЛК (уровни управления – глобальный, региональный, локальный); КН (основное свойство – конфликт в условиях неопределенности).

Технологически решение проблем УР можно осуществить посредством разработки алгоритма метазнаний геоэкологии, которые в общем виде представляет собой логически (теоретически, методически и технологически) связанные знания высшего уровня об объектной, предметной, проблемной (задачной) подобластях и методах исследования каждой конкретной науки, общая целевая функция которых направлена на принятие эффективных управляющих решений в процессе коэволюции природы и общества.

В основу алгоритма положена новая парадигма системного представления мира (биосферное (ноосферное) мышление; Ф. Капра, 1991) и геосистемный подход (синергия, «аддитивный» + «мультипликативный» эффекты объектно-ориентированного (дескриптивного) и ноосферного (нормативного) подходов). Известную из физики форму материально-вещественного описания мира: $W = \{M, E, I\}$ (масса, энергия, информация), предлагается реконструировать в направлении $W = \langle \{ \Lambda, P, I \} \rangle$, где: $\langle \dots \rangle$ – теоретико-игровая постановка задач управления; Λ – объекты, P – предикаты, I – информация. В геоинформатике они обычно представлены в виде вложенных структур, или «объект-свойство» таблиц (например, ТОС в ГИС INTEGR0). Здесь также используется известное из современной философии определение термина «управление»; первая его часть (сохранение структуры, поддержание режима деятельности системы) теоретически определяет некоторое (возможное) состояние ее «равновесия», вторая (программа, цель развития) – позволяет реализовать какие-либо условия ее «устойчивого развития».

Методологический и теоретический базис алгоритма метазнаний определяет новая теория энтропии (Панченков, 1999), где она, в отличие от Второго закона (начала) термодинамики Р. Клаузиса, имеет позитивный смысл и рассматривается как «...мера совершенства структуры, как сформулированная в символическом виде архитектура системы». Она записывается в виде $H_f = H_q | H_p$, где: H_q – структурная энтропия и H_p – энтропия импульса; $H_f = \text{const}$. В диссипативной виртуальной среде также существует пассивная компонента (термодинамическая энтропия), входящая в состав H_q – замороженная энтропия, H_z ; в физическом смысле она представляет собой термодинамический потенциал возможного (будущего) развития системы. Согласно новой теории энтропии, все процессы во Вселенной – это процессы преобразования одной энтропии в другую; $H_p \Leftrightarrow H_q$; $H_f = H_q + H_p$. Отсюда: H_q – мера совершенства структуры системы; H_p – мера количества ее ресурсов. Конечный (формализованный) результат исследования сводится к разработке общей модели и оптимума управления АСС класса «природа-общество» (здесь не приводится).

В основу будущего механизма управления процессами УР предполагается положить решения, оптимальные по Парето («выигрыши/проигрыши» природы и общества взаимозависимы и определяются достижением состояния динамического равновесия в полной системе; в исследовании операций (Operation's Research) они определяются в процессе решения игры против природы – game against nature). При разработке будущих механизмов также должна быть реализована концепция «выиграть \Leftrightarrow выиграть»; она получила развитие в 80-е гг. в Австралии – исследование функций интеллектуальных сетей по разрешению конфликтов, Conflict Resolution Network).

Литература

- Панченков А.Н. Энтропия.- Н. Новгород: Изд-во об-ва «Интелсервис», 1999.- 592 с.
Полумиенко С.К., Савин С.З., Турков С.Л. Информационные модели и методы принятия решений в региональных эколого-экономических системах.- Владивосток: Дальнаука, 2007.- 377 с.
Турков С.Л. Основы теории управления региональным природопользованием.- Владивосток: Дальнаука, 2003.- 367 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВТРОФИКАЦИИ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Тучковенко Ю.С.

Одесский государственный экологический университет, Одесса, Украина
tuch2001@ukr.net

Аннотация: рассматривается математическая структура, результаты адаптации и верификации, практического использования для решения прикладных задач экологии моря трехмерной имитационной модели эвтрофикации вод шельфовых морских акваторий и внутренних водоемов.

Разработана численная нестационарная, в общем случае трехмерная, модель эвтрофикации морских и внутриконтинентальных водных объектов, состоящая из двух блоков - гидродинамического и химико-биологического. Первый из них представляет собой модифицированную гидротермодинамическую модель МЕССА – Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment (Hess, 1989). Модель реализована в σ - системе координат и позволяет воспроизводить пространственно-временную изменчивость уровня воды, термохалинной структуры вод, трехмерного поля течений и интенсивности турбулентного обмена на временных отрезках от нескольких суток до годового цикла в водоемах и акваториях со сложными морфологическими и гидрологическими характеристиками.

Химико-биологический блок модели представляет собой систему взаимообусловленных дифференциальных уравнений, которые описывают биогеохимические циклы биогенных элементов, продукцию и деструкцию органического вещества, трофические связи и динамику кислорода в локальной точке водной среды.

При сохранении общих принципов построения, математическая структура химико-биологического блока модели эвтрофикации вод конкретного водного объекта во многом зависит от его морфологических и режимных характеристик, специфики решаемых задач и полноты исходной информации об объекте, полученной в ходе экологического мониторинга. Разработан иерархический комплекс оригинальных по математической структуре блоков эвтрофикации, различающихся по числу переменных и уровню детализации взаимосвязей между биотическими и абиотическими компонентами водной экосистемы (модели). Каждый из представленных вариантов химико-биологического блока модели эвтрофикации позволил решить поставленную прикладную задачу для конкретного водного объекта и, в то же время, базировался на доступном (в финансовом и методическом отношении) объеме исходной информации.

Разработаны оригинальные схемы и методики калибровки параметров химико-биологического блока модели эвтрофикации вод, которые прошли успешную апробацию и показали свою эффективность при решении прикладных задач для морских акваторий и водоемов, относящихся к различным климатическим зонам, имеющим различные морфологические, гидрологические, гидрохимические и гидробиологические характеристики.

Методология использования модели для решения прикладных задач экологии моря разрабатывалась и апробировалась для двух, различных по климатическим условиям, районов: колумбийского участка шельфа Карибского моря (лагуны Сиенага де Теска, лимана Сиенага Гранде де Санта-Марта, бухты Картагена), а также водоемов и акваторий северо-западного Причерноморья (Днепровско-Бугского, Придунайского районов северо-западной части Черного моря, Придунайских озер) (Иванов, Тучковенко, 2006) .

Наиболее простой вариант блока (1 -го уровня иерархии), разработанный для лагуны Сиенага де Теска, базируется на стандартном наборе определяемых гидрохимических характеристик (минеральные формы азота и фосфора, БПК, растворенный кислород) и содержит только одну биотическую переменную – биомассу фитопланктона, которая в первом приближении может быть оценена по концентрации хлорофилла «а». Скорости регенерации минеральных форм азота и фосфора полагаются равными и описываются

кинетическим уравнением реакции биохимического окисления органического вещества 1-го порядка. Учитываются различия в стехиометрическом соотношении для косного (неживого) органического вещества естественного (автохтонного) и антропогенного происхождения.

В блоке 2-го уровня организации, разработанного для водоемов и акваторий северо-западного Причерноморья, циклы азота и фосфора на абиотическом уровне рассматриваются отдельно, что позволяет учесть возможные различия в скоростях минерализации органических форм фосфора и азота, а также в соотношении между азотом и фосфором в составе автохтонного и аллохтонного (в том числе, поступающего из антропогенных источников) органического вещества. Удельные скорости химико-биологических процессов записываются не как константы, а в виде функций от характеристик состояния морской среды. Косное органическое вещество, выраженное в единицах азота, фосфора и кислорода, разделено на взвешенную и растворенную части, первая из которых осаждается под действием силы тяжести.

В блоке 3-го уровня организации, разработанного для б. Картахена, в явном виде учтена роль бактерий в минерализации органического вещества, что позволяет более точно описать пространственно-временную изменчивость моделируемых характеристик. Предложена новая схема включения бактериопланктона в математическую структуру модели, учитывающая влияние плотности популяции бактерий на их смертность, различия в соотношениях между биогенными элементами в составе неживого органического вещества естественного и антропогенного происхождения.

Наиболее комплексный вариант химико-биологического блока модели эвтрофикации (4-го уровня иерархии), разработанный для лимана Сиенага Гранде де Санта-Марта, включает в себя в качестве переменных, помимо бактерий, зоопланктон и является упрощенным вариантом модели функционирования водной экосистемы. При включении зоопланктона в структуру блока эвтрофикации предполагается, что его кормовую базу составляют фитопланктон, бактериопланктон, детрит и часть организмов самого зоопланктона. Траты на обмен (дыхание) зоопланктона рассматриваются как процесс регенерации минеральных форм азота и фосфора, а продукты его жизнедеятельности – неусвоенные остатки пищи, включаются в пул неживого органического вещества.

Модель эвтрофикации с химико-биологическими блоками 1-го и 2-го уровней иерархии целесообразно использовать для гипертрофных и эвтрофных водных экосистем; 3-го уровня – для водных объектов и акваторий с высокой степенью сапробности вод и значительными пространственными неоднородностями концентрации косного органического вещества; 4-го уровня – для мезотрофных водных экосистем.

Предложенная модель использовалась как инструмент для прогнозирования экологических последствий, оценки целесообразности и эффективности различных управленческих решений, направленных на сохранение и улучшение качества вод указанных водных объектов.

Для каждого из исследуемых водных объектов, на основе результатов численных имитационных экспериментов с модификациями модели эвтрофикации, определены научно обоснованные стратегии реализации природоохранных мероприятий, направленных на улучшение качества их вод.

Литература

- Иванов В.А., Тучковенко Ю.С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем.– Севастополь: МГИ НАН Украины. 2006.- 368 с.
Hess K.W. MECCA Programs documentation: Technical Report / NOAA.– NESDIS 46.– Washington, D.C., 1989.– 97p.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОСОБИ И РЕГУЛЯЦИЯ ПОПУЛЯЦИИ – ВЛИЯНИЕ ВНУТРИВИДОВОЙ КОНКУРЕНЦИИ

Ухманский Я.

Центр Экологических Исследований, Польская Академия Наук, Дзеканув Лесны, Польша
januch@cbe-pan.pl

В классических моделях регуляция популяции осуществляется за счёт того, что модели эти обладают стабильными решениями. Индивидуальные модели таких свойств не имеют. Но индивидуальные модели описывают интеракции между особями. Такой важной интеракцией является внутривидовая конкуренция. Конкуренция приводит к неравному распределению ресурсов между конкурирующими особями, а это в свою очередь рождает их изменчивость. Пользуясь индивидуальными моделями можно показать, что регуляция популяции может быть результатом изменчивости особей. Будет представлена индивидуальная модель, которая покажет, что популяция, состоящая из одинаковых особей, вымирает. Популяция будет существовать длительное время, если она будет состоять из различных особей и тогда можно будет показать, что такое регуляция и что может влиять на ее эффективность. Эта модель описывает вид с довольно длительным жизненным циклом и с разделенными поколениями, что позволяет развитие различий между особями и не допускает конкуренции между молодыми и взрослыми. Когда жизненный цикл короткий и нет возможности развития различий между особями или поколения не разделены, тогда нужно предполагать, что ключевую роль играют другие эволюционно-экологические механизмы для обеспечения длительного существования популяции. Будет представлено, как ведёт себя вышеупомянутая модель, когда особи живут не в одной локальной среде, а на многих островах, между которыми возможна дисперсия. Будет проанализировано влияние динамики ресурсов, числа островов и индивидуальных вкладов особи в дисперсию на динамику всей метапопуляции.

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ СООБЩЕСТВ МИКРООРГАНИЗМОВ

Фурсова П.В.

Биологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

fursova@biophys.msu.ru

Аннотация: изучена возможность регулирования состава сообщества, которую предоставляет вариационная модель экологического сообщества. Для диссоциантов бактерий *Pseudomonas aeruginosa* получены зависимости относительных численностей микроорганизмов от начальных отношений запасов питательных веществ в среде. Показана теоретическая возможность управления составом сообщества. Смена доминирующего вида при изменении отношения ресурсов проиллюстрирована на примере сообщества протококковых водорослей.

1. Введение

Одной из важнейших целей количественной экологии сообществ является умение рассчитывать численность каждой из входящих в сообщество популяций организмов как функцию доступных ресурсов среды. Практическое применение подобных расчетов заключается в возможности управлять структурой сообщества с помощью внешних факторов – изменять видовой состав и доминирование видов, целенаправленно увеличивать или уменьшать численности выбранных групп организмов. Интерес к подобным прикладным задачам связан с тем, что параметры биологических процессов, урожай продуцируемых веществ сильно зависят от доли, которая в биомассе сообщества приходится на те или иные виды организмов.

В работе продемонстрированы возможности регулирования состава смешанной культуры микроорганизмов методом, предсказанным вариационной моделью экологического сообщества.

2. Вариационная модель

Предложена модель сообщества одноклеточных организмов, потребляющих ресурсы, которые не могут заменить друг друга, поскольку выполняют различные функции по отношению к росту. В модели допустимы деление и смертность клеток, но не их слияние. В лабораторных условиях описываемая модель соответствует культивированию без добавления или изъятия ресурсов и микроорганизмов. Изучено развитие поликультуры до остановки роста, вызванной исчерпанием одного из ресурсов, но не какими-либо иными причинами.

Стационарная стадия роста сообщества описана решением вариационной задачи:

$$\begin{cases} H(n_1, n_2, \dots, n_w) = n \ln n - \sum_{i=1}^w n_i \ln n_i \rightarrow \text{extr}, \\ \sum_{i=1}^w q_i^k n_i \leq L^k, k = \overline{1, m}, \\ \sum_{i=1}^w n_i = n, \\ n_i \geq 0, i = \overline{1, w}, \end{cases} \quad (1)$$

где n_i – численности групп организмов, образующих сообщество, w – число групп в сообществе, (L^1, L^2, \dots, L^m) – количества всех потребляемых сообществом ресурсов среды в начале опыта, q_i^k – количество k -ого ресурса, необходимое для деления клеток группы i , в расчете на одну клетку (потребность организма группы i в ресурсе k) (Левич и др., 1994; Levich, 2000).

