

Том 11, № 1(7)

2009

**ИЗВЕСТИЯ
САМАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**Главный редактор
В.П. Шорин**

www.ssc.smr.ru

Самарский научный центр Российской академии наук

Самарский научный центр Российской академии наук

**Известия
Самарского научного центра
Российской академии наук**

Том 11, № 1(7), 2009

Основан в 1999 г.
Выходит 4 раза в год
ISSN: 1990-5378

Учредитель: Президиум Самарского научного центра РАН

Главный редактор
В.П. Шорин

Заместители главного редактора
Г.П. Аншаков, Ю.Н. Лазарев, В.А. Сойфер

Ответственный секретарь
В.О. Соколов

Редакционная коллегия:
Ю.П. Аншаков, В.А. Барвинок, В.А. Виттих,
В.Е. Воскресенский, Ф.В. Гречников, А.Л. Петров,
Г.С. Розенберг, В.А. Сергеев, Е.В. Шахматов

Зав. редакцией Н.Ю. Кузнецова

Адрес редакции: 443001, Самара, Студенческий пер., За,
Самарский научный центр Российской академии наук,
Тел. 340-06-20
электронная версия - <http://www.ssc.smr.ru/izvestiya.shtml/>

Самара
Издательство Самарского научного центра РАН

СОДЕРЖАНИЕ

Том 11, номер 1(7), 2009

ПРЕДИСЛОВИЕ	1397
МНОГОМОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ <i>А.И. Абакумов, Е.Е. Гиричева</i>	1399
ОДИНАКОВЫЙ ПО МЕСТООБИТАНИЯМ ПРИНЦИП РОСТА НА ПРИМЕРЕ РОСТА В ВЫСОТУ У ЕЛИ И ДРУГИХ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ <i>К.-F. Albrecht, S. Missbach</i>	1403
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ <i>Т.А. Архангельская, К.И. Лукьященко</i>	1408
ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МИНИМАЛЬНОЙ БИОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ НА ПРОГНОЗ БИОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ <i>С.И. Барцев, А.Г. Дегерменджи, Ю.Д. Иванова, А.Л. Щемель</i>	1413
ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ МУРАВЬЕВ И РАСТЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РЕШЕТЧАТОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ <i>В.В. Бессонов, Г.Е. Рубашко</i>	1419
АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ РАЗЛОЖЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА: БАЙЕСОВСКИЙ ПОДХОД <i>М.Г. Безрукова, С.С. Быховец, П.Я. Грабарник, А.А. Ларионова, М.А. Надпорожская</i>	1424
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ УГЛЕРОДА ПОЧВЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ТРАДИЦИОННОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ И ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ <i>М.В. Бобровский, А.С. Комаров, В.Н. Шанин, С.С. Быховец, А.В. Михайлов, Л.Г. Ханина</i>	1430
АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВЕННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА ТЕОРИИ КАТАСТРОФ <i>М.Р. Давлетишина</i>	1435
КИНЕТИКА РОСТА БАКТЕРИОПЛАНКТОНА НА ПОЧВЕННЫХ ЭКСТРАКТАХ КРАСНОЯРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ <i>Н.Н. Дегерменджи, А.Г. Дегерменджи</i>	1440
ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ КОНТРОЛЯ ГЛОБАЛЬНОГО ДЕМОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА <i>Б. М. Долгоносков</i>	1445
ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА НАКОПЛЕНИЯ ЗАПАСОВ ПОДСТИЛКИ В БОЛОТНЫХ БЕРЕЗНЯКАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ <i>Т. Т. Ефремова, А. Ф. Аврова, О. П. Секретенко</i>	1451

СИНХРОННАЯ КВАЗИТРЕХМЕРНАЯ (Q3D) СЕКЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ БИОМАССЫ СООБЩЕСТВА ДЕРЕВЬЕВ	
<i>Галицкий В.В.</i>	1457
«СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ» (AV4) ЭМИССИИ CH₄ ИЗ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ	
<i>М.В. Глаголев, А.Ф. Сабреков, Ш.Ш. Максюттов</i>	1463
МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ КАЛЬЦИЯ В СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ	
<i>Ю.С. Хораськина, А.С. Комаров, М.Г. Безрукова, Н.В. Лукина, М.А. Орлова</i>	1468
ИНДИВИДУАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ДРЕВЕСНЫХ СООБЩЕСТВ	
<i>А.Н. Колобов</i>	1475
ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗНЫЕ МОДЕЛИ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ПРИ ГЛОБАЛЬНОМ ПОТЕПЛЕНИИ	
<i>Э.Г. Коломыц, Л.С. Шарая</i>	1481
ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ В ГИДРОСФЕРЕ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТАНДАРТ	
<i>В.Д. Корж</i>	1488
ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИКЛОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АГРОЛАНДШАФТАХ	
<i>Н.Е. Кошелева</i>	1494
РОЛЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ФОРМИРОВАНИИ ПОТОКОВ CO₂ НА ВЕРХОВОМ БОЛОТЕ	
<i>Ю.А. Курбатова, Н.В. Шалухина, А.В. Варлагин, Ч. Ли</i>	1501
ЧИСТАЯ ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ И НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ (КАК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОСНОВА ДЛЯ ГЛОБАЛЬНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)	
<i>А.А. Ларько, А.П. Шевырногов Анатолий Петрович, М.Ю. Чернецкий, Н.Ф. Овчинникова, Ю.Д. Иванова</i>	1506
DLES - ПЛАТФОРМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ	
<i>А.В. Михайлов, М.Г. Безрукова, В.Н. Шанин, Н.В. Михайлова</i>	1511
ОЦЕНКА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ	
<i>А.Г. Молчанов</i>	1516
ОПТИМИЗАЦИЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ КАРЬЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ ROMUL	
<i>М.А. Надпорожская, Е.В. Абакумов, О.Г. Чертов</i>	1522
ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СИСТЕМ ИЗМЕНЧИВОСТИ (НА ПРИМЕРЕ <i>AGROPYRON CRISTATUM</i> (L.) BEAUV.)	
<i>С.И. Неуймин, С.А. Шавнин, А.И. Монтиле, А.А. Монтиле</i>	1527

СЛОЖНЫЕ РЕЖИМЫ ДИНАМИКИ МОДЕЛИ ДВУХВОЗРАСТНОЙ ПОПУЛЯЦИИ С ПЛОТНОСТНО-ЗАВИСИМОЙ РЕГУЛЯЦИЕЙ ВЫЖИВАЕМОСТИ МОЛОДИ	1533
<i>Г.П. Неверова, Е.Я. Фрисман</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫРУБКИ НА РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ	1538
<i>А.В. Ольчев, Карл Радлер</i>	
ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ АГРОСФЕРЫ РОССИИ: МЕТОДОЛОГИЯ, МОДЕЛИ, РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ	1543
<i>В.Н. Павлова</i>	
ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ И ПОЛОВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОПУЛЯЦИЙ ЛОСЯ (<i>ALCES ALCES L.</i>) В РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И ДАННЫХ МНОГОЛЕТНОГО МОНИТОРИНГА	1549
<i>В.Г. Петросян, Н.Н. Дергунова, С.А. Бессонов, К.А. Назарова, А. В. Омельченко</i>	
ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭКОСИСТЕМЫ НЕВСКОЙ ГУБЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА	1554
<i>К.А. Подгорный</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МАСС-БАЛАНСА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ЭКОСИСТЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ АТМОСФЕРНЫХ ПОЛЛУТАНТОВ	1559
<i>И.В. Припутина, А.В. Танканаг, И.Ю. Аверкиева</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ПОПУЛЯЦИИ С ВОЗРАСТНОЙ И ПОЛОВОЙ СТРУКТУРОЙ	1564
<i>О.Л. Ревуцкая, Е.Я. Фрисман</i>	
РАСЧЁТ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР И ЭФФЕКТИВНОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ С УЧЁТОМ ОДНОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЫ	1569
<i>В.А. Романенков, О.Д. Сиротенко, М.В. Беличенко, В.Н. Павлова</i>	
ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВЕДЕНИЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА БАЛАНС БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД	1575
<i>В.Н. Шанин, А.В. Михайлов, А.С. Комаров</i>	
ПОТОКИ КАРТ ПЛАСТИКИ РЕЛЬЕФА – ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	1581
<i>И.Н. Степанов, В.И. Степанова, И.П. Баранов, И.Ю. Винокуров</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РОЛИ БИОСФЕРЫ В КОМПЕНСАЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ ГЛОБАЛЬНОГО ЦИКЛА ДВУОКСИ УГЛЕРОДА	1587
<i>А.М. Тарко</i>	
ОЦЕНКА И МИНИМИЗАЦИЯ ОШИБОК ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДЫХАНИЯ ПОЧВЫ ПО ОТКРЫТОЙ СХЕМЕ	1592
<i>Ф.А. Татаринов, А.Г. Молчанов, А.В. Ольчев</i>	

СУКЦЕССИИ И БИОТИЧЕСКИЙ КРУГОВОРОТ	1596
<i>А.А. Титлянова</i>	
ООГЕНЕЗ ЛЯГУШКИ И КВАЗИ-ПАРЕТОВСКИЙ ЗАКОН НА ОСНОВЕ НОВОЙ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ	1605
<i>О.Б. Трубникова, Б.А. Трубников</i>	
МЕТОД РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ВЛАГОЗАПАСОВ ПОЧВЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ КРУГЛОГОДИЧНОГО АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА	1610
<i>С.Е. Варчева</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СООБЩЕСТВ АНАЭРОБНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ	1615
<i>В.А. Вавилин</i>	
НЕЛИНЕЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ЧИСЛЕННОСТИ <i>PSEUDOMONAS FLUORESCENS</i> В СУБСТРАТ-БАКТЕРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ	1620
<i>Н.И. Воробьев, А.М. Семенов, А.А. Шаталов, А.Х.К. Ван Бругген, О.В. Свиридова</i>	
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАК СЦЕНАРИИ В СЕТЕВОЙ БИБЛИОТЕКЕ ВЫЧИСЛИМЫХ МОДЕЛЕЙ. ПРИМЕР ПУБЛИКАЦИИ И РАСЧЕТОВ ДВУХФАЗНОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ	1625
<i>А.В. Воротынцев</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ МУРАВЬЕВ НА ЧИСЛЕННОСТЬ ИКСОДОВЫХ КЛЕЩЕЙ В ЭКОСИСТЕМАХ ЕВРАЗИИ	1631
<i>О.А. Вишкова</i>	
ИЗМЕНЕНИЯ СООТНОШЕНИЯ РЕАЛИЗОВАННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НИШ РАСТЕНИЙ В СООБЩЕСТВАХ ПРИ СУКЦЕССИИ	1634
<i>Е.В. Зубкова</i>	
МОДЕЛЬ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУКЦЕССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРАВΟΣМЕСЯХ	1640
<i>Г.С. Розенберг</i>	