В рамках вариационной модели потребления и роста данные о потребностях организмов позволяют в зависимости от начального состава среды определять те ресурсы, которые будут ограничивать рост культуры. Знание лимитирующего фактора, в свою

очередь, дает возможность рассчитать состав сообщества (доли каждой из образующих его групп клеток) на стационарной стадии развития.

Возможность управления составом сообщества предоставляет следующая особенность решения вариационной задачи. Установлено, что относительные численности видов на стационарной стадии роста зависят только от отношений начальных концентраций полностью потребляемых сообществом ресурсов среды (Левич и др., 1993). Именно это свойство позволяет регулировать состав сообщества: изменяя отношения запасов питательных веществ в начальной среде, получать различные относительные численности видов на стационарной стадии роста.

3. Результаты и обсуждение

Экспериментальными объектами работы являлись диссоцианты бактерий *Pseudomonas aeruginosa*, однако, предлагаемый подход справедлив и для многих микроводорослей (Фурсова и др., 2008; Левич и др., 1997).

Полученные данные о величинах потребностей и произведенные расчеты численностей диссоциантов в каждой из областей лимитирования позволили проанализировать возможные пути регулирования состава культур с помощью изменения отношения запаса ресурсов (Фурсова и др., 2008). Регулирование состава возможно лишь в задаваемых моделью пределах. Оказалось, что для исследованных диссоциантов *P.aeruginosa* с их значениями потребностей нельзя существенно изменять структуру сообщества. Это связано, во-первых, с узостью интервалов, задающих области многофакторного лимитирования, в сравнении с точностью, с которой могут быть составлены исходные среды, а во-вторых, с незначительными различиями состава сообщества в разных стратах по сравнению с погрешностью определения долей диссоциантов. Однако, при "подходящих" значениях потребностей, варьируя соотношение питательных веществ в среде, можно получать на стационарной стадии роста различные распределения групп по рангам (от наименее до наиболее многочисленной) (Левич и др., 1997).

Литература

- Левич А.П., Алексеев В.Л., Никулин В.А. Математические аспекты вариационного моделирования в экологии сообществ // Математическое моделирование.- 1994.- Т.6, №5.- С.55-76.
- Левич А.П., Алексеев В.Л., Рыбакова С.Ю. Оптимизация структуры экологических сообществ: модельный анализ // Биофизика.- 1993.- Т.38, вып.5.- С. 877-885.
- Левич А.П., Максимов В.Н., Булгаков Н.Г. Экспериментальная и теоретическая экология фитопланктона: управление структурой и функциями сообществ.- М.: Изд-во НИЛ, 1997.- 188с.
- Фурсова П.В., Милько Е.С., Левич А.П. Лимитирующие ресурсы и состав сообщества бактерий: эксперименты и модельный анализ.- М.: Геос, 2008.- 162 с.
- Levich A.P. Variational modelling theorems and algocoenoses functioning principles // Ecological Modelling.- 2000.- V.131, № 2-3.- P.207-227.

ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ КОНКУРЕНЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ НА РЫНКЕ ТРУДА РЕГИОНА (НА ПРИМЕРЕ ЕВРЕЙСКОЙ АВТОНОМНОЙ ОБЛАСТИ)

Хавинсон М.Ю.

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия
havinson@list.ru

Аннотация: работа посвящена описанию математической модели конкуренции разновозрастных специалистов на региональном рынке труда. Для Еврейской автономной области с помощью модели получены различные сценарии динамики численности занятых когорт 20-24, 25-29 лет.

В современных условиях экономического кризиса довольно актуальными для исследования являются вопросы устойчивости социально-экономических систем. Одной из таких систем является региональный рынок труда с процессами конкуренции специалистов разных возрастов.

Еврейская автономная область может быть отнесена к «малым» регионам России (по численности населения), и, следовательно, взаимодействия возрастных групп на рынке труда автономии более чувствительны к влиянию различных социально-экономических факторов, чем соответствующие взаимодействия в крупных регионах. Для анализа и построения модели конкуренции разновозрастных специалистов рассмотрена динамика численности когорт молодых специалистов до 20, 20-24, 25-29 лет в ЕАО за 2000-2006 гг.

Модель для описания процессов конкуренции построена по принципу модели Лотки-Вольтерра, но в основу положен не экспоненциальный рост, а экспоненциальный рост с насыщением. В итоге получены уравнения следующего вида:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = b_0 - (K_0 + \alpha_0 x_1 + \alpha_1 x_2)x_0, \\ \dot{x}_1 = b_1 - (K_1 + \beta_0 x_0 + \beta_1 x_2)x_1, \\ \dot{x}_2 = b_2 - (K_2 + \gamma_0 x_0 + \gamma_1 x_1)x_2, \end{cases}$$

где x_i – численность занятых в когорте,

b_i – ежегодный приток занятых в когорту,

K_i – коэффициент убыли занятых без взаимодействий с другими когортами,

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – коэффициенты влияния других когорт,

i – условный номер когорты ($i = 0$ – когорта до 20 лет, $i = 1$ – когорта 20-24 лет, $i = 2$ – когорта 25-29 лет).

Отметим, что положительные $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ соответствуют конкурентным взаимодействиям, отрицательные – отношениям взаимопомощи. Конкуренция на рынке труда может выражаться в том, что на одно рабочее место претендуют несколько человек, и в зависимости от образования, профессиональных качеств, предпочтения работодателя и других факторов осуществляется «фильтрация» претендентов. Взаимопомощь (в биологии мутуализм, комменсализм) может проявляться в распространении информации (пропагандой работы при условии наличия свободных рабочих мест), отношениями «мастер-ученик» и т.д.

В результате численного исследования модели получены 4 сценария динамики численности когорт, выражающиеся в наличие разной степени конкуренции на рынке труда ЕАО. На рисунке представлены фазовые портреты динамики численности занятых когорт 20-24 и 25-29 лет при незначительной (устойчивое стационарное состояние), слабой (устойчивый фокус), средней и сильной конкуренции (замкнутые предельные кривые) соответственно. Квадратными метками обозначены фактические данные, точками – точки модельной фазовой кривой.

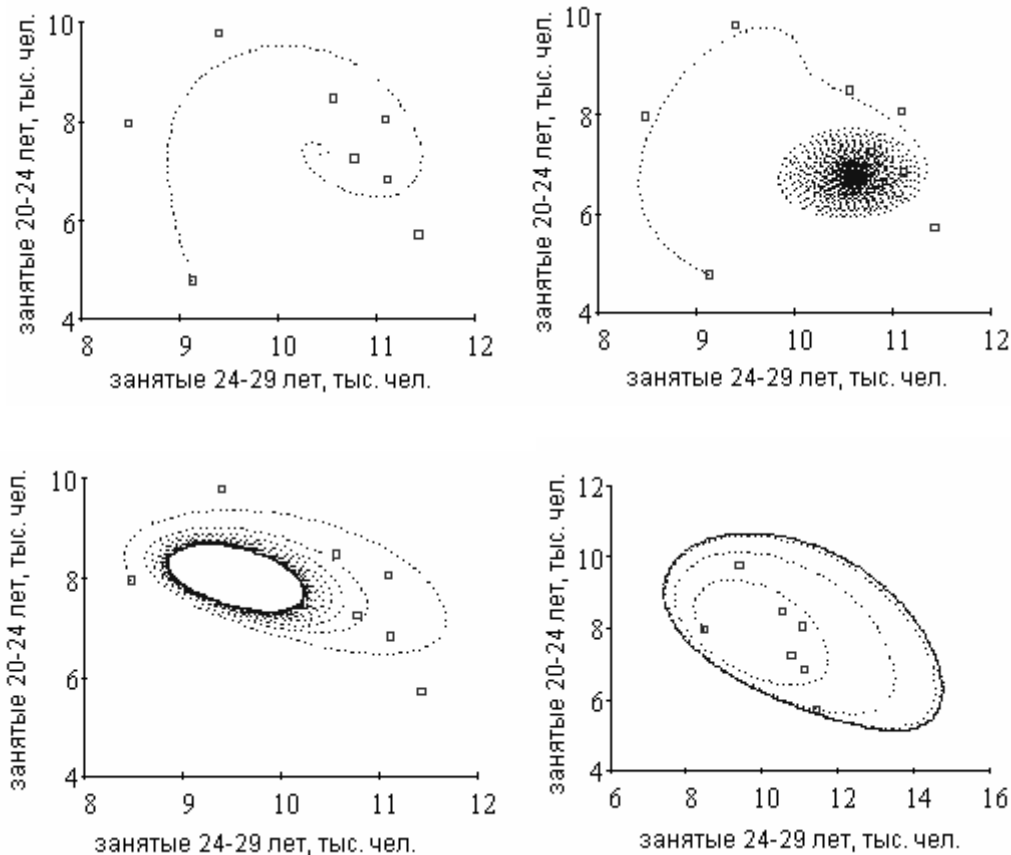


Рисунок. Фактические данные и фазовые портреты модели

Полученная модель является некоторой основой для построения более сложных моделей социально-экономических взаимодействий занятых на региональном рынке труда. Результаты моделирования позволяют определить ситуацию на рынке труда области как относительно устойчивую. Наиболее вероятные сценарии стремления к устойчивому состоянию описывают незначительную или низкую конкуренцию, а отклонения фактических данных от соответствующих узлов модельных кривых свидетельствуют о сложных социально-экономических взаимодействиях на рынке труда ЕАО, не ограничивающихся конкуренцией за рабочие места.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ и ЕАО 08-01-98505-р_восток_а «Математическое моделирование сценариев развития региональных природных и природно-хозяйственных систем (на примере Еврейской автономной области)», гранта ДВО РАН 09-III-A-09-498 «Исследование состояния и сценариев развития природных территориальных комплексов российской части Среднего Приамурья».

Литература

- Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование.- М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976.- 288 с.
- Короновский А.А., Трубецков Д.И. Нелинейная динамика в действии: Как идеи нелинейной динамики проникают в экологию, экономику и социальные науки.- Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2002.- 324 с.
- Хавинсон М.Ю. Подходы к моделированию динамики численности занятых региона (на примере Еврейской автономной области) // Современные проблемы регионального развития: материалы II междунар. науч. конф. Биробиджан, 6-9 октября 2008 г. / Под ред. Е.Я. Фрисмана.- Биробиджан: ИКАРП ДВО РАН, 2008.- С. 225-226.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗНООБРАЗИЯ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ ДИНАМИКИ КЛИМАТА И ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Ханина Л.Г.¹, Бобровский М.В.², Комаров А.С.², Шанин В.Н.², Быховец С.С.², Михайлов А.В.²

¹ Учреждение РАН Институт математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия
lkhanina@rambler.ru

² Учреждение РАН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия
maxim.bobrovsky@gmail.com

Аннотация: Модели EFIMOD и BioCalc использованы для прогноза и анализа динамики разнообразия лесного напочвенного покрова при двух сценариях ведения лесного хозяйства (рубки и заповедание) и двух климатических сценариях (стационар и резкое потепление). Для Мантуровского лесхоза (Костромская область) результаты моделирования показали, что рубки оказывают большее влияние на биоразнообразие растительности, чем прогнозируемое изменение климата.

Ранее нами был предложен алгоритм моделирования динамики биоразнообразия лесного напочвенного покрова на основе: а) данных учета лесного фонда (лесотаксационных описаний), б) функциональных (эколого-ценотических) групп видов растений; в) базы данных геоботанических описаний растительности; г) временных рядов динамики параметров лесных экосистем. Для реализации предложенного алгоритма использовалась модель системы «лес-почва» EFIMOD (Komarov et al., 2003) и оригинальный программный модуль BioCalc (Ханина и др., 2006). Алгоритм был апробирован на небольших модельных территориях (площадью несколько сот гектар) для 4-х сценариев лесохозяйственных воздействий (Ханина и др., 2006; Khanina et al., 2007). Целью настоящей работы являлся прогноз и анализ динамики разнообразия растительности на большой территории (размера более сотни тысяч гектар) при одновременном симулировании различных режимов лесохозяйственных воздействий и климатических изменений.

Объектом было взято Мантуровское лесничество (Костромская обл.) площадью около 200 тыс. га. В качестве исходных данных были взяты лесотаксационные описания 1997 г.. Моделировали два лесохозяйственных сценария – заповедание (NAT) и сплошные рубки (LR), и два климатических режима – стационарный (_S) и резкого потепления (_C). Климатические режимы задавались из набора сценариев, скомпилированных Mitchell et al. (2004). Использовалась глобальная модель переноса HadCM3 и сценарий эмиссии CO₂ A1Fi. Всего моделировали 4 сценария: 200 лет динамики лесных экосистем в условиях стационарного климата без рубок (NAT_S) и с рубками (LR_S) и 103 года в условиях изменения климата без рубок (NAT_C) и с рубками (LR_C). Результаты моделирования визуализировались в системе CommonGIS (Andrienko, Andrienko, 1999).

Результаты моделирования показали, что на моделируемой территории рубки оказывают большее влияние на биоразнообразие растительности, чем прогнозируемое изменение климата. Заповедный режим ведет к существенному возрастанию видового разнообразия за счет постепенного формирования богатого хвойно-широколиственного леса с доминированием нитрофильных, неморальных и бореальных видов трав. Изменение климата ведет к небольшому уменьшению видового разнообразия за счет уменьшения доли наиболее богатых лесов с доминированием нитрофильных видов. При рубках видовое разнообразие растительности значительно ниже, чем при заповедании, и изменение климата практически на нем не сказывается (рисунок 1, 2). Таким образом, в исследуемом регионе выбранный климатический сценарий в большей степени влияет на растительность в условиях ее заповедания, чем в моделируемом режиме сплошных рубок.