CONTENTS

Volum 11, Number 1(7), 2009

PREFACE 1397

MULTIMODELLING RESEARCH FOR THE AQUATIC ECOSYSTEMS

A.I. Abakumov, E.E. Giricheva 1399

UNIVERSAL, SITE-INDEPENDENT GROWTH PRINCIPLE FOR THE HEIGHT GROWTH OF SPRUCE AND OTHER TREE SPECIES

K.-F. Albrecht, S. Missbach 1403

CONVENTIONAL APPROACHES TO ESTIMATING THERMAL PROPERTIES OF SOILS

T.A. Arkhangelskaya, K.I. Lukyashenko 1408

INFLUENCE OF EVALUATION UNCERTAINTY OF MINIMAL BIOSHERE MODEL PARAMETERS ON FORECAST OF BIOSPHERE DYNAMICS

S.I. Bartsev, A.G. Degermendzhi, Y.D. Ivanova, A.L. Shemel 1413

STUDY OF ANTS AND PLANTS INTERACTIONS BY LATTICE SIMULATION MODEL

V.V. Bessonov, G.E. Rubashko 1419

ANALYSIS OF UNCERTAINTY OF PARAMETERS OF A DECOMPOSITION ORGANIC MATTER MODEL: BAYESIAN APPROACH

M.G. Bezrukova, S.S. Bykhovets, P.Y. Grabarnik, A.A. Larionova, M.A. Nadporozhskaya 1424

MODELLING OF SOIL CARBON DYNAMICS UNDER DIFFERENT SYSTEMS OF FORESTRY AND HISTORICAL TRADITIONAL LAND USE IN THE EUROPEAN RUSSIA

M.V. Bobrovsky, A.S. Komarov, V.N. Shanin, S.S. Bykhovets, A.V. Mikhailov, L.G. Khanina 1430

THE ANALYSIS OF STABILITY OF SOIL SYSTEM BY THE THEORY OF ACCIDENTS

M.R. Davletshina 1435

GROWTH KINETICS OF AQUATIC MICROORGANISMS ON SOIL EXTRACTS IN KRASNOYARSK RESERVOIR AND MATHEMATICAL MODELING

N.N. Degermendzhy, A.G. Degermendzhi 1440

INFORMATIONAL AND ECOLOGICAL MECHANISMS OF REGULATING THE GLOBAL DEMOGRAPHIC PROCESS

B.M. Dolgonosov 1445

THE SPATIAL PATTERN OF ACCUMULATED BIOMASS LITTER IN A BOG BIRCH FOREST IN WESTERN SIBERIA: A GEOSTATISTICAL ANALYSIS

T.T. Efremova, A.F. Avrova, O.P. Sekretenko 1451

SYNCHRONOUS QUASI-TRIDIMENSIONAL (Q3D) SECTIONAL MODEL OF DYNAMICS OF THE BIOMASS OF TREES' COMMUNITY	
<i>V.V. Galitskii</i>	1457
«STANDARD MODEL» (AB4) OF CH₄ EMISSION FROM WEST SIBERIAN MIRES	
<i>M.V. Glagolev, A.F. Sabrekov, Sh.Sh. Maksyutov</i>	1463
MODELING OF CALCIUM DYNAMICS IN NORTHERN TAJGA FOREST SOILS	
<i>Y.S. Khoraskina, A.S. Komarov, M.G. Bezrukova, N.V. Lukina, M.A. Orlova</i>	1468
INDIVIDUAL-BASED MODEL OF WOOD COMMUNITIES DYNAMICS	
<i>A.N. Kolobov</i>	1475
LANDSCAPE-ECOLOGICAL PREDICTIVE MODELS OF CARBON BALANCE IN FOREST ECOSYSTEMS UNDER GLOBAL WARMING	
<i>E.G. Kolomyts, L.S. Sharaya</i>	1481
GEOCHEMICAL SYSTEM OF ELEMENTS IN HYDROSPHERE AS THE ECOLOGICAL STANDARD	
<i>V.D. Korzh</i>	1488
EXPERIENCE OF MODELING OF HEAVY METALS CYCLING IN THE AGROLANDSCAPES	
<i>N.E. Kosheleva</i>	1494
MODELING IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON CARBON DIOXIDE FLUXES FROM A OMBROTROPHIC BOG	
<i>Ju.A. Kurbatova, N.V. Shalukhina, A.V. Varlagin, C. Li</i>	1501
NET PRIMARY PRODUCTION OF KRASNOYARSK REGION, SPACE-BASED AND GROUND DATA (AS EXPERIMENTAL BASIS FOR THE GLOBAL ENVIRONMENT MODELING)	
<i>A.A. Larko, A.P. Shevyrnogov, M.Ju. Chernetsky, N.F. Ovchinnikova, Ju.D. Ivanova</i>	1506
ESTIMATION OF PHOTOSYNTHETIC EFFICIENCY OF FOREST STANDS	
<i>A.G. Molchanov</i>	1516
OPTIMIZATION OF SOIL RECLAMATION ON OPEN-CUT MINES USING SIMULATION MODEL OF SOIL ORGANIC MATTER DYNAMICS ROMUL	
<i>M.A. Nadporozhskaya, E.V. Abakumov, O.G. Cherotv</i>	1522
EPIGENETIC LAWS OF VARIABILITY SYSTEMS (ON EXAMPLE OF <i>AGROPYRON CRISTATUM</i> (L.) BEAUV.)	
<i>S.I. Neuymin, S.A. Shavnin, A.I. Montile, A.A. Montile</i>	1527
DYNAMIC MODES OF TWO-AGE POPULATION MODEL	
<i>G.P. Neverova, E.Ja. Frisman</i>	1533
APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL MODEL TO DESCRIBE EFFECT OF CLEA-CUTTING ON RADIATION REGIME OF FOREST ECOSYSTEM	
<i>A.V. Olchev, K. Radler</i>	1538

ESTIMATIONS OF CLIMATE CHANGE IMPACT ON AGROSPHERE PRODUCTIVITY IN RUSSIA: METHODOLOGY, MODELS AND RESULTS	1543
<i>V.N. Pavlova</i>	
EVALUATION OF NUMBER DYNAMICS AND SEX-AGE STRUCTURE OF MOOSE POPULATIONS (<i>ALCES ALCES L.</i>) IN RUSSIA WITH THE USE OF SIMULATION MODEL AND LONG-TERM MONITORING DATA	1549
<i>V.G. Petrosyan, N.N. Dergunova, S.A. Bessonov, K.A. Nazarova, A.V. Omelchenko</i>	
ATWO-DIMENSIONAL SIMULATION ECOSYSTEM MODEL OF THE NEVA BAY, GULF OF FINLAND	1554
<i>K.A. Podgornyj</i>	
APPLICATION OF THE MODELS OF BIOGEOCHEMICAL MASS-BALANCE FOR ESTIMATING ECOSYSTEMS SUSTAINABILITY TO AIR POLLUTANTS IMPACT	1559
<i>I.V. Pripulina, A.V. Tankanag, I.Yu. Averkieva</i>	
COMPLEX DYNAMIC MODES OF POPULATION WITH AGE AND SEX STRUCTURE	1564
<i>O.L. Revutskaya, E.Ya. Frisman</i>	
EXPERIENCE OF GRAIN CROPS PRODUCTIVITY MODELLING FOR THE NONCHERNOZEM ZONE OF RUSSIA ON THE BASIS OF THE GEOGRAPHICAL NETWORK OF EXPERIENCES WITH FERTILIZERS DATA	1569
<i>V.A. Romanenkov, O.D. Sirotenko, M.V. Belichenko, V.N. Pavlova</i>	
EFFECT OF FOREST MANAGEMENT REGIME AND CLIMATE CHANGE ON NUTRIENTS BALANCE IN FOREST ECOSYSTEMS: MODEL APPROACH	1575
<i>V.N. Shanin, A.V. Mikhailov, A.S. Komarov</i>	
FLOWS PLASTIC RELIEF MAPS - PHYSICAL AND MATHEMATICAL ECOLOGICAL SYSTEMS	1581
<i>I.N. Stepanov, I.P. Baranov, V.I. Stepanova, I.Ju. Vinokurov</i>	
INVESTIGATION OF ROLE OF THE BIOSPHERE IN COMPENSATION OF GLOBAL WARMING WITH THE AID OF THE MODEL OF GLOBAL CARBON DIOXIDE CYCLE	1587
<i>A.M. Tarko</i>	
ESTIMATION AND MINIMISATION OF ERRORS OF SOIL RESPIRATION MEASUREMENT USING OPEN SCHEME	1592
<i>F.A. Tatarinov, A.G. Molchanov, A.V. Oltchev</i>	
ECOSYSTEMS SUCCESSION AND BIOTIC TURNOVER	1596
<i>A.A. Titlyanova</i>	
FROG OOGENESIS AND THE QUASI-PARETO'S LAW ON THE BASIS OF NEW QUANTUM STATISTICS	1605
<i>O.B. Trubnikova, B.A. Trubnikov</i>	
METHOD OF CALCULATION OF THE SOIL MOISTURE SUPPLIES DYNAMICS FOR THE SYSTEM OF THE YEAR-ROUND AGROMETEOROLOGICAL MONITORING	1610
<i>S.E. Varcheva</i>	