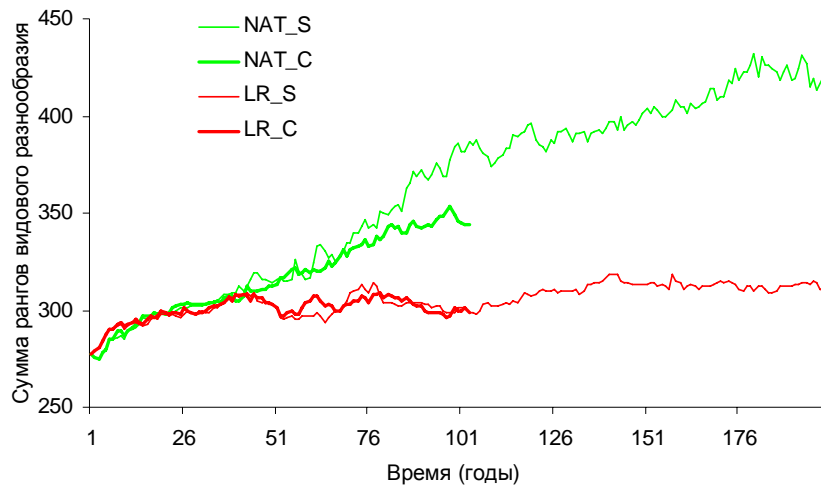


Рисунок 1. Модельная динамика видового разнообразия при различных сценариях.
Обозначения сценариев в тексте

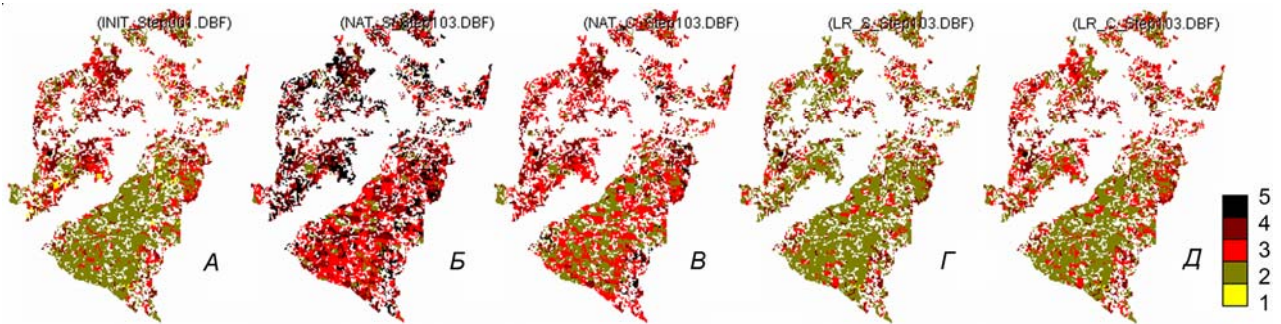


Рисунок 2. Карта-схема расположения контуров растительности с разными рангами видового разнообразия:

A – начальное состояние, *Б, В, Г* – после 103-х лет по сценариям NAT_S, NAT_C, LR_S и LR_C, соответственно. Ранги видового разнообразия: 1 – до 10 видов на 100 м², 2 – от 10 до 20 видов на 100 м², 3 – от 20 до 30 видов на 100 м², 4 – от 30 до 40 видов на 100 м², 5 – свыше 40 видов на 100 м². Обозначения сценариев в тексте

Моделирование динамики лесного напочвенного покрова при различных сценариях изменения климата и режимах лесохозяйственной деятельности показало необходимость учета лесохозяйственных воздействий при оценке последствий глобального изменения климата на биологическое разнообразие лесных экосистем.

Литература

- Ханина Л.Г., Бобровский М.В., Комаров А.С., Михайлов А.В., Быховец С.С., Лукьянов А.М. Моделирование динамики разнообразия лесного напочвенного покрова // Лесоведение.- 2006.- № 1.- С. 70-80.
- Andrienko G., Andrienko N. Interactive maps for visual data exploration // Int. J. Geogr. Inf. Sci.- 1999.- V. 13.- P. 355-374.
- Khanina L., Bobrovsky M., Komarov A., Mikhailov A. Modelling dynamics of forest ground vegetation diversity under different forest management regimes // Forest ecology and management.- 2007.- V. 248.- P. 80-94.
- Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L., Nadporozhskaya M.A., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S., Zudina E.V., Zoubkova E.V. EFIMOD 2 - a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecological modelling.- 2003.- V. 170.- P. 373-392.
- Mitchell T.D., Carter T.R., Jones P.D., Hulme M., New M. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100).- Tyndall Centre for Climate Change Research, 2004.- Working Paper No. 55.- 25 pp.

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ КАЛЬЦИЯ В СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Хораськина Ю.С.¹, Комаров А.С.¹, Безрукова М.Г.¹, Лукина Н.В.², М.А. Орлова²

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

yulia_hor@rambler.ru

²Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

lukina@cepl.rssi.ru

Аннотация: в данной работе представлены результаты моделирования круговорота кальция в северотаежных лесных экосистемах. Модель представляет собой описание круговорота на основе потока вещества между пулами, включая подробное описание почвенной части круговорота – трансформация и минерализация подстилки и др. Для калибровки модели использовались экспериментальные данные по северотаежным лесам.

1. Биологический круговорот кальция

Кальций – жизненно необходимый элемент для прокариот, грибов, растений и животных. Неорганический кальций присутствует также в почвенной части экосистемы – как структурный компонент первичных и вторичных минералов, почвенно-поглощающего комплекса (ППК) и как катион почвенного раствора. В ППК из щелочно-земельных металлов больше всего кальция, и поэтому он очень важен для регуляции почвенного pH, от которого, в свою очередь, зависит регуляция круговоротов других элементов.

Доступность кальция для растений зависит от соотношения между поступлением из атмосферных выпадений, катионного обмена, выветривания минералов, минерализации органического вещества почв (OpВП) и потерь при выщелачивании и изъятии лесной растительности при вырубках. В сбалансированной экосистеме объем Ca, поступившего с осадками, в результате выветривания и минерализации опада приблизительно равен поступившему в растения и вынесенному с грунтовыми водами (Likens et al., 1998).

2. Описание модели

Мы построили простейшую модель динамики пулов кальция в лесной почве, такую, чтобы мы смогли связать динамику пулов кальция с динамикой пулов органического вещества почвы, в том числе и с пулами углерода и азота, используя при этом модель динамики органического вещества ROMUL (Chertov et al., 2001).

В нашей модели, пока ориентированной на северотаежные экосистемы, мы придерживаемся следующей схемы пулов OpВП.

L – растительный опад, еще неразложившийся. F – OpВП среднего горизонта лесной подстилки. В этом пуле находятся полуразложившиеся растительные остатки, имеется также доступный для питания растений кальций. Здесь же сосредоточена основная масса вторичных минералов кальция – оксалатов. H – пул, содержащий грубый гумус и часть неразложившихся растительных остатков. Соответствует нижнему горизонту подстилки.

Каждому пулу OpВП соответствует свой пул кальция, причем для L этот пул делится на фракции соответственно фракциям поступающего опада – хвоя, ветви, ствол, корни. В F фракционные пулы объединяются в надземный и подземный (из корневого опада) пулы кальция, а в H они объединяются в один пул кальция. Мы выделяем в отдельный пул доступный для растений (и микроорганизмов) кальций – Ca available (Av), включая в него кальций почвенного раствора и обменный кальций. Поскольку в модели не введена отдельно жидкая фаза – почвенный раствор, то этот пул выступает его аналогом.

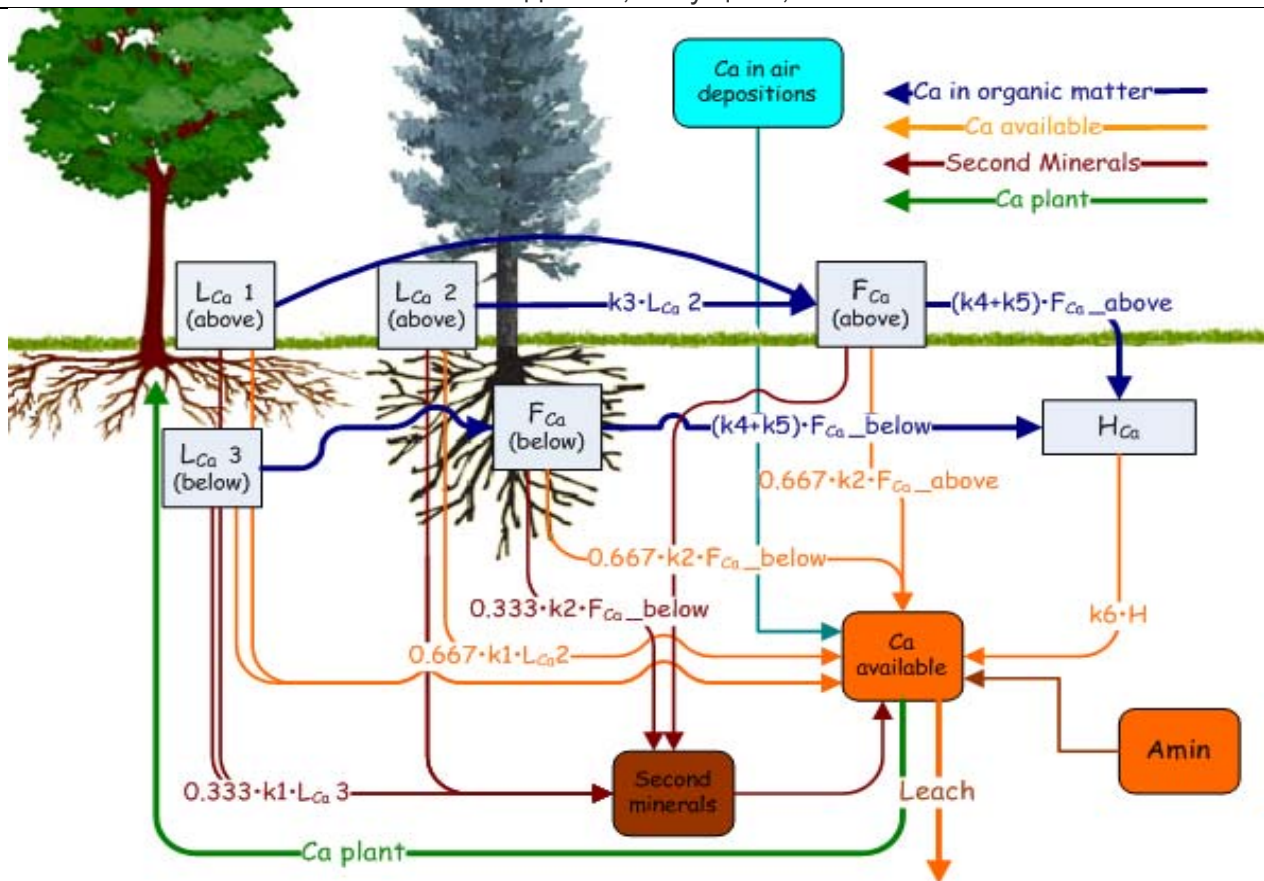


Рис.1. Схема подмодели круговорота кальция.

Кроме доступного кальция существует еще несколько «внегоризонтных» пулов. S_m – пул вторичных минералов кальция -- оксалатов кальция (веввелитов и ведделитов). Эти минералы хорошо растворимы и образуются в подстилке при условиях недостатка влаги или поступают с опадом, образуясь в клетках растений. Вследствие малого количества материалов по динамике этих минералов, мы принимаем, что в процессе разложения опада и подстилки часть кальция осаждается в виде оксалатов в размере 1/3 от высвободившегося кальция. Остальная часть поступает в пул доступного кальция A_v . В течение года кальций вторичных минералов накапливается в пуле S_m . Весной, при достижении почвой положительных температур, что можно считать началом снеготаяния, происходит растворение всех вторичных минералов и кальций из S_m поступает в A_v . Далее кальций опять накапливается в S_m . A_{min} – пул ежегодного поступления кальция в доступный в результате выветривания минералов. Является входным параметром и может рассчитываться отдельно, если известен минералогический состав, с помощью других моделей, например, PROFILE (Sverdrup, 1996). Plant – пул потребления Ca растениями. Соответствует необходимому количеству кальция для годового прироста древесного насаждения и определяется по биомассе прироста и концентрации кальция в отдельных органах деревьев. Изъятие производится один раз в год из пула доступного кальция в тот же месяц, когда происходит поступление туда кальция вторичных минералов. A_{tm} – пул кальция, поступающего с твердыми и жидкими атмосферными выпадениями. Мы предполагаем, что этот кальций сразу поступает в доступный пул. Leach – кальций, который из доступного пула выносится за почвенный профиль.

Между описанными выше горизонтами происходят процессы, которые описываются рядом коэффициентов скоростей, зависящих от температурно-влажностных условий. K_1 и K_3 – скорости минерализации и трансформации L в F . K_2 и K_4 – скорости минерализации и трансформации горизонта F в H . K_6 – скорость минерализации H .

Описанные процессы трансформации органического вещества и его минерализации и соответственно переход кальция из одного пула в другой можно записать в виде системы

обыкновенных линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами для каждой из фракций опада и затем произвести описанное выше суммирование по фракциям. Программная реализация модели выполнена в среде Borland Developer Studio на языке Object Pascal. Зависимости коэффициентов от температуры и влажности почв, а также от содержания азота и зольности фракций опада вычисляются так же, как в модели ROMUL (Моделирование динамики..., 2007; Безрукова и др., 2009), однако каждый коэффициент, вычисленный в ROMULe для трансформации пулов ОрВП в случае динамики пулов кальция имеет свою поправку. Такая же система поправок существует и в ROMULe для описания динамики пулов азота.