DYNAMICS OF ANAEROBIC MICROORGANISMS COMMUNITY: EXPERIENCE IN MATHEMATICAL MODELING	1615
<i>V. A. Vavilin</i>	
NONLINEAR MODELLING OF SELF-OSCILLATIONS OF <i>PSEUDOMONAS FLUORESCENS</i> POPULATION IN THE SUBSTRATE-BACTERIAL SYSTEM	1620
<i>N.I. Vorobyov, A.M. Semenov, A.A. Shatalov, A.H.C. van Bruggen, O.V. Sviridova</i>	
ECOLOGICAL MODELS AS SCENARIOS IN THE NETWORK LIBRARY OF COMPUTABLE MODELS. THE EXAMPLE OF PUBLICATION AND CALCULATIONS OF TWO PHASE SOIL MOISTURE FLOW MODEL	1625
<i>A.V. Vorotintsev</i>	
MATHEMATICAL SIMULATION OF ANT INFLUENCE ON THE IxODE TICKS NUMBER IN EURASIAN ECOSYSTEMS	1631
<i>O.A. Vshivkova</i>	
CHANGES OF CORRELATION OF REALIZED PLANT ECOLOGICAL NICHES IN COMMUNITIES ALONG SUCCESSION	1634
<i>E.V. Zubkova</i>	
MODEL OF POTENTIAL EFFICIENCY OF SUCCESSIONAL PROCESSES IN MIXED GRASS CROPS	1640
<i>G.S. Rozenberg</i>	

ПРЕДИСЛОВИЕ

Национальная конференция с международным участием «Математическое моделирование в экологии» проходила с 1 по 5 июня в Пущинском научном центре РАН (г.Пущино Московской области) на базе Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН и Института математических проблем биологии РАН. Почетным сопредседателем Оргкомитета был профессор, д.ф.-м.н. А.М.Молчанов, организатор 11 Научных школ по математическому моделированию сложных биологических систем (1-я школа была организована в 1973 году чл.-корр. АН ССР А.А.Ляпуновым). Вокруг этих школ сложился неформальный коллектив, состоящий из математиков, биологов, экологов, геохимиков и др., сыгравший большую роль в становлении математического моделирования в биологии вообще и в экологии, в частности. Последняя Школа состоялась в 1991 году, с тех пор в жизни этого коллектива произошло много событий, но встречи на конференциях в разных странах, частые личные встречи в родной стране привели к очевидному выводу, что пора собираться и рассказывать о том, что было сделано за последние почти двадцать лет. Так родилась эта конференция.

Было прислано более 150 заявок на доклады из России, Украины, Беларуси, Польши, Азербайджана, из Москвы, Санкт-Петербурга, Владивостока, Красноярска, Новосибирска, Биробиджана, Одессы, Пущино, Иркутска, Минска, Омска, Петрозаводска, Хабаровска, Баку и других городов.

В результате в конференции приняли участие 107 участников из 19 городов и 4 стран. Было сделано 64 устных доклада, среди них 6 приглашенных. На постерной сессии было представлено 49 стендовых докладов. К началу работы Конференции был подготовлен сборник Материалов в виде компакт-диска (с ISBN – регистрацией). На диске также были собраны материалы по предыдущим школам и аудио и фото материалы-воспоминания о ученых-основоположниках моделирования в экологии. При содействии чл.-корр. РАН Г.С.Розенберга и финансовой поддержке Отделения биологических наук РАН был подготовлен предлагающийся Вашему вниманию тематический выпуск Известий Самарского научного центра РАН.

Тематика Конференции была объявлена по следующим направлениям:

- 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.

По присланным заявкам в результате были проведены следующие секции:

1. Методы и подходы в моделировании в экологии.
2. Моделирование циклов элементов в наземных экосистемах.
3. Модели деревьев. Модели популяций и сообществ растений.
4. Модели популяций и сообществ микроорганизмов и животных.
5. Моделирование водных экосистем.
6. Моделирование глобальных и региональных процессов.
7. Математические модели в ландшафтоведении и почвоведении.

Также в программе конференции был организован круглый стол «Рассказы об истории математической биологии в России».

Хорошим примером содержания и уровня докладов, сделанных на Конференции, является перечень приглашенных докладов, не все из которых, к сожалению, вошли в данный спецвыпуск: Логофет Д.О. (*Институт физики атмосферы РАН, Москва, Россия*). Должен ли математик - «модельер» доверять компьютерам?

Титлянова А.А. (*Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия*). Сукцессии и биотический круговорот.

Вавилин В.А. (*Институт водных проблем РАН, Москва, Россия*). Математическое моделирование динамики сообществ анаэробных микроорганизмов.

Криксунов Е.А. (*Биологический факультет МГУ, Москва, Россия*), Бобырев А.Е. (*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*), Бурменский В.А. (*Биологический факультет МГУ, Москва, Россия*). Математическое моделирование в системе промыслово-биологических и экологических исследований.

Руховец Л.А., Астраханцев Г.П., Меншуткин В.В., Минина Т.Р. (*Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН, Санкт-Петербург, Россия*), Петрова Н.А. (*Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*), Полосков В.Н. (*Санкт-Петербургский экономико-математический институт РАН, Санкт-Петербург, Россия*). Модели экосистемы Ладожского озера и их применение.

Дегерменджи А.Г., Барцев С.И. (*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*) Принцип наихудшего сценария и минимальные модели биосферы: проблемы и перспективы.

Трудно выделить наиболее интересные доклады – они были интересными все. Было продемонстрировано множество самых различных подходов, от классических моделей на языке дифференциальных уравнений (Е.Я.Фрисман и доклады его сотрудников, А.Б.Медвинский с соавторами и др., А.И.Абакумов и др.), до имитационных моделей, как сложных и многопараметрических (А.В.Ольчев, Е.М.Гусев и О.Н.Насонова, А.С.Комаров с сотрудниками и др.), так и простых клеточно-автоматных (В.И.Грабовский, Н.В.Михайлова). Доклады использовали геоинформационные системы (В.Г.Петросян с сотрудниками, Т.А.Архангельская), пространственную визуализацию карт с использованием методов дифференциальной геометрии (И.Н.Степанов с сотрудниками), многомерные статистические методы (Ю.Г.Пузаченко, В.А.Рожков). Были и традиционные для данного направления доклады биологов, содержащие постановки содержательных биологических задач, в которых математическое моделирование может сыграть ключевую роль при содержательном анализе (А.А.Титлянова, Н.В.Лукина).

В ряде докладов были представлены оригинальные подходы, имеющие весьма продуктивное будущее. Запомнились доклады Ю.Г.Пузаченко (ИПЭЭ РАН) о термодинамике живого вещества, П.Я.Грабарника (ИФХБПП РАН) о моделировании асимметричной конкуренции между растениями в терминах Марковских случайных полей с локальным взаимодействием, А.В.Воротынцева (ВЦ РАН) об экологических моделях как сценариях в сетевой библиотеке вычислимых моделей, А.Г.Молчанова об экспериментальном моделировании фотосинтетической продуктивности древостоев и ряд других докладов.

Оргкомитету удалось избежать параллельных секций, что позволило всем участникам заслу-

шать все доклады. Регулярно возникали дискуссии, обсуждение выступлений как устных, так и стендовых происходило очень активно.

В течение двух вечерних заседаний, заканчивавшихся после восьми часов вечера, был проведен круглый стол с рассказами об истории математической биологии в России. Участники вспоминали многие важные события, связанные с историей развития математических подходов и методов в биологии. Рассказывались личные воспоминания о Н.В.Тимофееве-Ресовском, А.А.Ляпунове, Ю.М.Свирижеве, И.А.Полетаеве и других. С собственными воспоминаниями и демонстрациями редких фотографий и видеороликов выступили А.А.Титлянова, С.Э. и Э.Э. Шноли, Н.А.Ляпунова, Н.Ю.Свирижева-Хопкинс, Д.О.Логофет, А.С.Комаров, Е.Я.Фрисман, А.Г.Дегерменджи, Ю.Г.Пузаченко и другие.

Все выступления были записаны. В дальнейшем предполагается, что многие материалы будут помещены на сайт конференции (<http://lem.edu.mhost.ru/index.php/2009-02-19-05-55-24/есоматмод>). Тезисы, фотографии заседаний и все информационные материалы Конференции также находятся на этом сайте.

Высокий научный уровень выразился и в составе участников. Из 107 зарегистрировавшихся участников было 42 доктора наук и 45 кандидатов наук (относительный состав по областям знаний приведен на сайте Конференции). К сожалению, аспирантов было всего 12 человек. В числе докладчиков была одна студентка географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (О.А.Дешеревская). Аспиранты преимущественно представляли Москву, Пущино, Красноярск и Биробиджан, где в этой области науки сохранились сильные научные школы.

На закрытии конференции было принято решение о регулярном проведении Конференции один раз в два года, пока в то же время (начало июня) и в Пущино. В дальнейшем при улучшении финансовых возможностей возможно проведение Конференции в других научных центрах.

*Председатель Оргкомитета
Проф., д.б.н. А.С.Комаров*

МНОГОМОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

© 2009 А.И. Абакумов, Е.Е. Гиричева

¹ Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток;
e-mail: abakumov@iacp.dvo.ru, zhenya77@yandex.ru

Для качественного математического моделирования водных экосистем предлагается использовать многомодельный подход и замкнутые модели. Под замкнутыми понимаются модели, в которых экосистема описывается замкнутой по характеристикам своего состояния. Изучив свойства более простых замкнутых моделей, переходим к незамкнутым моделям, с максимально возможной адекватностью описывающим водную экосистему. При многомодельном подходе разные модели одной и той же экосистемы связываем условиями согласованности. Согласованность двух моделей означает, что их параметры связаны условием наибольшей возможной близости решений. Представлена реализация для экосистемы Берингова моря.

Ключевые слова: водная экологическая система, трофические взаимоотношения, математическая модель, дифференциальное уравнение.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных способов макроописания водных экосистем является анализ структуры и величин потоков вещества и/или энергии. Такое описание можно представить в виде ориентированного графа потоков вещества и/или энергии между блоками системы. Далее для определенности будем говорить о веществе. Блоки системы – это сообщества близких видов или совокупности близких по свойствам веществ. Дуги графа указывают на переходы вещества вследствие жизнедеятельности организмов или физико-химических превращений вещества [2]. Традиционно рассматривается трофическая структура экосистем и сообществ. Степень детализации моделей может быть различной, необходимо остановиться на разумном уровне, так как, например, фито-, зоо-, бактериопланктон состоит из сотен видов.