3. Материалы и методы при калибровке модели

Вычислить поправки можно в предположении существования устойчивого состояния (steady state) системы в конкретных стационарных условиях. В этом случае начальные значения всех переменных системы должны оставаться практически постоянными при прогоне модели. Для калибровки модели было проведено моделирование стационарного состояния системы на примере ельника зеленомошно-кустарничкового в Мончегорской северной тайге по данным из работы (Лукина, Никонов, 1996) и др. Потребление растениями кальция в этих условиях равно поступлению с опадом. Атмосферные выпадения, выветривание и выщелачивание равны нулю. Таким образом, поступление в почву с опадом за год и потребление растениями кальция равны. Моделирование проводилось на 100 лет с климатическими параметрами Мончегорска.

4. Результаты

В результате прогонов были получены следующие значения поправок: для скорости преобразования свежего опада в пул F поправка составляет 0,8; переход кальция из пула F во вторичные минералы был принят как 0,33; а переход из пула F в пул H происходит медленнее, чем пул всего органического вещества в 0,9 раза. Все поправочные коэффициенты указывают на более медленную динамику по сравнению с динамикой ОрВП. Результаты удовлетворительно верифицированы по единичным данным по разложению ОрВП, в которых происходил контроль содержания кальция.

В дальнейшем предполагается учет динамики пулов кальция в изменении pH почвы и соответствующем учете зависимости скоростей разложения ОрВП от кислотности почвы. Тем самым полная модель перестанет быть линейной, но сохранит возможности инициализации по экспериментальным данным.

Работа поддержана грантом РФФИ 09-04-01209.

Литература

- Безрукова М.Г., Быховец С.С., Грабарник П.Я., Ларионова А.А., Надпорожская М.А. Моделирование разложения органического вещества: сравнение Байесовского подхода и метода максимального правдоподобия // Настоящий сборник.
- Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. В 2-х ч. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1996.— ч.1 213 с., ч.2 192 с.
- Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / [отв. ред. В.Н. Кудеяров].- М.: Наука, 2007.- 380 с.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamic as a sustainable tool for forest ecosystem modeling // Ecological Modelling.- 2001.– 138,- P. 289-308.
- Likens et al. The biogeochemistry of calcium at Hubbard Brook // Biogeochemistry. – 1998. – 41. – p. 89.– 173.
- Sverdrup H. Geochemistry, the key to understanding environmental chemistry.// The science of the total environment.– 1996.– 96.– p. 67-87.

ПРОГНОЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ МЕСТООБИТАНИЙ СИБИРСКОГО ШЕЛКОПРЯДА ДЛЯ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Чебакова Н.М., Парфенова Е.И., Баранчиков Ю.Н.

Институт леса СО РАН, Красноярск, Россия
ncheby@forest.akadem.ru

Аннотация: создана биоклиматическая модель сибирского шелкопряда (*Dendrolimus superans sibiricus*), показавшая хорошее совпадение модельных и реальных ареалов. Прогноз по сценариям Центра Хадли HadCM3 A1FI и B1 показал, что местообитания, пригодные для сибирского шелкопряда значительно сократятся к 2080 году, сдвигаясь в горы Скандинавии и Сибири и на северное побережье Евразии. Следовательно, в соответствии с нашим прогнозом, сибирский шелкопряд не следует рассматривать как вид, опасный для Европы.

Введение. Региональные исследования изменений климата в Европе и Сибири уже зарегистрировали потепление климата к концу XX века, особенно в последнюю декаду. Подходящий климат и пищевой ресурс - такие древесные виды как лиственницы, пихта и кедр (*Larix spp., Abies sibirica, and Pinus sibirica*) – два первостепенных фактора, определяющих как распространение, так и возможность вспышек сибирского шелкопряда (*Dendrolimus superans sibiricus*). Потепление климата может существенно повлиять на его пространственное распределение. Целями настоящей работы было: 1. создать биоклиматическую модель сибирского шелкопряда, описывающую климатические параметры его существования и область возможных вспышек внутри этих пределов; 2. смоделировать пространственное размещение сибирского шелкопряда в современном климате и в изменяющемся климате Северной Евразии к 2080 году в соответствии со сценариями изменения климата (IPCC, 2001).

Методы. Наша конвертная биоклиматическая модель сибирского шелкопряда основана на его биологических потребностях в тепле и влаге, выраженных через термические условия теплого периода (сумму градусо-дней с температурой выше 5°C, GDD5), и условия увлажнения (годовой индекс увлажнения, отношение градусо-дней тепла к годовым осадкам, AMI). Климатические параметры распределения сибирского шелкопряда были определены, используя данные лесопатологической инвентаризации и литературные данные. Пять качественных классов уровня повреждений вспышками сибирского шелкопряда пихтовых и кедровых насаждений в южной тайге и низкогорьях были выделены, основываясь на частоте вспышек и площади повреждений за период 1920-1997 г.г. в Центральной Сибири (Кондаков и др., 2001). Данные около 50 метеостанций региона исследований были использованы для построения ординации классов повреждений в осях GDD5 и AMI. Эта ординация дала возможность определить климатические пределы существования сибирского шелкопряда: 950-1350°C GDD5 и 1.3-3.0 AMI; и климатическую локализацию области вспышек: 1100-1250°C GDD5 и 2.0-2.5 AMI.

Для создания карты ареала и оптимума ареала сибирского шелкопряда биоклиматическая модель была сопряжена с климатическими слоями северной Евразии, созданными по данным 300 метеостанций Европы и около 1000 метеостанций Сибири, обработанным в программе ANUSPLIN v.4.1 (Hutchinson, 2000), генерирующей сплайновые поверхности на цифровую модель рельефа (ЦМР) с разрешением 0.1 градуса.

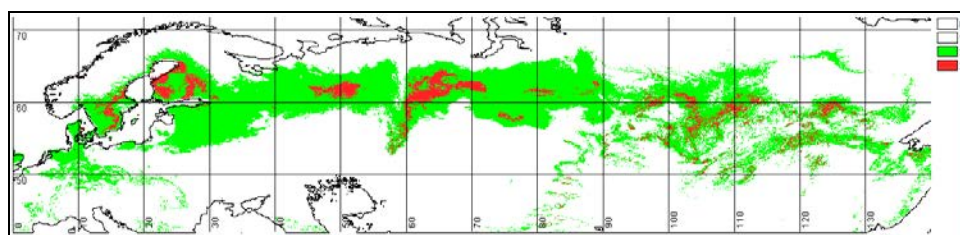
Для оценки влияния изменений климата на возможное перемещение ареала и оптимума ареала сибирского шелкопряда к 2080 году для территории Евразии были применены два сценария Центра Хадли (Hadley Center, UK), HadCM3A1FI and HadCM3B1.

Результаты и обсуждение. Карта климатического ареала сибирского шелкопряда, созданная на базе нашей биоклиматической модели (рисунок 1а) была сопряжена с картой древесных пород-хозяев (Леса СССР, 1990), в результате была получена карта потенциальных современных местообитаний сибирского шелкопряда для Сибири и европейской части

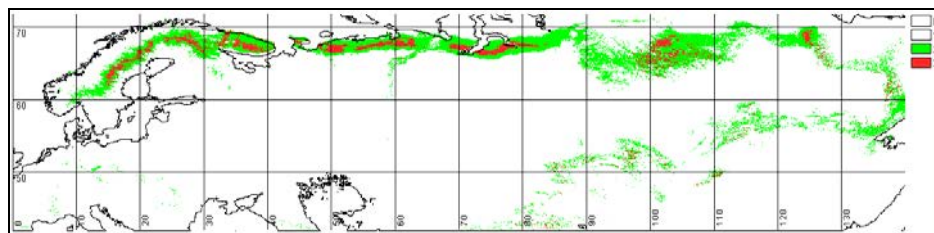
России. В Сибири климатический потенциал сибирского шелкопряда ограничен распространением деревьев-хозяев *Abies sibirica*, *Pinus sibirica* и *Larix spp.*. В европейской части России климатический потенциал сибирского шелкопряда ограничен распространением *Picea obovata*, берущей на себя роль кормовой базы. Сравнение модельного и зарегистрированного ареала сибирского шелкопряда (Рожков, 1963) показали, что модель хорошо работает для Сибири. В европейской части России сибирский шелкопряд был найден не в предсказанных моделью местообитаниях, а несколько южнее.

В соответствии с умеренным потеплением сценария HadCM3 B1 ареал сибирского шелкопряда к 2080 году сдвинется далеко на север, покрывая все горы Скандинавии и достигая северного побережья Восточной Европы и Западной Сибири, а также высокогорья Центральной и Восточной Сибири (рисунок 1б). Местообитания для вспышек в Евразии будут очень ограниченными. В соответствии со сценарием HadCM3 A1FI потенциальные местообитания сибирского шелкопряда еще более сократятся (рисунок 1в) и сдвинутся дальше на север и вверх в горы.

а.



б.



в.

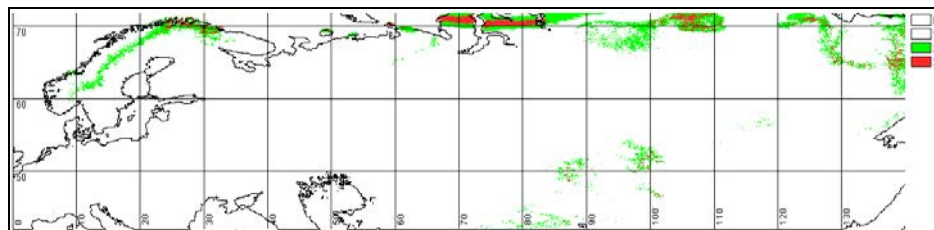


Рисунок 1. Потенциальное размещение сибирского шелкопряда в Северной Евразии в современном климате (а) и к 2080 по сценариям HadCM B1 (б) и HadCM A1FI (в): зеленый – климатический ареал; красный – оптимум ареала

Литература

- Кондаков Ю. П., Баранчиков Ю. Н., Черкашин В. П., Корец М. А. Районы массового размножения сибирского шелкопряда в лесах Приенисейской Сибири / Карта (М 1:1 800 000).- Красноярск: ИЛ СО РАН, 2001.
- Рожков А.С. Сибирский шелкопряд.- 1963. Изд-во АН СССР.- 175 с.
- Hutchinson MF (2000) ANUSPLIN Version 4.1 User's Guide'. Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies, Canberra.
- IPCC, 2001. Climate change 2001: the Scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press. New York.- 881 p.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЦЕНОПОПУЛЯЦИЙ РАЗНЫХ ЖИЗНЕННЫХ ФОРМ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ТОЧЕЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Чижикова Н.А.¹, Фардеева М.Б.², Александрова С.В.¹

¹Кафедра моделирования экосистем, Казанский государственный университет
им. В. И. Ульянова-Ленина, Казань, Россия

chizhikova_n@rambler.ru

²Кафедра общей экологии, Казанский государственный университет им. В. И. Ульянова-Ленина, Казань, Россия

Аннотация: исследована пространственная структура видов разных жизненных форм: древесных, длиннокорневищных, короткорневищных травянистых видов. Применены методы анализа точечных распределений: анализ статистик пространственной структуры, построения моделей точечных процессов, формирующих пространственную структуру ценопопуляций.

Пространственная структура популяций – это характер распределения особей и их группировок в пространстве. Особенности пространственной структуры ценопопуляций (ЦП) растений зависят от многочисленных факторов и довольно сложны в изучении. Ряд авторов считают групповое размещение признаком угнетенности в сообществе, а случайное, напротив признаком процветания, предпосылка такому размещению – однородность среды фитоценоза, т.е. благоприятные условия произрастания. Контагиозное размещение в естественных условиях встречается часто и вызвано неоднородным распределением условий среды на площади фитоценоза. В настоящее время существует большое число методов для исследования пространственной структуры распределения особей и её закономерностей, однако наиболее точным способом исследования является картирование особей вида с учетом их онтогенетического состояния с последующим применением методов анализа точечных паттернов: анализа статистик пространственной структуры, построения моделей точечных процессов, формирующих пространственную структуру ЦП.

На кафедрах общей экологии и моделирования экосистем Казанского государственного университета ведется изучение пространственно-возрастной структуры ЦП видов разных жизненных форм методом заложения постоянных пробных площадок и построения карт-схем: длиннокорневищных видов *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Asarum europaeum*; короткорневищных орхидных видов *Cypripedium calceolus*, *Epipactis helleborine*; клональных видов: *Adonis vernalis*, *Pulsatilla patens*; клубнеобразующих орхидей: *Dactyloriza fuchsia*, *Dactyloriza incarnata*, *Dactyloriza maculata*, *Liparis loeselii*, *Neottianthe cucullata*, *Orchis militaris*, *Platanthera bifolia*; эфемероидных клубнеобразующих орхидей: *Corydalis bulbosa*, *Corydalis intermedia*.

Заложение площадок следовало единой методике. На основе данных была создана электронная информационная база по пространственной структуре ЦП видов (Фардеева и др., 2007; Chizhikova, 2008). Анализ пространственного размещения особей в ЦП проводится с помощью инструментов пакета spatstat (Baddeley et. al., 2005) языка статистического программирования R (R Development Core Team, 2006).

Статистики пространственной структуры видов растений, размножающихся семенным путем (некоторые деревья – сосна, береза, в меньшей степени ель и дуб, клубнеобразующие орхидеи и эфемероиды) легче интерпретировать. Семенная продуктивность этих видов достаточно высокая, поэтому в популяции можно встретить практически все возрастные онтогенетические группы, и каждый побег представляет собой самостоятельную особь или генету. Сложнее поддается анализу пространственная структура длиннокорневищных вегетативно-подвижных видов. Размещение особей в пространстве зависит с одной стороны от внешних условий, с другой – от биологических особенностей вида и особей, составляющих популяцию, от способов размножения, распространения и вегетативной подвижности видов. Пространственная структура популяций вида,

произрастающих в разных местообитаниях, в деталях отличается друг от друга, но особенности биоморфы, по-видимому, определяют общую специфику распределения особей в пространстве.