Наш способ моделирования состоит в следующем.

Во-первых, сначала идеализируем экосистему, рассматривая ее как замкнутую. Под замкнутой будем понимать экосистему, через границы которой вещество не перемещается. Модели для замкнутых экосистем будем также называть замкнутыми. Замкнутые модели изучать проще, чем незамкнутые. Исследовав их, размыкаем модели соответственно реальной экосистеме. Изучение свойств незамкнутых моделей использует знания о соответствующих замкнутых моделях. Это дает возможность изучать водную экосистему системно и более точно, чем в иных вариантах.

Во-вторых, моделей одной и той же водной экосистемы может быть много. Поскольку ко-

личественные знания о водных экосистемах обладают малой точностью, то для достижения качественных результатов при математическом моделировании мы предлагаем использовать многомодельный подход, состоящий в разработке и исследовании серии моделей одного и того же объекта. Об одной и той же экосистеме может найтись информация в разных источниках, эта информация может диктовать создание разных математических моделей функционирования этой экосистемы. Разные модели одного и того же объекта должны быть как-то связаны друг с другом. Взаимосвязи моделей будем характеризовать их согласованностью. В работе определяется понятие согласованности моделей, оно применяется для определения параметров в моделях.

Итак, рассматривается способ математического моделирования водных экосистем, использующий замкнутые модели, многомодельные описания при условиях согласованности моделей. Способ иллюстрируется примером о Беринговом море.

Работа поддержана грантом ДВО РАН, проект № 09-I-П2-02.

Водная экосистема представляется основными блоками, как указано во введении. Состояние экосистемы описывается n -мерным вектором x компоненты которого суть биомассы или массы соответствующих блоков. Модель экосистемы построим на основе автономной системы дифференциальных уравнений

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

Здесь a - вектор постоянных параметров, значение которого мы обсудим позже в разделе про согласованность моделей. Мы считаем, что пол-

ностью, без потерь, описываем потоки вещества. Тогда наши модели замкнуты в том смысле, что для всех допустимых значений x выполняется тождество:

$$\sum_{j=1}^n f_j(x, a) \equiv 0,$$

т.е. сумма биомасс в системе постоянна во времени:

$$\sum_{j=1}^n x_j(t) = const.$$

Это один из вариантов замкнутости, более подробные сведения можно почерпнуть в работе [1].

Пусть мы имеем еще одну модель этой же экосистемы, представленную системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{y} = g(y, b), \tag{2}$$

где y - вектор биомасс (масс) блоков при другом представлении экосистемы, b - вектор параметров второй модели.

Векторы x, y связаны некоторыми соотношениями

$$h(x, y, c) = 0 \tag{3}$$

из-за описания одного и того же объекта.

Согласованность моделей будем понимать в смысле согласованности их параметров, струк-

тур и решений. Формализуем это понятие. Через a, b, c обозначены векторы неизвестных параметров в моделях (1), (2) и условия связи (3).

Вычислим полную производную $\frac{dh}{dt}$ вдоль решений систем уравнений (1) и (2) и будем искать параметры a, b, c из условия близости этой производной к нулю:

$$\left\| \frac{\partial h(x, y, c)}{\partial x} \cdot f(x, a) + \frac{\partial h(x, y, c)}{\partial y} \cdot g(y, b) \right\|_{(a, b, c)} \rightarrow \inf. \tag{4}$$

Здесь $\|\cdot\|$ обозначает норму в пространстве измеримых интегрируемых с квадратом функций. Условие (4) означает согласование по скоростям \dot{x}, \dot{y} , фазовых переменных, а не по самим переменным x, y , как записано в условии (3). В то же время мы согласовываем модели не только на решениях обыкновенных дифференциальных уравнений, но и на некотором множестве изменения переменной x . Итак, формально согласованность моделей определяется условием (4) на выбор параметров a, b, c .

ПРИМЕР: ЭКОСИСТЕМА БЕРИНГОВА МОРЯ

Основные блоки и направления потоков вещества между ними указаны на рис. 1.

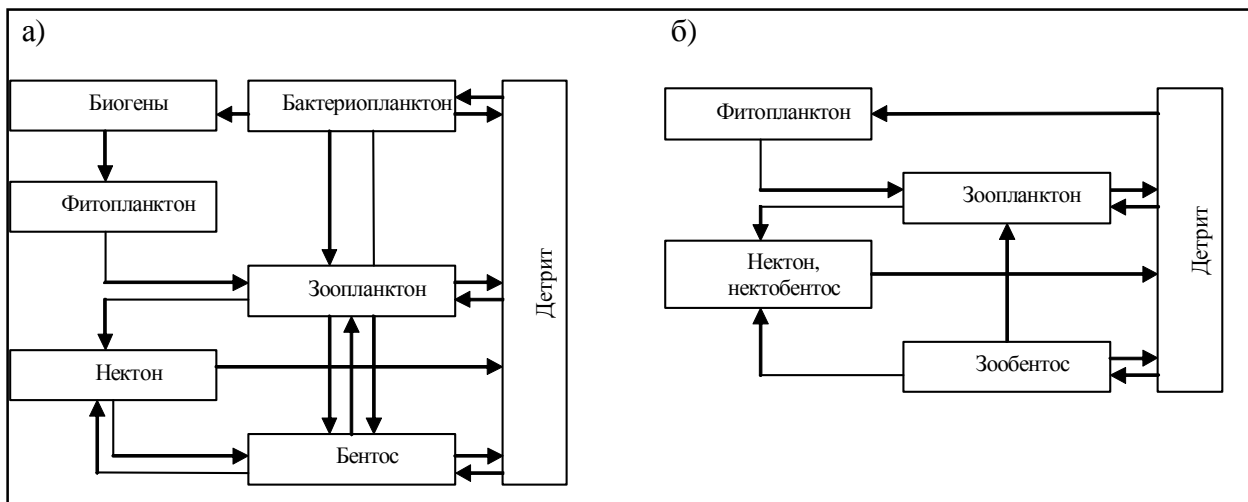


Рис.1. Потоки вещества в моделях для экосистемы Берингова моря

Минеральные вещества на основе углерода, кремния, фосфора и азота (биогенные вещества) используются в процессе фотосинтеза при создании органического вещества и построении растительных организмов (фитопланктон, 1). Здесь и далее в скобках указаны буквенные или числовые индексы блоков в моделях. Бактериопланктон (d) минерализует отмершую органику (детрит, o), используя часть вещества и энергию для

собственной жизнедеятельности. В этом блоке присутствуют также простейшие. Остальные стрелки между блоками живых организмов указывают направления перехода (с преобразованием) вещества в процессе поедания одних организмов другими. Неусвоенная при этом органика поступает в детрит. Органика поступает в детрит также при отмирании организмов по не-трофическим причинам. Обратная связь пред-

ставлена потоками вещества из детрита в биогены с переработкой их в блоке бактериопланктона. Блок зоопланктона (2) включает нехищный и хищный зоопланктон, нектон (3) состоит из всех активно движущихся в толще воды организмов, бентос (4) делится на нехищный (мелкий) и хищный (крупный). Блоки биогенных элементов (b) и бактериопланктона фигурируют только в первой модели. Время измеряется в годах, плотности масс (биомасс) блоков – в т/км².

Пусть $x_i(t)$ плотность массы (биомассы) i -го блока. Скорости потоков вещества между блоками обозначены $V_{ij}(x_i, x_j)$ для $i, j \in J, (i, j) \in P$. Через $J = \{1, 2, 3, 4, d\}$ обозначено множество индексов блоков живых организмов, P – это множество пар взаимодействующих блоков (взаимодействия типа «хищник – жертва» или «ресурс – потребитель»). В случае блоков живых организмов функции $V_{ij}(x_i, x_j)$ представляют собой трофические функции. Часть u_{ij} потребленной продукции усваивается j -ым блоком, а ее доля k_{ij} идет на рост, т.е. на образование продукции j -ым блоком. Часть отмершей биомассы со скоростью m_i переходит в детрит. Детрит формируется также за счет пищи, не усвоенной другими блоками.

Система является замкнутой: поток вещества через ее границу равен нулю.

Тогда изменение масс (биомасс) блоков в первой модели представляется в виде

$$\begin{cases} \dot{x}_b = (1 - u_{od})V_{od}(x_o, x_d) - \sum_{\{(b,l) \in P\}} V_{bl}(x_b, x_l); \\ \dot{x}_j = \sum_{\{(i,j) \in P\}} k_{ij} u_{ij} V_{ij}(x_i, x_j) - \sum_{\{(j,l) \in P\}} V_{jl}(x_j, x_l) - m_j(x_j), j \in J; \\ \dot{x}_o = (1 - k_{od})u_{od}V_{od}(x_o, x_d) + \sum_{\{(i,j) \in P\}} (1 - k_{ij} u_{ij}) V_{ij}(x_i, x_j) + \\ + \sum_{j \in J} m_j(x_j) - \sum_{\{(o,l) \in P\}} V_{ol}(x_o, x_l). \end{cases} \quad (5)$$

Во второй модели часть блоков отсутствует, уравнения преобразуются соответствующим образом.

Из способа построения модели следуют соотношения между массами:

$$y_j = x_{j+2}, j = 1, 2; y_3 = x_5 + kx_6; y_4 = (1 - k)x_6; y_5 = x_7. \quad (6)$$

Коэффициент k определяется долей нектобентоса в блоке бентоса для первой модели. Так как расчеты производятся в некоторой окрестности наблюдаемых состояний системы, то с некоторой натяжкой мы принимаем этот коэффициент постоянным.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Из описаний моделей экосистемы Берингова моря получены значения некоторых параметров трофических взаимодействий для системы (5).

Использована модель западной части Берингова моря, описывающая взаимодействие 36 групп видов.

Для блоков живых организмов трофические функции представляются в виде $V_{ij}(x_i, x_j) = r_{ij} x_i x_j$. Для 27 групп скорости выедания r_{ij} вычислены из известных долей жертв в рационе хищника, а также известных суммарных объемов потребляемой биомассы, и оценок самих биомасс. Для блоков оценки скоростей потребления получены усреднением с весами этих оценок для входящих в блоки основных видов. Скорости усвоения фитопланктоном биогенных элементов, потребления бактериопланктона зоопланктоном и бентосом найдены через P/B - коэффициенты. Предположим, что средние оценки масс блоков [4] определяют равновесное состояние экосистемы (в т под кв.км поверхности): биогены – 9795, бактериопланктон – 476, фитопланктон – 400, зоопланктон – 250, нектон – 42, бентос – 261, детрит – 11 217. Тогда неизвестные коэффициенты r_{ij} и коэффициенты смертности вычисляются из условия равновесия системы. Пересчитаны коэффициенты усвояемости u_{ij} и коэффициенты использования усвоенной пищи на рост k_{ij} .

Для второй модели параметры получены на основе условия равновесности наблюдаемого состояния системы и условия (4) согласования с первой моделью.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСИЙ СИСТЕМЫ И ИХ УСТОЙЧИВОСТИ

В замкнутой системе правая часть одного дифференциального уравнения является линейной комбинацией остальных. Поэтому состояния равновесия систем (1) и (2) представляют однопараметрические кривые в пространствах R^n и R^m . Это именно кривые, а не прямые, хотя в представленной на рис. 2 проекции они близки к прямым линиям.

Под биомассой понимается суммарная биомасса фито-, зоопланктона, нектона и бентоса. Общая масса M по горизонтальной оси на рис. 2 – это сумма биомассы и массы детрита. Для первой модели условие существования и устойчивости равновесий состоит в неравенстве $M > 15771$, а для второй $M > 9245$. Устойчивость иллюстрируется расчетами для замкнутых моделей (3 на рис. 2). Из неравновесного состояния экосистема за два года возвращается в окрестность кривых равновесий. Но из разных начальных состояний экосистемы приходят к разным равновесиям.

Рассмотрен незамкнутый вариант (4 на рис. 2), полученный следующими изменениями замк-

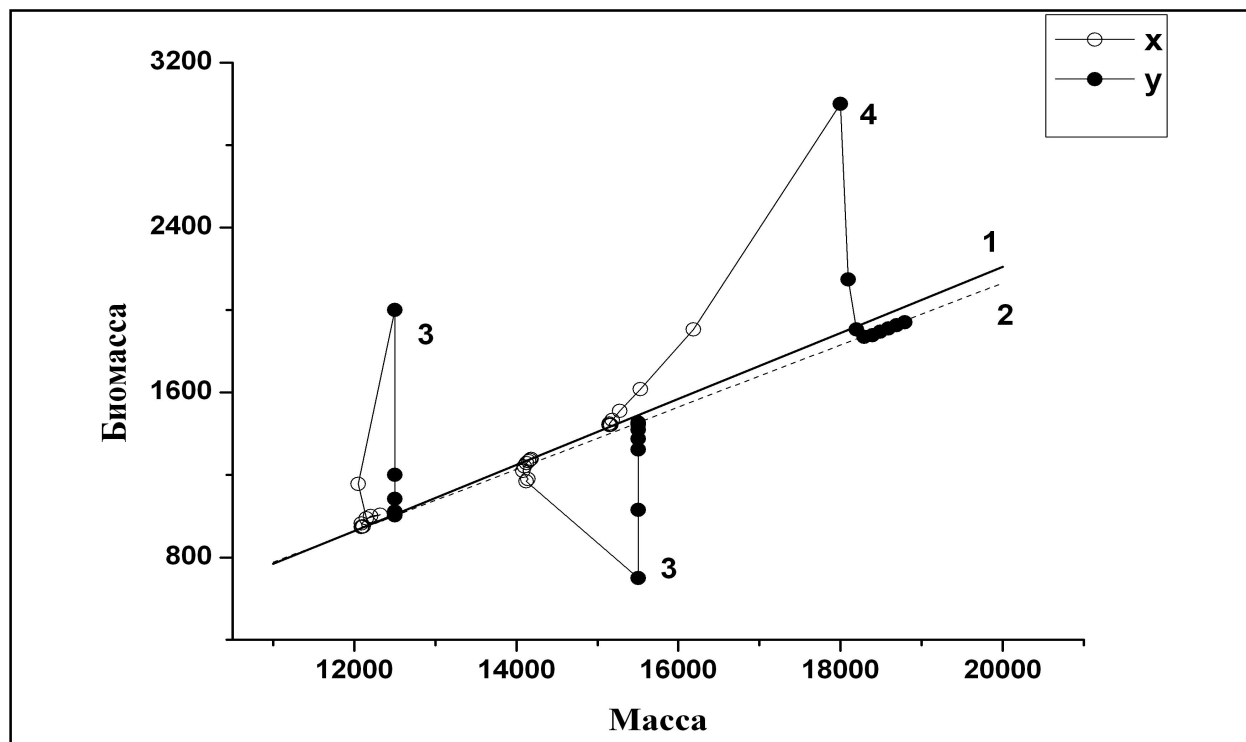


Рис. 2. Кривые равновесий для первой (1) и второй (2) моделей. Примеры переходных режимов в замкнутых (3) и незамкнутых (4) моделях

нутости: в первой модели масса биогенов прирастает со скоростью 200 т/км² в год, а детрит убывает с удельной скоростью 0,01 в год; во второй модели детрит прибывает с удельной 0,006 в год. С учетом качественных различий в моделях эти изменения примерно одинаковы для общих блоков первой и второй моделей. Расчеты показывают, что за 2 - 4 года также достигаются окрестности кривых равновесий, построенных для замкнутых моделей. Но сами точки равновесия несколько отличаются от тех, которые были бы достигнуты в замкнутых моделях.

Незамкнутый вариант (4 на рис. 2) просчитан также с имитацией изменений условий внешней среды. Это сделано изменением скоростей потребления: $r_{ij}(t) = r_{ij}(1 + 0.1 \sin 4\pi t / T)$ (для блоков живых организмов). Для примера на рис. 3 указана динамика биомасс бентоса а) для первой модели и зообентоса, б) для второй модели для постоянных и осциллирующих коэффициентов скоростей потребления. Во второй модели блок бентоса представлен зообентосом и рис. 3 наглядно демонстрирует большую отзывчивость мелких организмов на изменения условий среды обитания.

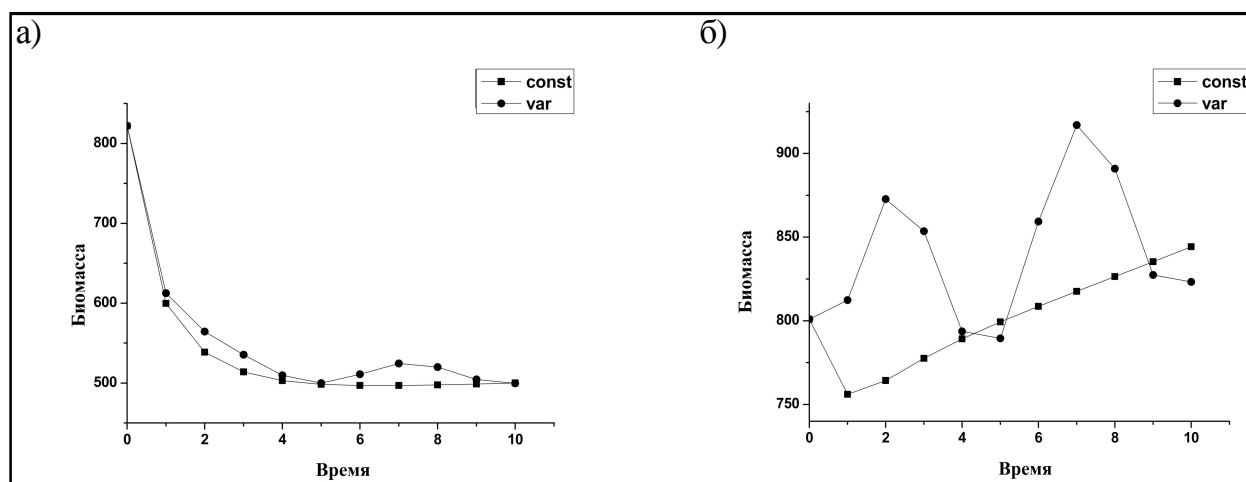


Рис. 3. Динамика бентоса в первой модели (а) и зообентоса во второй модели (б) при постоянных и осциллирующих коэффициентах потребления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение замкнутых моделей для водных экосистем позволяет системно анализировать свойства модельных решений и плавно переходить к более адекватным незамкнутым моделям для экосистем. Многомодельный подход с взаимно согласованными моделями дает возможность более полно использовать информацию об экосистеме из разных источников и получать более полноценные качественные и более точные количественные результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Йоргенсен С.Э. Управление озерными экосистемами. М.: Агропромиздат, 1985. 160 с.
3. Левасту Т., Ларкинз Г. Морская промышленная экосистема. М.: Агропромиздат, 1987. 165 с.
4. A comparison of the Eastern Bering and Western Bering Sea Shelf and slope ecosystems through the use of mass-balance food web models // NOAA Technical Memorandum NMFS-AFSC-130/by K.Y. Aydin, V.V. Lapko, V.I. Radchenko, and P.A. Livingston, 2002. URL: http://www.ecopath.org/modules/Models/papers/eastern_western_bering.pdf (дата обращения: 10 февраля 2009).

MULTIMODELLING RESEARCH FOR THE AQUATIC ECOSYSTEMS

© 2009 A.I. Abakumov, E.E. Giricheva

Institute for Automaton and Control Processes, Far Eastern Branch of
the Russian Academy of Sciences, Vladivostok;
e-mail: abakumov@iacp.dvo.ru, zhenya77@yandex.ru

The mathematical models describe structure and streams of substance for aquatic ecosystem. The blocks of the model are communities of similar species or sets of similar substances. The trophic structure of ecosystem is the traditional basis for mathematical models. The same ecosystem can have many models which base on different information. We connect these models by some condition of the coordination. Models for ecosystem of Bering Sea are represented in the form of systems of the differential equations. The multimodelling approach with coordinated models gives more qualitative results. The presentation contains the results of the computing experiments.

Keywords: aquatic ecological system, trophic relations, mathematical model, differential equation.