Литература

- Фардеева М.Б. , Чижикова Н.А. , Корчебокова О.В. Динамика пространственно-возрастной структуры клубнеобразующих орхидей // Вестник Тверского ГУ.– 2007.– № 8 (36).– С. 172-176.
- Baddeley A., Turner R., van Lieshout, M.-C. et. al. SPATSTAT: Spatial Point Pattern analysis, model-fitting and simulation. R package version 1. 8-3.– 2005.– URL <http://www.spatstat.org>.
- Chizhikova N.A., Fardeeva M.B., Rogova T.V., Saveliev A.A. Using of data bases and digital maps of species for investigations of spatial patterns at the local scale // 17th International Workshop European Vegetation Survey. Using phytosociological data to address ecological questions.– 2008.– Brno.– P. 22.
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.– 2006.– URL <http://www.R-project.org>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ CO₂ МЕЖДУ АТМОСФЕРОЙ И ВЕРХОВЫМ БОЛОТОМ ЮЖНОЙ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТАЙГИ

Шалухина Н.В.¹, Варлагин А.В.¹, Ли Ч.², Курбатова Ю.А.¹

¹*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северова РАН, Москва, Россия*
kurbatova.j@gmail.com

²*Институт исследования Земли, океанов и космоса Университета Нью Хемпшира, Нью Хемпшир, США*
changsheng.li@unh.edu

Аннотация: измерения нетто-экосистемного обмена CO₂ (NEE) были выполнены в течение трех вегетационных периодов на верховом болоте южной Европейской тайги. Наблюдения показали, что верховое болото может быть как источником, так и стоком CO₂ для атмосферы. Модель “Forest – DNDC” (денитрификации-декомпозиции) была применена для прогнозных оценок потоков CO₂ на верховом болоте в условиях изменений климата.

1. Введение

Углеродный баланс болот и заболоченных территорий в настоящий момент является ключевым вопросом современных экологических исследований в связи с существенной ролью болот в качестве значительного стока CO₂ из атмосферы. Однако, проведенные в последние годы наблюдения показали, что болотные экосистемы в течение ограниченных промежутков времени могут служить источником CO₂. (Alm et al., 1997; Arneeth et al., 2002). Основой данного исследования послужили результаты экспериментальных наблюдений за нетто – экосистемным обменом CO₂ на верховом болоте юга Валдайской возвышенности, полученные с помощью техники микровихревых пульсаций (eddy covariance). Основной задачей данного исследования стало сравнение экспериментальных данных и модельных оценок, полученных согласно “Forest – DNDC” – модели и оценка отклика экосистемы верхового болота на возможные климатические изменения.

2. Объект и методы

Верховое болото, на котором были выполнены экспериментальные исследования, расположено на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника в Тверской области (56°27' с.ш., 32°55' в.д.) и относится к талым с сезонным промерзанием выпуклым олиготрофным комплексным грядово-мочажинным болотам. Средняя глубина торфа 3.9 м. Климат заповедника умеренно континентальный со среднегодовой температурой воздуха 3.8°C и годовым количеством осадков 731 мм. Продолжительность безморозного периода в среднем составляет 111 дней.

Измерительный комплекс, данные которого были использованы в работе, в целом соответствовал измерительным комплексам долговременных наблюдений за потоками тепла, влаги и CO₂, используемым на сети станций мониторинга FLUXNET (<http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/index.cfm>) и описан в (Kurbatova et al., 2002). Комплекс позволяет получать высокочастотные, с осреднением до 0.5 часа, непрерывные значения NEE и гидрометеорологических параметров.

“Forest – DNDC” – модель – это численная модель, описывающая циклы углерода и азота (<http://www.dnrc.sr.unh.edu>). Модель может быть использована для прогнозных оценок продуктивности растительного покрова, температурно-влажностного режима почвы, динамики почвенного углерода и азота, и эмиссии следующих газов: N₂O, NO, N₂, NH₃, CH₄ и CO₂. Модель состоит из двух основных блоков. Первый блок включает три подмодели описывающие: температурно-влажностный режим почвы, процессы роста растительности, динамику почвенного углерода. Подмодели описывают зависимости между климатическими факторами, структурой почвы, растительным покровом, антропогенной активностью и температурно-влажностным режимом почвы, ее pH и пр. В данном исследовании на первом

шаге были уточнены параметры модели и на втором – модель была использована для прогнозных оценок. Были выполнены оценки потоков CO_2 , на основе пяти сценариев возрастания температуры воздуха и повышения/понижения уровня грунтовых вод, предполагая, что эти сценарии соответствуют будущим климатическим изменениям (IPCC 2007).

3. Результаты и обсуждение

Для анализа был выбран период наблюдений 27 марта – 19 ноября 1999 г. В этом году в течение вегетационного сезона наблюдался отрицательный водный баланс (испарение превышало осадки) и исследуемый болотный массив был источником CO_2 . Годовое количество осадков в этом году было 650 мм, но в июне и в июле было зарегистрировано только 30.9 и 47.6 мм, в то время как среднегодовое количество осадков в эти месяцы 74 и 87 мм.

Сравнение экспериментальных данных и результатов численного моделирования показало хорошую сопоставимость полученных оценок. Согласно “Forest –DNDC” - модели NEP была равна 284 кг С га^{-1} , согласно экспериментальным наблюдениям NEP соответствовала 258 кг С га^{-1} . Как результаты численного моделирования, так и экспериментальные данные показали хорошую зависимость потоков от внешних гидрометеорологических переменных. Согласно модели для вышеуказанного периода общая первичная продукция, автотрофное и гетеротрофное дыхание были равны 1992, 1212 и $1065 \text{ кг С га}^{-1}$ соответственно.

Различные климатические сценарии показали, что как рост температуры воздуха, так и увеличение глубины уровня грунтовых вод могут оказывать значительное влияние на потоки CO_2 между верховым болотом и атмосферой. Увеличение температуры воздуха на 2°C или 4°C приводит к увеличению потока CO_2 в атмосферу с 432 до 876 и $1429 \text{ кг С га}^{-1}$. Увеличение глубины уровня грунтовых вод на 10 и 20 см приводит к возрастанию NEP до 1040 и $1577 \text{ кг С га}^{-1}$. В случае, если температура воздуха будет выше на 4°C с одновременным увеличением глубины уровня грунтовых вод на 20 см поток CO_2 в атмосферу с поверхности верхового болота возрастет до $3828 \text{ кг С га}^{-1}$. Результаты численного моделирования показали, что нетто-поток CO_2 в условиях роста температуры воздуха и сухости климата определяется увеличением вклада гетеротрофного дыхания и уменьшением общей первичной продукции.

Исследования подтвердили, что для болотных экосистем уровень грунтовых вод является одним из главных факторов, лимитирующим поглощение углерода болотной растительностью и определяющим NEP.

Благодарности

Исследования поддержаны программами Отделения биологических наук РАН «Биологические ресурсы России», Президиума РАН «Биологическое разнообразие», РФФИ (проект №09-04-00151).

Литература

- Alm J., Talanov A., Saarnio S., Silvova J., Ikkonen E., Aaltonen H., Nykanen H., Martikainen P. Reconstruction of the carbon balance for miresites in a boreal oligotrophic pine fen // *Finland – Oecologia*-1997- 110- p.423- 431.
- Arneeth A., Kurbatova J., Kolle O., Shibistova O., Lloyd J., Vygodskaya N., Schulze E – D. Ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russia and a central Siberia bog. II. Interseasonal and interannual variability of CO_2 fluxes. // *Tellus.*- 2002.- 54B (5).-p. 514-530.
- IPCC 2007 Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC (Cambridge University Press) 960.
- Kurbatova, J.A., A. Arneeth, N. N. Vygodskaya, O. Kolle, A. V. Varlargin, I. M. Milyukova, N.M. Tchebakova, E.D.Schulze, and J. Lloyd. Comparative ecosystem - atmosphere exchange of energy and mass in European Russian and central Siberian bog. I. Interseasonal and interannual variability of energy and latent heat fluxes during the snowfree period // *Tellus*-2002- V. 54 B (5)- P. 497-513.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВЕДЕНИЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА НА БАЛАНС БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД

Шанин В.Н., Комаров А.С., Михайлов А.В.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, г. Пущино, Россия
shaninvn@gmail.com

Аннотация: индивидуально-ориентированная система моделей EFIMOD была использована для имитации динамики лесной растительности в региональном масштабе, в качестве входных данных использовались материалы лесоустройства. Имитационный эксперимент проводился при нескольких лесохозяйственных сценариях. Показано влияние режима лесопользования на баланс биогенных элементов в системе «лес-почва». Кроме этого, был разработан алгоритм генерализации таксационных данных.

1. Введение

В работе использовалась система моделей EFIMOD («Моделирование динамики...», 2007), которая служит для анализа динамики почвы и древостоя в лесных экосистемах бореальной и широколиственных зон. Система моделей является индивидуально-ориентированной; имитируемый древостой располагается на квадратной решетке, размеры клеток решетки выбраны таким образом, что в одной клетке не может находиться более одного дерева. Каждое дерево взаимодействует с соседними, предусмотрены два аспекта взаимодействия: затенение и конкуренция за доступный почвенный азот. Система состоит из четырех подмоделей: модели прироста биомассы отдельного дерева, модели древостоя, модели динамики органического вещества почвы и статистического генератора климата, который имитирует изменение климатических показателей с шагом в один месяц.

2. Исходные данные, объект и методы исследования

Для работы модели необходимы видовой состав древостоя на участке, возраст, средняя высота и диаметр для каждого вида, число деревьев на гектар, характеристики пулов органического вещества почвы. Большая часть этой информации имеется в лесоустроительных базах данных. Некоторые отсутствующие параметры могут быть легко вычислены. Например, высота, диаметр и число деревьев на один гектар указываются только для доминирующих видов; для остальных они могут быть рассчитаны по региональным таблицам хода роста, исходя из запаса конкретного вида и класса бонитета насаждения. Отсутствующие характеристики пулов органического вещества почвы были оценены на основе типа лесорастительных условий по Воробьеву-Погребняку и доминанта древостоя. В качестве экспериментального объекта был выбран Мантуровский лесхоз Костромской области; использованы материалы лесоустройства 1997 года. На начало моделирования на территории преобладали пионерные сообщества – березняки, сосняки и осинники (86%), только 14% территории занимали ельники. Преобладали молодые и средневозрастные древостои. Для проведения модельного эксперимента были разработаны 4 сценария: 1 – без рубок; 2 – с выборочными рубками; 3 – с рубками ухода и последующими сплошными рубками; 4 – с выборочными рубками с вырубкой лучших деревьев и последующими сплошными рубками. Продолжительность периода моделирования – 200 лет. Результаты моделирования анализировались по следующим переменным: 1) динамика запасов углерода в древостое, сухостое и валеже, почвенных пулах; 2) видовой состав древостоя и его возрастная структура.

3. Анализ результатов моделирования

При сценарии (1) запас углерода в почве слегка возрастает, затем остается относительно постоянным; при сценарии (2) – испытывает небольшие колебания, вызванные

выборочными рубками; при сценариях (3) и (4) происходит его снижение (в основном за счет подстилки и лабильного гумуса). Запас углерода в древостое при сценарии (1) испытывает долгопериодические (40-50 лет) колебания, связанные с изменением видового и возрастного состава, при общей тенденции к увеличению запаса углерода. При сценарии (2) – испытывает незначительные колебания вследствие выборочных рубок. В остальных двух сценариях происходит снижение запаса углерода в древостое. При сценарии (1) формируются разновозрастные древостои, образованные поздне-сукцессионными видами (ель, липа); при сценарии (4) – преимущественно молодые древостои, сформированные ранне-сукцессионными видами (сосна, береза, ольха); при остальных двух сценариях – многовидовые разновозрастные древостои. При сценариях (1) и (2) наблюдается увеличение числа элементов леса и запаса сухостоя и валежа, что свидетельствует о возрастании структурного разнообразия растительности; сценарии (3) и (4) характеризуются постоянным числом элементов леса и небольшим запасом сухостоя и валежа в силу применения сплошных рубок главного пользования.

4. Генерализация данных лесоустройства

Однако моделирование по подобным данным с высокой степенью детализации требует больших вычислительных ресурсов, а объемы полученных результатов чрезвычайно велики. Поэтому в ходе работы был разработан алгоритм генерализации данных лесоустройства, согласно которому, все имеющиеся в базе данных записи группировались сразу по трем признакам: доминанту древостоя, ТЛУ и группе возраста. Далее внутри каждой из групп проводилась генерализация характеристик: для таких параметров как класс бонитета насаждения, относительная полнота и запас древостоя рассчитывалось средневзвешенное значение (мерой веса выступала площадь выдела; средневзвешенное значение класса бонитета затем округлялось до ближайшего целого). Также внутри каждой из групп проводилась генерализация параметров древостоя – рассчитывались средневзвешенные коэффициенты участия для каждой из пород. Таким образом, из исходного набора данных (описание 21637 выделов) было получено 194 уникальных описания групп выделов, которые далее использовались как исходные данные для модельного эксперимента. Разница между результатами моделирования на основе генерализованных данных и результатами на основе исходных данных не превышает 11% для запаса углерода в древостое и 3% для запаса углерода в почве.

5. Выводы

В ходе работы была продемонстрирована возможность применения индивидуально-ориентированных моделей лесных экосистем для прогноза динамики лесной растительности на больших территориях. Разработанная система позволяет реализовать различные сценарии, имитирующие разные системы ведения лесного хозяйства с возможностью их гибкой подстройки. Методика подготовки входных данных на основе материалов лесоустройства, включающая процедуры восстановления недостающей информации, оказывается достаточной для параметризации и инициализации модели. Анализ результатов показал, что наибольшее накопление углерода в лесной экосистеме происходит при сценарии без рубок. Разработанный алгоритм генерализации исходных лесотаксационных данных позволяет сократить объем вычислений без существенного ущерба для точности прогноза.