ОДИНАКОВЫЙ ПО МЕСТООБИТАНИЯМ ПРИНЦИП РОСТА НА ПРИМЕРЕ РОСТА В ВЫСОТУ У ЕЛИ И ДРУГИХ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ

© 2009 К.-Ф. Albrecht, S. Missbach

Technical University of Dresden, Forest Sciences, Tharandt, Germany;
e-mail: albrecht@forst.tu-dresden.de, sven.missbach@gmx.de.

A site-independent growth principle for tree heights is presented. Under «normal conditions» this principle leads to identical growth data sequences for different sites if one uses the dimensionless units relative to the maximum of increases. These units are the time (age), t_m , at which the maximal increase appears and the tree height, X_m , which is reached at that time. Transition to these units corresponds formally to the transformation $t' = t/t_m$ and $X' = X/X_m$. The identical behaviour of the growth curves is demonstrated for spruce and red oak. For the sake of comparison, preliminary results on the growth behaviour of other tree species are presented also.

Key words: *growth curves, relative units, invariance principle.*

TRANSFORMATION TO A SITE- INDEPENDENT GROWTH CURVE

This contribution is based on former results [1, 6]. A universal growth principle for the height growth of trees and stands states that (for equal forest management and constant site conditions) all growth data sequences get identical independent of their sites (and roughly independent of the tree species also) if the dimensionless units are used for age t and height X which are related to the parameters t_m and X_m characterizing the maximum of increases. The new variables are

$$t' = \frac{t}{t_m}, \quad X' = \frac{X}{X_m}, \quad (1)$$

where t_m is the age when the maximal increase appears and X_m is the height that is reached at this moment. Therefore, t_m and X_m represent the transformation parameters.

This transformation has been already used elsewhere for another purpose [7]. To apply transformation (1) in a real case one needs to know the particular values of t_m and X_m for that case. The data for $X(t)$ are mostly given only for t -values with regular gaps of 10 years. Therefore, one has to interpolate these data within the 10-year intervals in order to determine the transformation parameters t_m and X_m . To do so, the height increase data have been fitted for the total period of $0 < t < 2t_m^e$ (with t_m^e being a rough estimate of t_m) by a polynomial:

$$\frac{dX}{dt} = a \cdot t^3 + b \cdot t^2 + c \cdot t + d. \quad (2)$$

Under assumption that the position of the maximum of polynomial (2) is a suitable approximation for the position of the maximum for the real increases, one can calculate this position as an extremal point

of the polynomial:

$$t_m = -\frac{b}{3a} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{3a}\right)^2 - \frac{c}{3a}}. \quad (3)$$

The second transformation parameter X_m can thereafter be obtained in a similar way. The height data have also been fitted by a polynomial, and its value at the argument $t = t_m$ yields the value of X_m :

$$X_m = X(t_m) = a' \cdot t_m^3 + b' \cdot t_m^2 + c' \cdot t_m + d'. \quad (4)$$

RESULTS FOR TRANSFORMATIONS OF VARIOUS GROWTH DATA SEQUENCES

a) Heights of spruce

Data documented in «Yield Tables» for the growth of spruce are considered first. Fig.1 shows data sequences of the mean heights and also for the mean values of the heights of 10 single trees for 3 different site classes [4].

In Fig. 2, the 3 transformed growth data sequences of the mean heights for the 3 site classes already shown in Fig. 1b are compared with 9 transformed growth data sequences of different «stand qualities» from other areas [2]. When transformed, the different growth data sequences mainly agree. The small differences could be caused, e.g., by changes in «site qualities» after 1915 or by imprecise determination of the transformation parameters t_m and X_m .

b) Heights of other tree species

Fig. 3 shows transformed growth data of red oak in 3 site classes. Again, these growth data sequences behave almost identically. For the purpose of comparison the transformed data sequence of spruce (for the best «stand quality» M40 [2]) is shown here too. A remarkable agreement between the transformed growth data sequences of red oak and that of spruce can be seen.

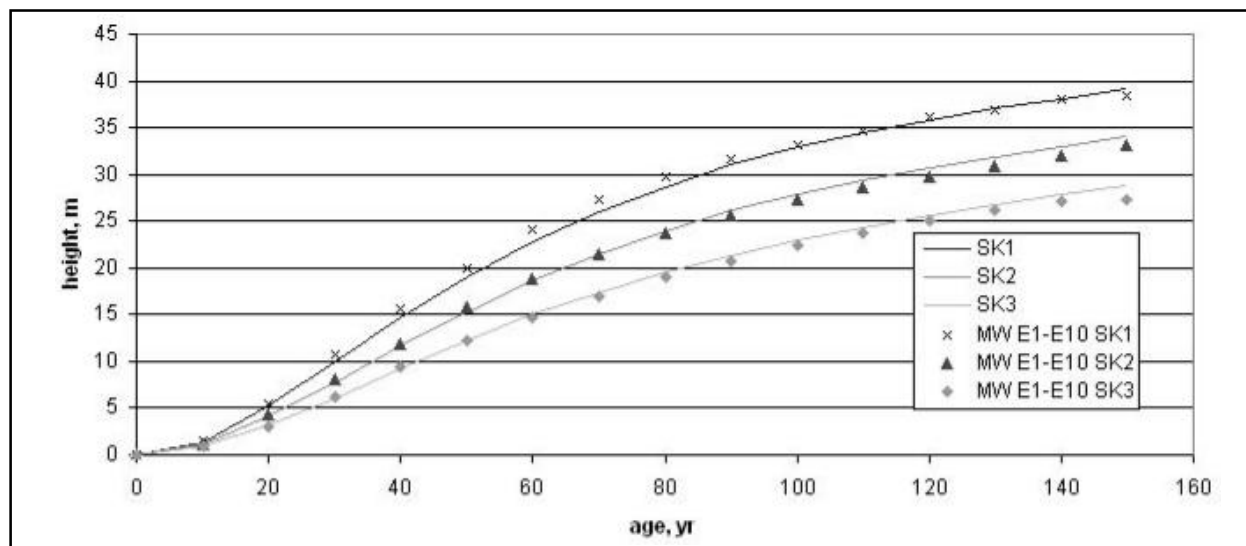


Fig. 1a. Growth data series for mean heights and for mean values of 10 single trees in 3 different site classes

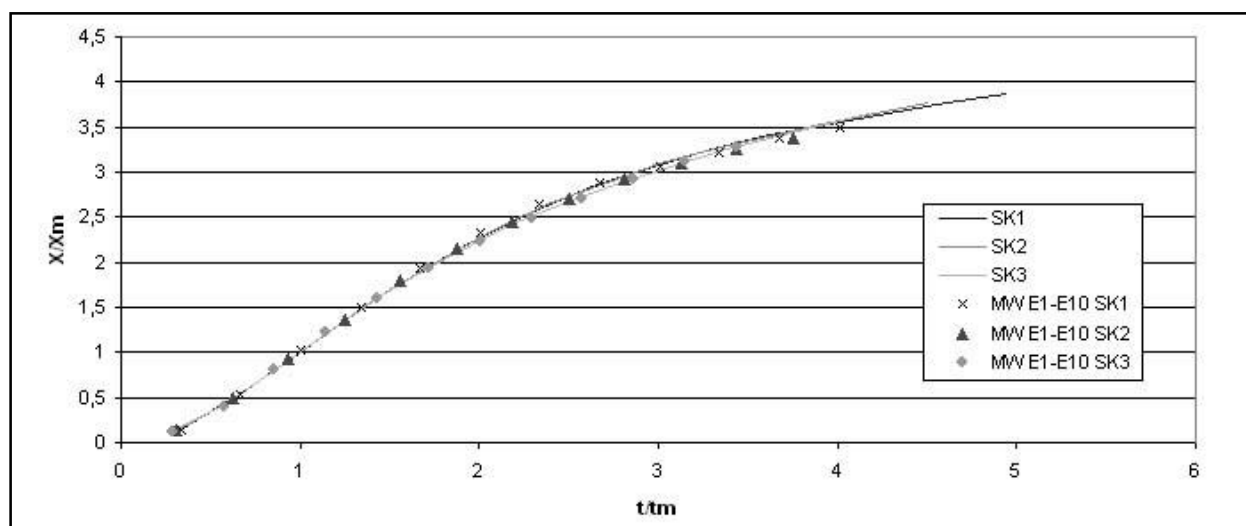


Fig. 1b. Transformed growth data sequences for mean heights and for mean values of 10 single trees for 3 different site classes

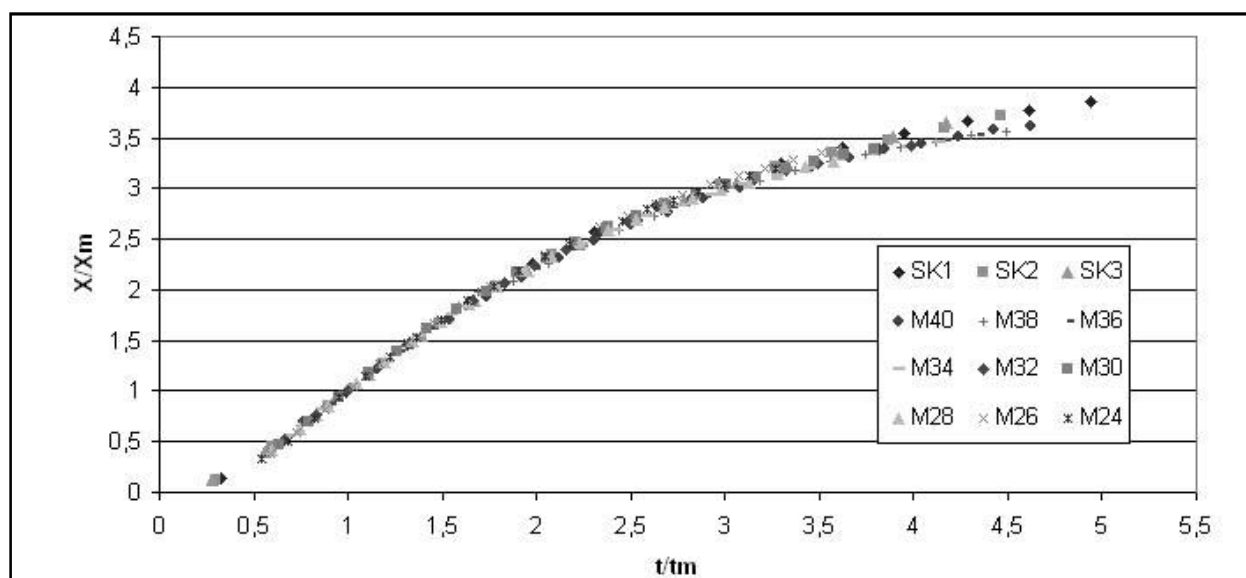


Fig. 2. Transformed growth data sequences for different site classes and stand qualities

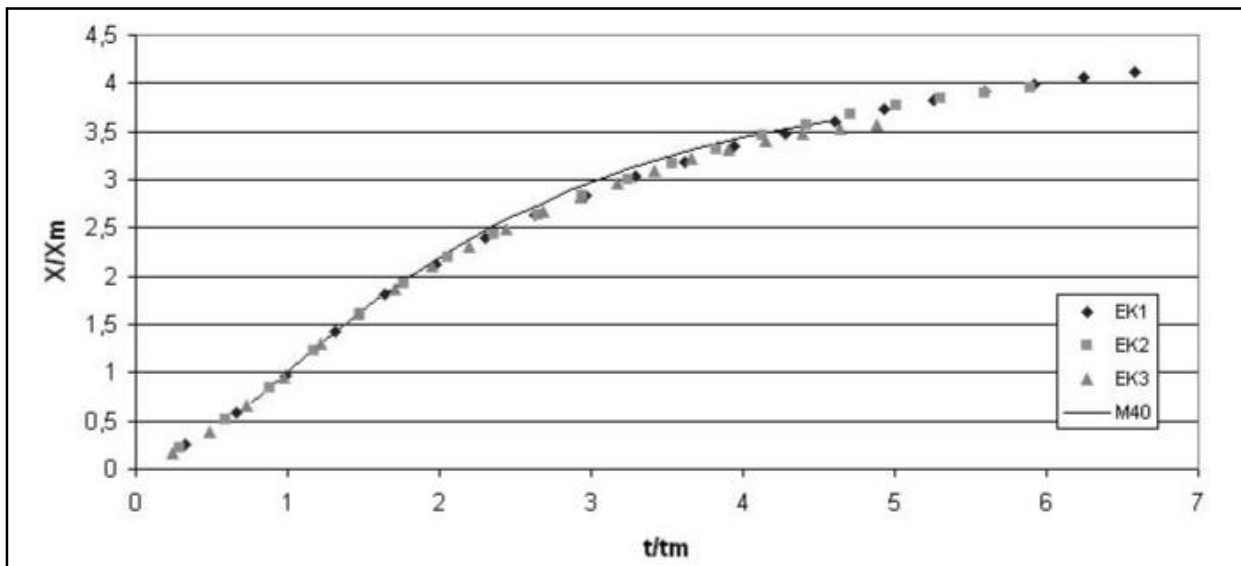


Fig. 3. Transformed growth data sequences of red oak for different site classes and of spruce for the best site class

This result has stimulated the study of transformed growth data for further tree species. Preliminary results for such transformed growth data are shown in Fig. 4 for the best «site qualities» of spruce, red oak, fir, copper beech, and Douglas fir. The agreement is not so good as in the case of spruce and red oak, but similarities are nevertheless visible. For two additional tree species (larch and oak) the similarity with the general trend is worse (deviations up to 10%). There may be a number of reasons for the discrepancy, e.g., inaccurate determination of the transformation parameters t_m and X_m or changes in the «site quality», but also differences in the growth mechanisms of different tree species. The results

described have been obtained on the basis of data analysis alone, without any growth models. Models may be used for further interpretation. For example, the spruce growth can be interpreted by means of a growth process model originated from Werner Mende [5]. Application of that model to the data described here reveals the following relation to be approximately true for all considered tree species:

$$X_L = 5 \cdot X_m, \tag{5}$$

with: X_L = the theoretical maximal limit of the height X for the given site and

X_m = the height at the age when the maximum of increases appears.

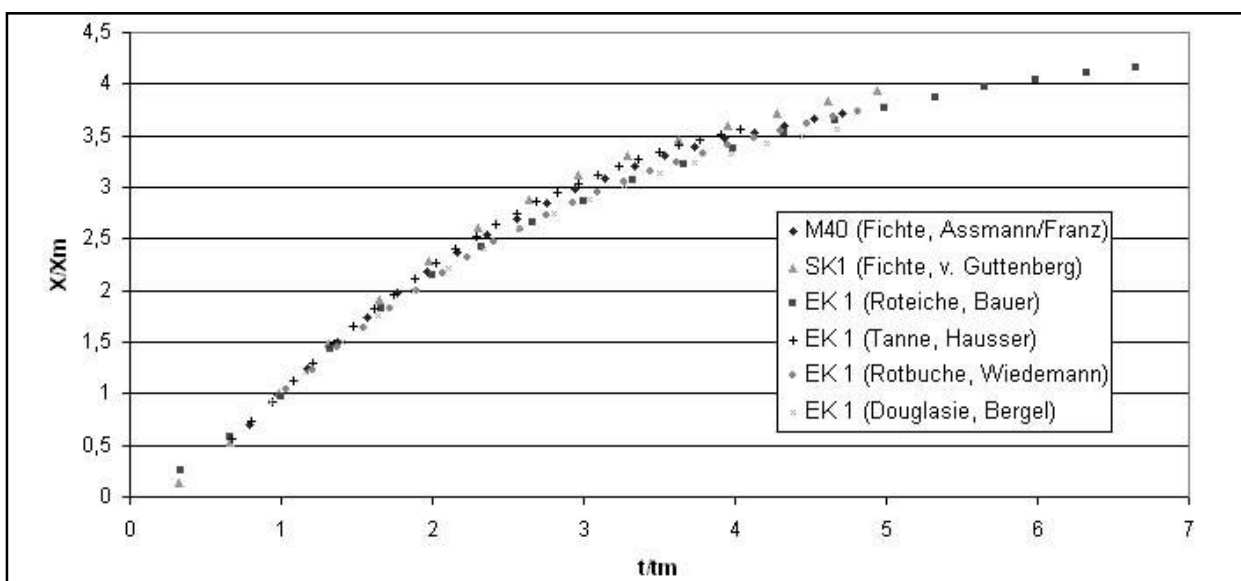


Fig. 4. Transformed growth data sequences for various tree species

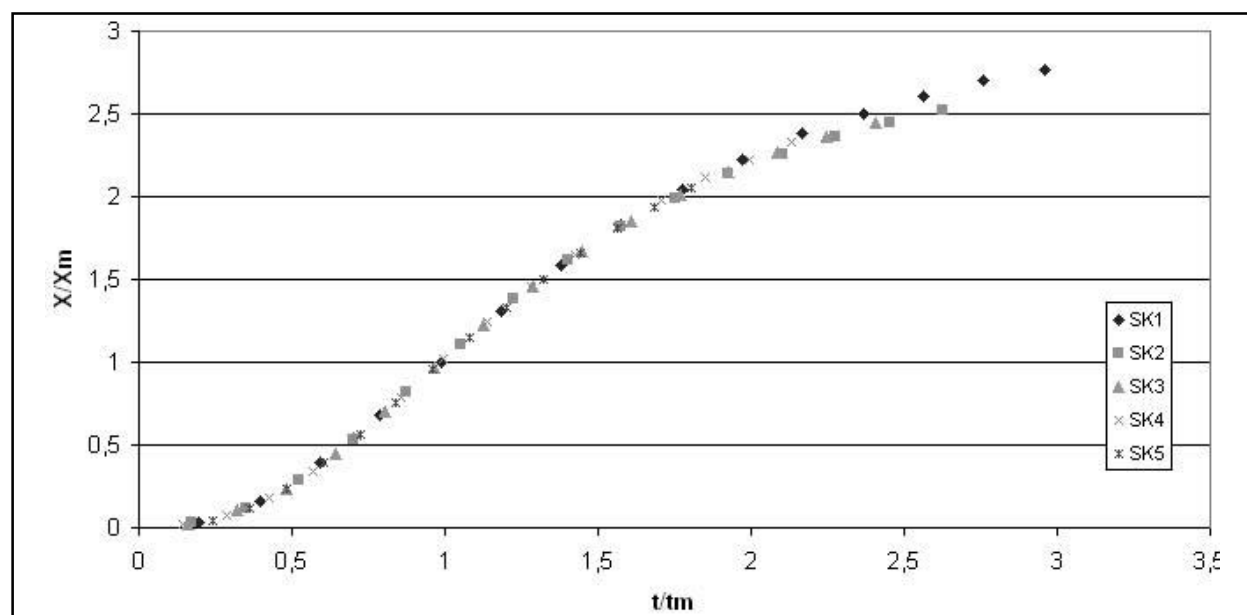


Fig. 5. Transformed growth data sequences for wood mass per ha, SK1-SK5

c) Another growth index

As a first attempt to study the behaviour of other growth indexes, the growth of wood mass per ha has been considered. Fig. 5 shows the transformed data sequences of this growth index in 5 site classes for spruce [4]. Again, the behaviour of these sequences for different site classes agrees quite well. In this case, the maximum of increases appears considerably later than in the case of height growth, with more data points before the maximum to provide for more precise determination of the transformation parameters t_m and X_m .

CONCLUSION

The growth data sequences for a number of tree species exhibit identical behaviour irrespective of the site class when the age is measured in the relative units of t_m and the height in the relative units of X_m , the both parameters being defined with regard to the moment when the growth is maximal and to the measured value at that moment, respectively. In the formal terms, this reduces to the transformation: $t' = t/t_m$, $X' = X/X_m$, whereupon growth data obtained from different sites can be checked and combined.

To describe the height growth it is sufficient to know the values of t_m and X_m . These values thus characterize the site in terms of stand growth, and their accurate identification becomes important. Consequently, more measurements are required at the ages in a vicinity of t_m .

The comparison of transformed growth data sequences among different tree species does not reveal such a good agreement as it does for different sites of the same tree species. But there is a rough agreement in this case, too. Also, the transformation

method can be applied for other growth indexes, thus being useful for prognoses in forest science and management.