Работа поддержана грантом РФФИ 09-04-01209.

Литература

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

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ЖИГУЛИ

Шарая Л.С.

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, Российская Федерация
L_sharaya@mail.ru

Аннотация: методами множественной регрессии проведен анализ связей между параметрами экосистемы, полученными в полевых измерениях и 18 матрицами характеристик рельефа. Определены закономерности пространственного изменения параметров лесной экосистемы на основе обнаруженных статистически тесных связей. Построены крупномасштабные карты этих характеристик (с указанием статистической значимости) путем интерполяции и экстраполяции измеренных значений параметров по рельефу при использовании выявленных связей.

Введение. Пространственные узоры лесных экосистем формируются в результате следования характеристик фитоценозов градиентам окружающей среды - гидротермическим, литологическим, почвенным и др. Важная роль рельефа как распределителя света, тепла, влаги, растворимых солей и твердого стока отмечена еще в ранних работах (Неуструев, 1930 и др.) Характеристики рельефа, такие как высота, крутизна и экспозиция склонов, являются инвариантами, изменяющимися со временем достаточно медленно. Введение Шарым с соавт. (Shary et al., 2002) расширенного набора характеристик рельефа открыло возможность лучше описывать поведение водных и литодинамических потоков, локальное и региональное преломление климатических факторов. Это, в свою очередь, пополнило систему инвариантов, меняющихся в пространстве величин с описанным смыслом, относительно легко доступных измерению или расчету. В общем случае в качестве градиентов окружающей среды – абиотических экологических факторов могут использоваться не только характеристики рельефа, но и другие растровые данные, такие как данные аэро- или космоснимков, данные о климате и др. Однако, сравнение различных абиотических факторов показало, что характеристики рельефа являются наиболее диагностически ценными. Целью работы было выявление закономерностей пространственной изменчивости лесной низкогорной экосистемы Жигули, находящейся на южной границе лесостепи.

Методы. Анализировалась связь между 72 структурными и функциональными характеристиками экосистемы, полученными на основе полевых измерений для 40 площадок (Коломыц, 2008) и матрицами 18 характеристик рельефа. Последние были сформированы на основе открытых данных проекта NASA SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) по методикам, описанным в работе (Shary et al., 2002). Анализ связей с помощью корреляции и множественной регрессии, а также построение карт-схем осуществлялись с помощью программы ГИС Эко (Shary, 2005).

Результаты.

Определены уравнения множественной регрессии для изучаемых параметров, ниже приведены некоторые примеры их, на рисунке 1а-г представлены карты этих параметров: Гранулометрический состав почв = $3,95 \cdot \text{MCA} + 1,58 \cdot \text{KA} - 1,39 \cdot \text{GA} + 1,49$ ($r_s = 0,69$, $P < 10^{-5}$), где первые три члена – нормированные характеристики рельефа, а коэффициенты определяют относительный вклад в пространственное изменение параметра, четвертый – свободный член, определяющий значение параметра, от которого отсчитываются изменения, r_s – ранговый коэффициент корреляции Спирмана, P – уровень значимости.

Тип местоположения = $3,01 \cdot \text{MCA} + 2,86 \cdot \text{GA} - 1,84 \cdot \text{F}(35,180) + 1,86$ ($r_s = 0,66$, $P < 10^{-4}$);

Количество подлеска = $34702 \cdot \text{GA} + 28296 \cdot \text{F}(35,190) + 25879 \cdot \text{khe} - 22753$ ($r_s = 0,79$; $P < 10^{-6}$);

Запасы древесины = $-88,0 \cdot \text{KA} - 78,2 \cdot \text{MCA} - 76,1 \cdot \text{GA} + 225,7$ ($r_s = 0,72$; $P < 10^{-5}$).

Характеристики рельефа: MCA – площадь сбора, GA – крутизна склонов, F(35,180) – освещенность склонов при положении Солнца на юге, KA – аккумуляционная кривизна, определяющая зоны аккумуляции и транзита.

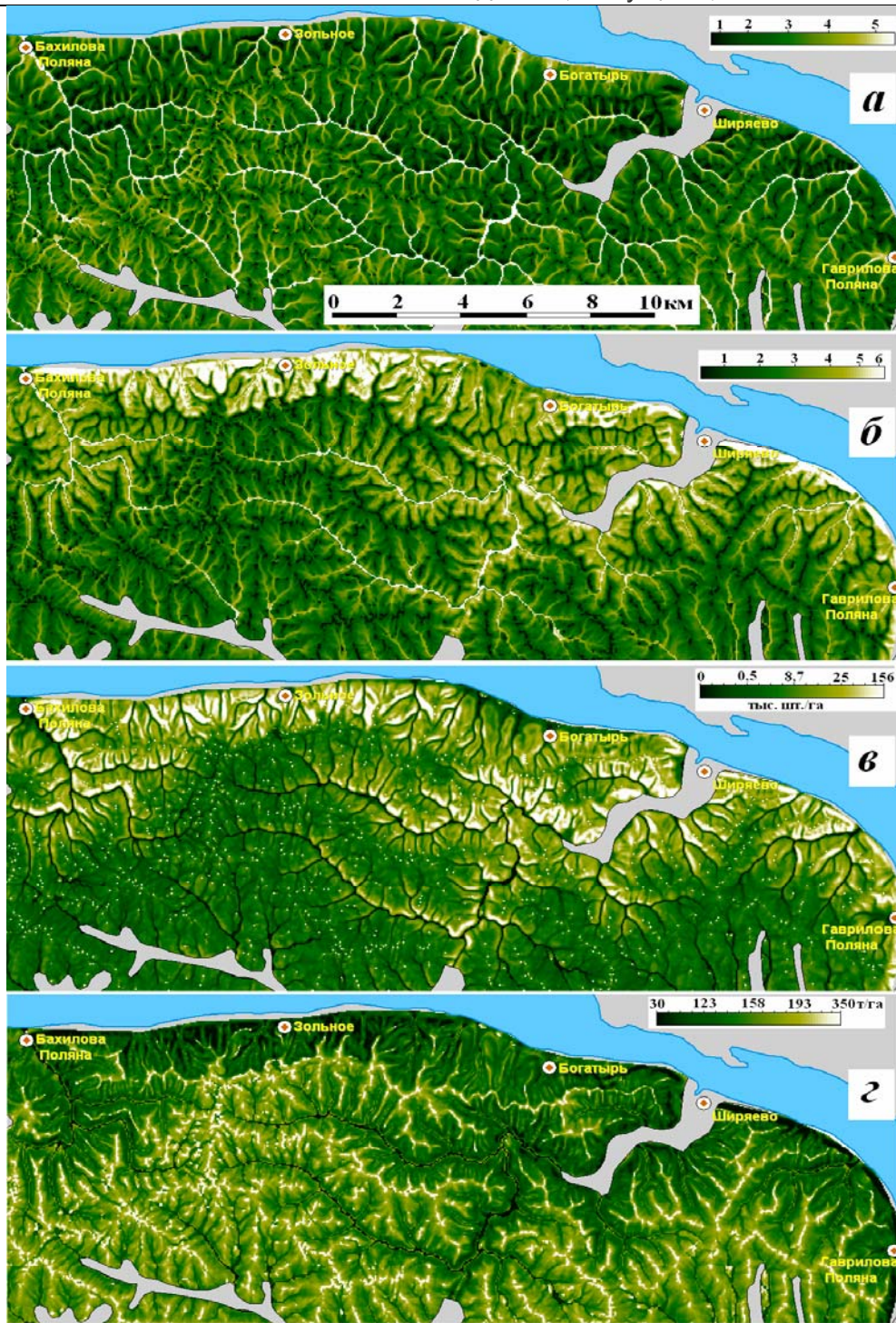


Рис. 1. **a** – гранулометрический состав почв выражен в баллах: 1 – рыхлый песок, 2 – связный (оглиненный) песок и супесь, 3 – легкий суглинок, 4 – средний, 5 – тяжелый суглинок;
б – типы местоположений: 1 – элювиальный, 2 – трансэлювиальный, ТЭ южных склонов, 3 – ТЭ северных склонов, 4 – транзитный, Т южных склонов, 5 – Т северных склонов, 6 – трансаккумулятивный и аккумулятивный;
в – количество подлеска, тыс. шт./га;
г – запасы древесины, т/га.

Ведущими предикторами пространственной дифференциации приведенных параметров выступают площадь сбора и освещенность склонов, важные для контрастных низкорослых гидротермических условий на южной границе лесостепи.

Литература.

- Неуструев С.С. Элементы географии почв. 1930 / Генезис и география почв.- М.: Наука, 1977.- С.149-314.
 Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем.- М.: Наука, 2008.- 430с.
 Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis //Geoderma.- 2002.- N.1-2.- P.1-32.
 Shary P.A Personal research website on geomorphometry and applications.- 2005.- Website: <http://www.giseco.info/>.

МОДЕЛЬ РОСТА И ФОРМИРОВАНИЯ ГОДИЧНЫХ КОЛЕЦ ХВОЙНЫХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Шашкин А.В., Ивановский А., Ваганов Е.А.

Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН (г. Красноярск, Россия)
shashkin@forest.akadem.ru

Аннотация: рассматривается модель роста и формирования годичных колец у хвойных деревьев и процедура оптимизации ее параметров. Приведены примеры использования модели для описания роста деревьев в различных местообитаниях, отличающихся климатическими условиями.

В денроклиматологии для реконструкции палеоклимата и анализа влияния климата на рост традиционно используются линейные статистические модели, основанные на корреляционных связях между климатическими факторами и характеристиками годичных колец. Структура этих статистических моделей зависит от локальных особенностей климата, от экологических условий, вида, возраста и состояния растения. Следовательно, даже при условии, что радиальный рост главным образом связан с погодными факторами, корректно реконструировать климат по линейным статистическим моделям можно только при условии, когда изменения климата не приводят к изменению характера статистической модели. Использование моделей формирования годичных колец, основанные на биофизических принципах регуляции роста годичного кольца в зависимости от климатических факторов, позволяет более адекватно интерпретировать наблюдаемые статистические зависимости. В этой работе мы исследуем потенциальную возможность имитационной модели роста годичных колец Ваганова-Шашкина (Шашкин и Ваганов 1993, Ваганов и Шашкин 2000) для описания влияния климатических факторов на рост деревьев в различных условиях. Разработана специальная программа параметризации модели, подбирающая оптимальные значения основных экологических параметров модели путем итерационной процедуры оптимизации. Оптимизация параметров применена для моделирования древесно-кольцевых хронологий по имеющейся сети денроклиматических станций (285 длительных хронологий: рис. 1.). Для 205-ти хронологий получено хорошее совпадение расчетных результатов (IndC) с эмпирическими индексами прироста (IndR) (с коэффициентом корреляции более 0.4 при $P < 0,05$). Причем, эти 205 точек достаточно равномерно распределены по всей территории и не связаны со специфическими климатическими зонами или районами.

В качестве наиболее яркого примера, иллюстрирующего результат процедуры параметризации, а также использование имитационной модели для анализа роста в зависимости от климатических условий приведем расчеты для метеостанции Чокурдах (Якутия) (Рис.2). Условия роста здесь таковы, что и температурный режим, и влагообеспечение, сменяя друг друга в течение сезона роста, лимитируют радиальный рост древесных растений. Динамика радиального прироста по всем денрохронологическим станциям данного района имеет сходную картину. Разброс в индексах связан с индивидуальными экологическими и микроклиматическими характеристиками, которые можно моделировать разбросом соответствующих параметров модели. После оптимизационной процедуры выбора параметров модели для большинства хронологий коэффициент корреляции между эмпирическими и расчетными данными превышает 0.6.

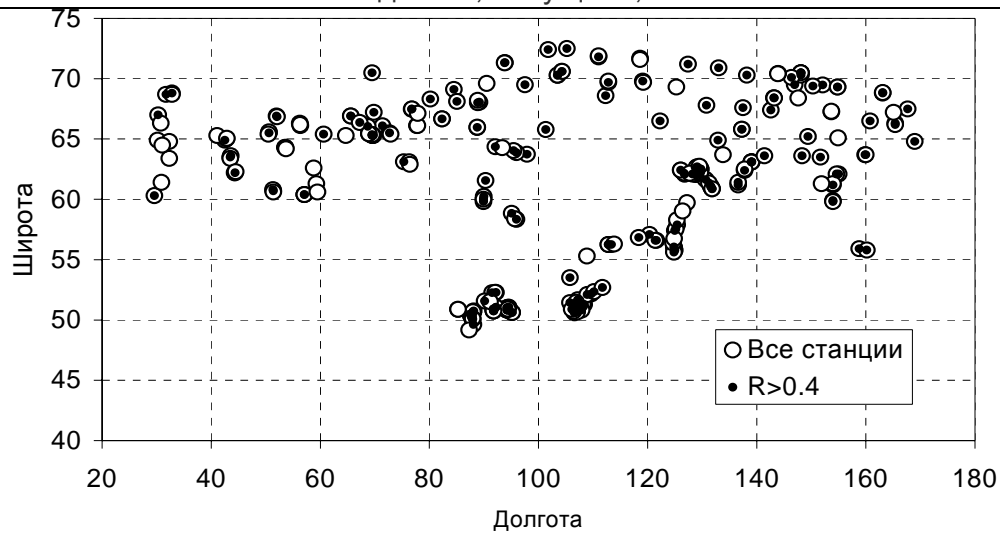


Рис. 1. Распределение исходных денроклиматических станций и станций, для которых расчетные индексы прироста за период 1935-1998 имеют коэффициент корреляции с хронологиями более 0.4. ($R > 0.4$)

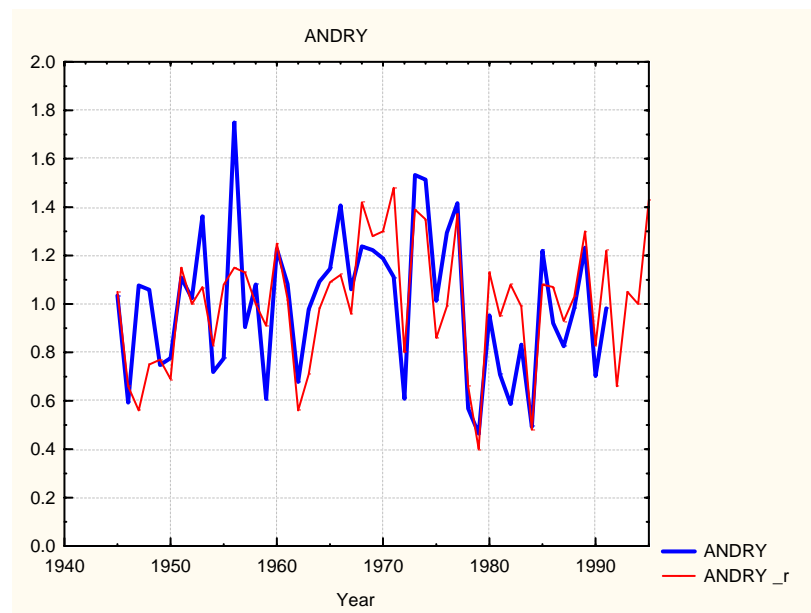


Рис. 2 Измеренные индексы прироста (ANDRY) и модельные (ANDRY_r) по метеостанции Чокурдах

Таким образом, предложенная имитационная модель может быть полезна в анализе реакции деревьев на климатические изменения, для оценки степени влияния тех или иных климатических факторов на радиальный рост и как тест на «качество» хронологий. Последнее, хорошо иллюстрируется на рис.1., где легко видеть, что существуют такие локальные хронологии, которые не удается описать моделью, хотя соседние хорошо описываются.

Литература

- Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных.- Н.: Наука, 2000.- 232 с.
- Anchukaitis KJ, Evans MN, Kaplan A, Vaganov EA, Hughes MK, Grissino-Mayer HD, Cane MA. Forward modeling of regional scale tree-ring patterns in the southeastern United States and the recent influence of summer drought. *Geophys. Res. Lett*, 2006, 33, L04705, doi:10.1029/2005GL025050.
- Evans MN, Reichert BK, Kaplan A, Anchukaitis KJ, Vaganov EA, Hughes MK, Cane MA. A forward modeling approach to paleoclimatic interpretation of tree-ring data. *J Geophys Res – Biogeosciences*, 2006, 111 (63), G03008, doi: 10.1029/2006JG000166.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА БИОРАЗНООБРАЗИЯ РЕЧНЫХ СООБЩЕСТВ МАКРОЗООБЕНТОСА

Шитиков В.К.¹, Абросимова Э.В.²

¹*Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, Россия*
stok1946@gmail.com

²*Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти, Россия*
a-elina-v@yandex.ru

Аннотация: рассмотрены модели зависимости показателей биоразнообразия от выборочного усилия с использованием различных алгоритмов "захвата-освобождения" и других методов аппроксимации мониторинговых данных. Получены и обсуждаются результаты сравнительной оценки общего богатства видов сообществ макрозообентоса на примере малых рек бассейна Нижней Волги с использованием различных моделей экстраполяции. Проанализированы зависимости показателей «накопленного видового богатства» и основных индексов разнообразия от выборочного усилия.

Общее видовое богатство S локального сообщества является множеством (Roberts, 1986), к которому потенциально может принадлежать любой вид из полного регионального фонда. При этом каждый вид имеет разную вероятность вхождения в локальное сообщество, которая определяется главным образом степенью соответствия между оптимумом экологических условий, характерным для данного вида, и специфическими экологическими параметрами для биотопа в целом (Butaye et al., 2002), а также, межвидовой конкуренцией, обеспеченностью ресурсами, интенсивностью миграционных процессов и множеством иных. (MacArthur, Wilson, 1963; Zobel et al., 1998). Единственный эмпирический способ оценки локального видового богатства заключается в обработке серий повторяемых мониторинговых проб, в результате чего формируется наблюдаемый список видов S_{obs} , причем во всех случаях $S > S_{obs}$. И здесь очевидна проблема оценки выборочной достаточности полевых исследований, то есть насколько выявленная совокупность видов отражает истинную видовую структуру сообщества. Поэтому важным компонентом многих моделей биоразнообразия является реализация асимптотических подходов к анализу кривых накопления числа видов в зависимости от выборочного усилия.

Основой современной методологии оценки видового разнообразия является использование семейства статистических процедур, основанных на схеме "захвата-освобождения" выборочных элементов, к которым относятся bootstrep и алгоритмы jackknife (Burnham, Overton, 1978; Heltshe, Forrester, 1983; Эфрон, 1988; Шитиков и др., 2008). Также применяются непараметрические формулы оценки числа видов, использующие информацию о распределении в изучаемом сообществе редких и уникальных видов: (Colwell et al., 2004; Chao, 2005) чем больше их число в наборе данных, тем больше вероятность обнаружения новых видов, еще не представленных в сделанных наблюдениях.

Выделяют две концепции в моделировании кумулятивных кривых, которые отражают отличия задач интерполяции и экстраполяции видового богатства. При интерполяции строится кривая разрежения (Sanders, 1968; Hurlbert 1971; Simberloff, 1978), которая формируется путем многократной генерации псевдовыборок из N_{obs} особей, обнаруженных в результате мониторинга, и является функцией математического ожидания видовой насыщенности $S(N)$ при увеличении численности сообщества. Разрежение дает возможность найти предполагаемую видовую насыщенность в некоторой относительно небольшой "стандартной" совокупности из $N_{ст}$ особей, считая ее случайной и независимой выборкой из всего генерального сообщества. Кроме оценки доверительных интервалов, основная роль кривых разрежения заключается в сравнении видового разнообразия при одном и том же выборочном усилии. Например, в нижнем течении р. Чапаевка было зарегистрировано 88 таксонов макрозообентоса в 104 пробах, в то же время, на р. Кондурче только 76 видов, но в 9 пробах. Однако, если учесть, что расчетное значение S_{obs} в р. Чапаевка при $m = 9$ выборок составляет лишь 26 видов, то р. Кондурча займет законное место в рейтинге рек с высоким

богатым видовым богатством. Очевидно, что корректное сравнение индексов биоразнообразия для различных сообществ также возможно лишь при одинаковом выборочном усилии. Например, индекс Шеннона H для нижнего течения р.Сок при количестве проб до 25 превышает аналогичный показатель для верхнего течения, однако при дальнейшем росте выборочного усилия их биоразнообразие выравнивается.

Когда выборочное усиление становится достаточно велико и объем мониторинговых данных позволяет говорить о разумно устойчивом приближении к реальным параметрам разнообразия экосистемы, логической возможностью и предметом статистического анализа становится экстраполяция. При экстраполяции *кривой накопления* подсчитывается максимально возможное (т.е. потенциальное) видовое богатство, лимитируемое, например, емкостью природной среды и превышающее наблюдаемое множество видов S_{obs} .

С использованием общедоступных компьютерных программ EstimateS и SPADE различными методами было рассчитано превышение полного видового богатства над наблюдаемым, оценены доверительные интервалы моделей интерполяции и экстраполяции.

Проведено сопоставление наблюдаемого и прогнозируемого количества видов сообществ макрозообентоса для некоторых малых рек Самарской области.

Полученные результаты моделирования кривых накопления видов в целом не противоречат тем выводам о сравнительном биоразнообразии рек региона, которые были опубликованы нами ранее. Алгоритмы экстраполяции видового богатства, основанные на встречаемости видов, показали вполне удовлетворительные результаты применительно к сообществам макрозообентоса и могут эффективно использоваться для оценки выборочной достаточности проводимых исследований.

Таким образом, использование непараметрических процедур оценки общего числа видов и показателей биоразнообразия является одним из немногих методов статистически корректного сравнения видовой структуры сообществ, которое позволяет перейти к научно-обоснованной системе доказательств с использованием статистического аппарата проверки гипотез.

Литература

- Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Крамаренко С.С., Якимов В.Н. Современные подходы к статистическому анализу экспериментальных данных // Проблемы экологического эксперимента: (планирование и анализ наблюдений).- Тольятти, СамНЦ РАН: Кассандра, 2008.- С. 212-250.
- Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа.- М.: Финансы и статистика, 1988.- 263 с.
- Burnham K.P., Overton W.S. Estimation of the size of a closed population when capture probabilities vary among animals // *Biometrika*.- 1978.- V. 65.- P. 623-633.
- Butaye J., Jacquemyn H., Honnay O., Hermy M. The species pool concept applied to forests in a fragmented landscape: dispersal limitation versus habitat limitation // *Journal of Vegetation Science*.- 2002.- №13.- P. 27-34.
- Chao A. Species richness estimation // *Encyclopedia of Statistical Sciences*. New-York:Wiley.- 2005.- P. 7909-7916.
- Colwell, R. K., Mao C. X., Chang J. Interpolating, extrapolating, and comparing incidence-based species accumulation curves // *Ecology*.- 2004.- V. 85.- P. 2717-2727.
- Heltsh J., Forrester N.E. Estimating species richness using the jackknife procedure // *Biometrics*.- 1983.- V. 39.- P. 1-11.
- Hurlbert S.H. The non-concept of species diversity: a critique and alternative parameters // *Ecology*.- 1971.- V. 52.- P. 577-586.
- McArthur R.H., Wilson E.O. An equilibrium theory of insular zoogeography // *Evolution*.- 1963.- V. 17. № 4.- P. 373-387.
- Sanders H. Marine benthic diversity: a comparative study // *Am. Naturalist*.- 1968.- V. 102.- P. 243-282.
- Simberloff D. Use of rarefaction and related methods in ecology // *Biological Data in Water Pollution Assessment: Quantitative and Statistical Analyses*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.- 1978.- P. 150-165.
- Zobel M., van der Maarel E., Dupre C. Species pool the concept, its determination and significance for community restoration // *Applied Vegetation Science*.- 1998.- № 1.- P. 55-66.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЙ В ВОДОЕМАХ

Шлычков В.А.

*Институт водных и экологических проблем СО РАН (Новосибирский филиал),
Новосибирск, РФ*
slav@ad-sbras.nsc.ru

Аннотация: представлены основные подходы, применяемые в численном моделировании водотоков сложной пространственной конфигурации. Даны примеры расчетов течений по плановой и продольно-вертикальной моделям.

1. Введение

Гидродинамические модели предназначены для расчета поля течений, расходов, уровней, распределения температуры, характеристик турбулентности, ветрового волнения, геометрии свободной поверхности, концентрации примеси в природных водоемах произвольной конфигурации или их части.

Математическое описание гидродинамических процессов в водоемах со сложной геометрией относится к нетривиальным задачам механики сплошных сред (Васильев, 1999). Методы описания водных объектов основаны на решении системы уравнений механики жидкости, замыкаемых с помощью тех или иных допущений и эмпирических зависимостей. Сложность численных моделей обусловлена рядом причин, среди которых можно отметить:

- нелинейность основных уравнений гидродинамики;
- наличие свободных границ в виде береговых линий с заранее неизвестной

пространственной геометрией;

- турбулентным характером движения водных потоков;
- необходимость привлечения большого объема экспериментальных данных о рельефе русла и пойм, физико-механических характеристиках дна.

Численное решение уравнений движения в наиболее общем виде представляет серьезные математические и алгоритмические трудности и на практике обычно применяют ряд упрощений, позволяющих свести задачу к более простой. Так получены двумерные (плановые) уравнения для описания неустановившихся течений в руслах и модели с поперечным осреднением для детализации вертикальной структуры стратифицированных водоемов.

2. Численная модель для описания плановых течений

При формулировании плановой модели используются уравнения Сен-Венана в двумерном приближении, полученным осреднением уравнений турбулентной жидкости в предположении гидростатики. Расчетные гидродинамические параметры потока при этом могут служить кинематической основой в экосистемных моделях, моделях переноса и диффузии многокомпонентной примеси, при исследовании ледовых явлений и др.

Важным этапом разработки математической модели является алгоритм разбиения расчетной области на совокупность элементарных объемов (боксов), на которых строятся дискретные соотношения. Сетки с криволинейными боксами эффективно адаптируются под плановую геометрию расчетной области и особенностей морфометрии. Иллюстрацией служит рисунок, который показывает результат конструирования сетки для моделирования проектируемого Эвенкийского водохранилища длиной 1200 км (Красноярский край). Построенная криволинейная сетка содержит около 15 тыс. узлов и обеспечивает среднее разрешение вдоль основного водотока ~2200 м, а в поперечном направлении около 1000 м. Более детально сеточную структуру можно видеть на увеличенной врезке того же рисунка. С помощью модели плановых течений восстанавливается пространственная структура уровня и скоростного режимов течения в каждой точке расчетной области. На основе

сопоставления с фактическим материалом показана близость теоретических полей и характеристик реальных течений.

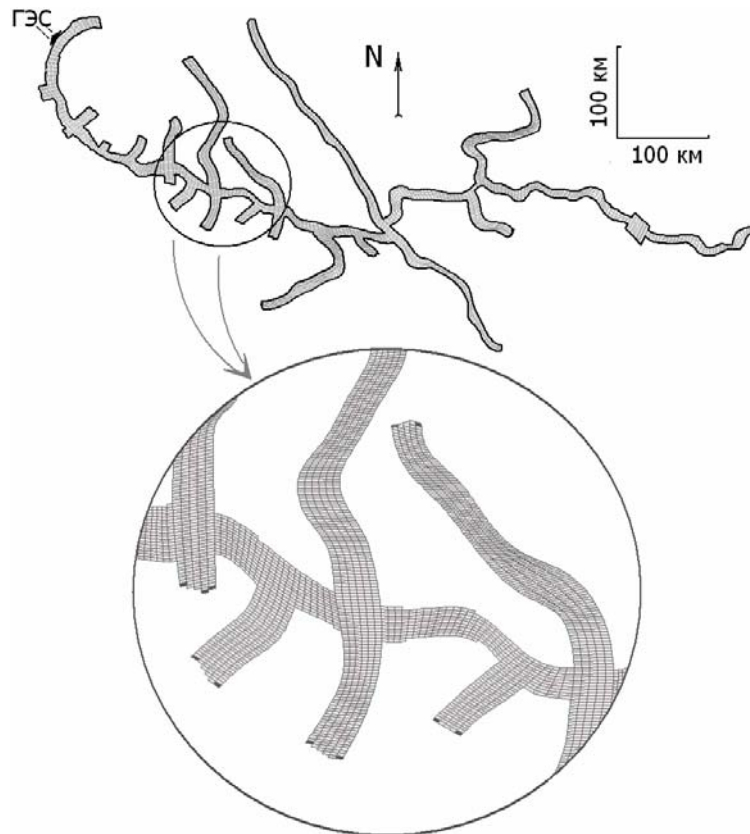


Рисунок. Пространственная схематизация русловой сети Эвенкийского водохранилища и сеточная структура расчетной области

2. Продольно-вертикальная модель

При описании гидрофизических характеристик глубокого водоема, где доминируют эффекты стратификации и вертикального перемешивания, в ряде случаев успешно применяется двумерная x, z -редукция (ось x направлена вдоль водотока, ось z - вертикально вверх). В этом случае уравнения гидротермодинамики применяются для изучения локальных явлений и процессов, в которых существенную роль играют вертикальные ускорения, сопоставимые по порядку величины с основными горизонтальными ускорениями. Модель обеспечивает возможность воспроизведения течений с температурно-плотностной неоднородностью – например, в эстуариях, конвективных процессах при поверхностном теплообмене, циркуляции вод, вызванные напряжениями ветра, сейшевых колебаний и других явлений в глубоких водоемах. Вихреразрешающий вариант модели позволяет описывать т.н. когерентные структуры в поле турбулентности и тонкие физические эффекты, связанные с противогradientными потоками субстанции. В качестве примеров рассматриваются Новосибирское водохранилище, Телецкое озеро.

Литература

Васильев О.Ф. Математическое моделирование гидравлических и гидрологических процессов в водоемах и водотоках (обзор работ, выполненных в Сибирском отделении РАН) // Водные ресурсы.- 1999.- Т.26.- № 5.- С. 600-611.

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ В МОДЕЛИ КЛИМАТА С ИНТЕРАКТИВНЫМ УГЛЕРОДНЫМ ЦИКЛОМ

Юрова А. Ю.^{1,2}, Володин Е.М.²

¹ГУ «Гидрометцентр России», Москва, Россия
alla.yurova@gmail.com

²Институт вычислительной математики РАН, Москва, Россия
volodin@inm.ras.ru

Аннотация: для предсказания суммарного эффекта углеродного обмена почв на поведение климатической системы в 1860-2100 годах в данной работе использовались независимо три различные модели динамики органического вещества почв, состыкованные с моделью ОЦАО с углеродным циклом. Было показано, что выбор модели динамики углерода почвы является значимым для прогноза будущего климата.

Климатические переменные влияют на функционирование и компоненты углеродного цикла, в том числе на динамику органического вещества почв, которая в свою очередь обладает эффектом обратной связи на климат. В данной работе мы исследовали взаимодействие между динамикой углерода почвы и поведением климатической системы. Использовалась совместная модель общей циркуляции атмосферы и океана с интерактивным углеродным циклом, разработанная в ИВМ РАН.

В качестве блока динамики углерода почв было испытано три различные модели. Почвенный блок модели LPJ представляет собой простую боксовую модель, созданную в рамках «биохимической» концепции трансформации органического вещества, (Sitch с соавт., 2003), модель ROMUL (Chertov с соавт., 2001) - более сложная боксовая модель в рамках дискретной сукцессионной концепции. Концепция континуума потери качества представлена моделью Q (Ågren, G. I. и E. Bosatta, 1996), в которой решается совместное уравнение для потери массы и смещения в «качестве» органического вещества.

При прогнозе параметров углеродного цикла в будущем (до 2100 года) модель ИВМ предсказывает рост чистой продуктивности растений при росте концентрации CO₂ в атмосфере. Для суммарного количества углерода в почве этот эффект роста продуктивности оказывается более значимым, чем отрицательный эффект повышения температуры почвы. В результате согласно всем трем использованным моделям почва в 2100 году содержит больше углерода, чем в доиндустриальный период. Однако оценки почвенного дыхания выше, а дополнительное накопление углерода в почве меньше при использовании модели LPJ. Различия в глобально осредненной температуре воздуха, рассчитанной климатической моделью, составляют до 0.4⁰C, максимальное потепление предсказывается моделью с почвенным блоком LPJ, меньшее-с более совершенными моделями ROMUL и Q.

Возможной причиной отклонения результатов, полученных с моделью LPJ, от результатов двух других моделей является выбор значений параметров модели, в частности процента разложившегося опада, переходящего в «медленный» резервуар. Полученные различия в расчетах с помощью моделей ROMUL и Q меньше, чем можно было бы ожидать, исходя из фундаментальной разницы в формулировке этих двух моделей.

Литература

- Ågren, G. I., and E. Bosatta *Theoretical Ecosystem Ecology. Understanding Element Cycles*, Cambridge: Cambridge University Press, 1996.-234 с
- Chertov, O. G., A. S. Komarov, M. Nadporozhskaya, S. S. Bykhovets, and S. L. Zudin ROMUL - a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling.//Ecological Modelling.-2001.- № 138.-С. 289-308
- Sitch, S., B. Smith, I. C. Prentice, et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Global Vegetation Model //Global Change Biology.-2003.- № 9.-С. 161-185.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

АВТОР	СТРАНИЦА	AUTHOR	PAGE
Абакумов А.И.	13	Albrecht K. – F.	15
Абакумов Е.В.	184	A.H.C. van Bruggen	62
Аббасова Р.Я.	264	Cienciala, E.	274
Абросимова Э.В.	310	Mißbach S.	15
Аверкиева И.Ю.	214		
Аврова А.Ф.	256		
Александрова С.В.	300		
Алещенко Г.М.	45		
Архангельская Т.А.	16, 166		
Астраханцев Г.П.	246		
Бабич Л.А.	18		
Баранов И.П.	20		
Баранчиков Ю.Н.	298		
Бархатов Ю.В.	22, 24		
Барцев С.И.	25, 27, 29, 93		
Безрукова М.Г.	31, 174, 295		
Беличенко М.В.	236		
Белолипецкий В.М.	34		
Белолипецкий П.В.	33, 34		
Белотелов Н.В.	36		
Бессонов В.В.	38		
Бессонов С.А.	203, 205		
Бобровский М.В.	40, 293		
Бобырев А.Е.	147, 193		
Болондинский В.К.	43		
Бородин О.О.	68		
Букварева Е.Н.	45		
Бурменский В.А.	147, 193		
Быховец С.С.	31, 40, 47, 141, 293		
Вавилин В.А.	49		
Ваганов Е.А.	308		
Варлагин А.В.	51, 302		

Варчева С.Е.	53
Виликайнен Л.М.	43
Винокуров И.Ю.	55
Волкова П.Е.	57, 195
Володин Е.М.	59, 314
Володченкова Л.А.	60
Воробьев Н.И.	62
Воротынцев А.В.	64, 66
Вульфсон А.Н.	68
Вшивкова О.А.	70
Галицкий В.В.	72, 74
Генова С.Н.	34
Гишкелюк И.А.	76
Глаголев М.В.	78
Голубятников Л.Л.	80
Гоник М.М.	168, 170, 244
Грабарник П.Я.	31, 82, 207
Грабовский В.И.	84
Грешилова Н.В.	87
Гусев Е.М.	89
Гуц А.К.	60
Давлетшина М.Р.	91
Дегерменджи А.Г.	22, 93, 95, 216
Дегерменджи Н.Н.	95
Дергунова Н.Н.	203, 205
Дещеревская О.А.	97
Дину М.И.	99
Долгоносков Б.М.	101
Дружинина О.В.	103
Ермакова М.В.	105
Ефремова Т.Т.	256
Жданова О.Л.	107
Завалишин Н.Н.	109
Заволокин А.В.	111
Зилов Е.А.	113, 180
Зубкова Е.В.	115

Иванова Н.С.	117
Иванова Ю.Д.	29, 157
Ивановский А.	308
Игнатенко С.Ю.	123
Исаев А.С.	119
Калякин В.Н.	172
Картушинский А.В.	121
Кастрикин В.А.	123
Квиткина А.К.	125
Ковалев А.В.	119, 127, 195
Коваленко В.И.	129
Колобов А.Н.	131
Коломыц Э.Г.	133
Колтунов Е.В.	136
Комаров А.С.	40, 139, 141, 293, 295, 304
Корж В.Д.	143
Королёва П.В.	234
Костерина Е.А.	18
Кошелева Н.Е.	145
Криксунов Е.А.	147, 193
Кудрявцев Н.В.	172
Кулаков М.П.	149
Кундас С.П.	76, 129
Курбатова Ю.А.	51, 302
Кухарук Е.В.	151
Ланкин Ю.П.	153
Лантратова А.С.	155
Ларионова А.А.	31, 47
Ларько А.А.	157, 159
Ли Ч.	302
Логофет Д.О.	161
Лукина Н.В.	164, 295
Лукьященко К.И.	166
Максютов Ш.Ш.	78
Марченко А.И.	170
Масина О.Н.	103

Мастеров В.Б.	238
Медвинский А.Б.	168, 170, 193, 244
Меншуткин В.В.	246
Мечникова С.А.	172
Мильхеев Е.Ю.	47
Минина Т.Р.	246
Михайлов А.В.	40, 141, 174, 178, 293, 304
Михайлова Н.В.	174, 176, 178
Мокрый А.В.	113, 180
Молчанов А.Г.	182, 272
Монтиле А.А.	188
Нагорная Е.Г.	203, 205
Надпорожская М.А.	31, 184
Назарова К.А.	203, 205
Насонова О.Н.	89
Неверова Г.П.	186
Недоступов Э.В.	252
Неуймин С.И.	188
Никифорова А.А.	190
Нуриева Н.И.	168, 193, 244
Овчинникова Н.Ф.	157
Овчинникова Т.М.	119, 195
Ольчев А.В.	97, 197
Орлова М.А.	164, 295
Павлова В.Н.	199, 236
Парилов М.П.	123
Парфенова Е.И.	298
Перевертин К.А.	201
Петрова Н.А.	246
Петросян В.Г.	203, 205
Пилюк А.Г.	207
Подгорный К.А.	209, 211
Полосков В.Н.	246
Почекутов А.А.	27
Припутина И.В.	214
Прокопкин И.Г.	216

Пузаченко Ю.Г.	218, 220
Пых Ю.А.	222
Радлер К.	197
Разжевайкин В.Н.	224
Ревуцкая О.Л.	226
Рожков В.А.	228
Розенберг Г.С.	230, 232
Романенков В.А.	234, 236
Романов М.С.	172, 238
Романовская А.А.	240
Ростопшин Ю.А.	242
Рубашко Г.Е.	38
Русаков А.В.	168, 170, 193, 244
Руховец Л.А.	246
Рухович Д.И.	234
Сандлерский Р.Б.	248
Саранча Д.А.	250, 252
Свирижева-Хопкинс А.Ю.	254
Свиридова О.В.	62
Секретенко О.П.	256
Семенов А.М.	62
Сизов И.Е.	258
Сиротенко О.Д.	236
Слепнева Ю.В.	240
Смирнов В.Э.	260
Соколов М.С.	170
Степанов И.Н.	55, 262
Степанова В.И.	20
Сулейманов Н.Р.	264
Сулейманов Э.Н.	266
Суховольский В.Г.	57, 119, 127, 195, 268
Сысоев Н.Е.	272
Тарасова О.В.	119
Тарко А.М.	270
Татаринов Ф.А.	272, 274
Титлянова А.А.	276

Трофимова Г.Ю.	278
Трубников Б.А.	280, 282
Трубникова О.Б.	280, 282
Турков С.Л.	284
Тучковенко Ю.С.	286
Ухманский Я.	288
Фардеева М.Б.	300
Фрисман Е.Я.	107, 186, 226
Фурсова П.В.	289
Хавинсон М.Ю.	291
Ханина Л.Г.	40, 293
Хлебопрос Р.Г.	70
Хораськина Ю.С.	295
Хромечек Е.Б.	24
Чебакова Н.М.	298
Ченчала Э. (Cienciala, E.)	274
Чернецкий М.Ю.	159
Чертов О.Г.	139, 141, 184
Чижикова Н.А.	300
Шавнин С.А.	188
Шалухина Н.В.	302
Шанин В.Н.	40, 125, 141, 174, 293, 304
Шарая Л.С.	133, 306
Шаталов А.А.	62
Шашкин А.В.	308
Шевцова Л.К.	234
Шевырногов А.П.	159
Шитиков В.К.	310
Шлычков В.А.	312
Шпитонков М.И.	224
Шредерс М.А.	155
Щемель А.Л.	29
Юрова А.Ю.	314

Научное издание

Материалы
Национальной конференции
с международным участием

**Математическое
моделирование
в ЭКОЛОГИИ**

Оригинал-макет: Е.В. Зубкова
Оформление переплета: В.Н. Шанин
Тираж 100. Тип.заказ №1.