Acknowledgments

We are thankful to Dr. habil. D. Gerold for constructive discussions and especially for her indication to the yield tables of Assmann and Franz. We thank Prof. H. Rühle for many stimulating discussions and remarks concerning the measurement process of tree heights. One author (K.-F. Albrecht) is very thankful to W. Mende for his valuable suggestions in analysing growth processes during a collaboration for more than 20 years.

REFERENCES

1. Albrecht K.-F. Forstwissenschaftliche Tagung, Tharandt, 2006.
2. Assmann E., Franz F. Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. München: Institut für Ertragskunde der Forstlichen Forschungsanstalt, 1963 (2. Aufl. 1972).
3. Bauer F. Die Roteiche. Frankfurt a. M.: J.D. Sauerländer's Verlag, 1953.
4. Guttenberg, A. V. Wachstum und Ertrag der Fichte im Hochgebirge. Wien, Leipzig: Franz Deuticke Verlag, 1915.
5. Mende W., Albrecht K.-F. Beschreibung und Interpretation des Fichtenwachstums mit Hilfe des Evolon-Modells // Forstw. Cbl. 2001. V. 120. P. 53–67.
6. Missbach S. Methodische Untersuchungen zu standortunabhängigen Eigenschaften des Wachstums von Bestandeshöhen und Baumhöhen. Tharandt: Technical University of Dresden, 2008.
7. Zeide B. Intrinsic units in growth modelling // Ecological Modelling. 2004. V. 175. Issue 3, P. 249–259.

**UNIVERSAL, SITE-INDEPENDENT GROWTH PRINCIPLE
FOR THE HEIGHT GROWTH OF SPRUCE AND OTHER TREE SPECIES**

© 2009 K.-F. Albrecht, S. Missbach

Technical University of Dresden, Forest Sciences, Tharandt, Germany;
e-mail: albrecht@forst.tu-dresden.de, sven.missbach@gmx.de.

A site-independent growth principle for tree heights is presented. Under «normal conditions» this principle leads to identical growth data sequences for different sites if one uses the dimensionless units relative to the maximum of increases. These units are the time (age), t_m , at which the maximal increase appears and the tree height, X_m , which is reached at that time. Transition to these units corresponds formally to the transformation $t' = t/t_m$ and $X' = X/X_m$. The identical behaviour of the growth curves is demonstrated for spruce and red oak. For the sake of comparison, preliminary results on the growth behaviour of other tree species are presented also.

Key words: *growth curves, relative units, invariance principle.*

УДК 631.436

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ

© 2009 Т.А. Архангельская, К.И. Лукьященко

Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва;
e-mail: arhangelskaia@rambler.ru, Lou86@yandex.ru

В статье приводится обзор математических моделей, позволяющих рассчитывать тепловые свойства почв по их основным свойствам. Проведено сопоставление расчетных величин температуропроводности агросерых почв, полученных при использовании ряда моделей, с экспериментальными данными.

Ключевые слова: почва, температуропроводность почвы, математические модели.

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

Для расчетов теплоемкости почвы практически во всех современных руководствах [23, 32] рекомендуется, а в пакетах программного обеспечения [33] используется модель де Фриза [12, 27]. В рамках подхода де Фриза теплоемкость почвы рассчитывается как сумма теплоемкостей ее составляющих: минералов (при 10°C теплоемкость 0,18 кал/г°Cград), органического вещества (при 10°C теплоемкость 0,46 кал/г°Cград) и почвенной влаги. При этом обычно считают, что теплоемкость почвенной влаги равна 1 кал/г°Cград, независимо от степени ее связанности и концентрации растворенных в ней веществ.

Е.А. Дмитриев [13] полагал, что теплоемкость химически связанной воды равна теплоемкости льда, т. е. 0,45 кал/г°Cград. В диапазоне температур 20-50°C для теплоемкости минералов Е.А. Дмитриев получил величину, близкую к оценке де Фриза – 0,19 кал/г°Cград, и существенно меньшую для почвенной органики – 0,28 кал/г°Cград [13, 14]. Но поскольку доля органической составляющей в твердой фазе почвы обычно составляет единицы процентов, а количество связанной воды тоже очень невелико, оценка теплоемкости

почвы, по Дмитриеву, как показано в работе [2], оказывается близкой к результатам расчета по де Фризу.

Говоря о методах расчетной оценки коэффициентов тепло- и температуропроводности почвы, можно выделить два принципиально различающихся подхода. Первый из них можно условно назвать теоретическим, второй – эмпирическим.

В рамках теоретического подхода развиваются физически обоснованные модели переноса тепла в почве, целью построения которых является получение зависимостей коэффициентов тепло- и температуропроводности почвы от влажности «на кончике пера». В основе таких моделей обычно лежат представления автора о свойствах твердой фазы почвы, в том числе о геометрических характеристиках отдельных минеральных зерен, и о физических закономерностях взаимодействия почвенной влаги с твердой фазой почвы.

Среди исследователей, внесших наибольший вклад в развитие теоретического направления, в первую очередь можно упомянуть таких авторов, как Чудновский [9] и Д.А. де Фриз [12, 27]. Модель А.Ф. Чудновского работает только для сухой почвы и позволяет приближенно рассчитывать ее теплопроводность по данным о плотности, плотности твердой фазы и пористости. Модель де Фриза позволяет рассчитывать теплопроводность влажной почвы при любых значениях влагосодержания, но требует в качестве входных данных дополнительных сведений о минералогическом составе почвы и ряде других почвенных свойств [35, 22]. Подход де Фриза получил свое развитие во многих более поздних работах, в том числе в относительно недавних работах В.Р. Тарнавского [34, 35] и Лю с соавторами [31], предложившими новый способ расчета теплопроводности почвы по данным о плотности, влажности и содержании кварца. Г.С. Кем-

пбелл с соавторами [24] использовали модель де Фриза для оценки величины отклика теплопроводности почв на изменения их температуры; Дж. Эйтзингер с соавторами [28] успешно применили метод де Фриза при расчетах суточной динамики температуры почвы в период промерзания-протаивания. Тем не менее, в целом теоретический подход испытывает определенные трудности в своем развитии, что обусловлено сложностью и множественностью физических процессов, задействованных в переносе тепла в почвах, и трудностями формального количественного описания интенсивности протекания этих процессов.

Эмпирический подход к моделированию зависимости тепло- и температуропроводности почвы от влажности основан на формальной аппроксимации экспериментальных зависимостей с помощью тех или иных функциональных зависимостей с характерным набором параметров и последующем поиске регрессионных соотношений, позволяющих рассчитывать эти параметры по данным об основных свойствах почвы.

В англоязычной литературе первым шагом в эмпирико-статистическом направлении стала модель Керстена [30], основанная на использовании сведений о плотности почвы и плотности твердой фазы, и годная для предсказания теплопроводности почв лишь при высоких значениях влажности. С.О. Чанг и Р. Хортон [25], моделируя влияние мульчирования на потоки тепла и влаги в почве, предложили описывать зависимость теплопроводности почвы от влажности трехпараметрической моделью с эмпирическими коэффициентами, различными для «гипотетических» (выражение авторов модели) песка, супеси и глины. Г.С.Кэмпбелл [23] для описания зависимости теплопроводности почвы от влажности ввел пятипараметрическую функцию с достаточно сложно определяемыми параметрами. Тем не менее, А.Б. МакБратни и Б. Минасни [32] предлагают при расчетах теплопроводности почвы использовать именно модель Кемпбелла. Более простая модель Йохансена [29] основана на использовании данных о степени насыщения почвы влагой и минеральном составе почвы; модификация этой модели принадлежит Коте и Конраду [26]. Как и модель Керстена, модель Коте - Конрада недостаточно хорошо описывает теплопроводность почвы при малых значениях влажности [31].

Практически все существующие модели тепловых свойств почв были разработаны на основе анализа относительно небольших массивов экспериментальных данных, полученных для региональных почв. Так, модель де Фриза [12, 27] была разработана на основе данных М.С. Керстена [30] для некоторых песков, суглинков и по-

чвенных минералов Норвегии и Канады, модель Чанга и Хортон [25] – для суглинистых почв Калифорнии и песчаных почв Нью-Джерси, модель Лю с соавторами [31] – для суглинистых и песчаных почв Китая и Айовы. Для почв России и бывшего СССР были предложены модель Гупало [11] - для южного чернозема, модель Иконниковой [15] - для темно-каштановой почвы (пахотного слоя) и для обыкновенного чернозема; модель Чудновского [21] - для южного и обыкновенного чернозема, темно-каштановой почвы, серозема и дерново-глебоватой почвы, модель Павлова [18] - для промерзающих грунтов Сибири, модели Набиева-Гусейнова [16, 17] - для некоторых типов почв Азербайджанской ССР, модель Бровки-Ровдана [8] - для торфяных почв Белоруссии, модель Тихонравовой-Хитрова [20] - для слитоземов Центрального Предкавказья, модель Архангельской [3-5] - для комплексов агросерых почв перигляциальной области Русской равнины.

Среди опубликованных на русском языке работ выделяется статья А.П. Герайзаде [10], обобщившего свои и литературные данные для температуропроводности пахотного слоя различных типов почв и получившего регрессионную формулу, позволяющую рассчитывать максимальное для данной почвы значение температуропроводности по данным о содержании физической глины. При какой влажности почвы достигается рассчитанный максимум ее температуропроводности, модель Герайзаде оценить не позволяет.

Говоря о методах расчетной оценки тепловых свойств почвы, нельзя не упомянуть о работе Н.В. Серовой [19], поставившей вопрос о необходимости построения карт тепловых свойств почв для решения задачи по определению теплообмена в почве для больших территорий в рамках работ по изучению макропроцессов в атмосфере. Карты теплопроводности и объемной теплоемкости почв для европейской части СССР, построенные Серовой, основаны на учете механического состава, плотности и влажности почвы, и являются весьма приблизительными, но сама постановка вопроса о необходимости создания таких карт сохраняет свою актуальность по настоящее время.

Общим недостатком эмпирических моделей является проблематичность их применения за пределами регрессионной базы. Тем не менее, в качестве успешных примеров такого применения можно привести работы [1] и [6]. В первой из них для моделирования температурного режима водосбора сибирских рек использованы тепловые свойства почвы, рассчитанные по модели Павлова, настроенной по данным для промерзающих

грунтов Сибири [18]. Второй пример – моделирование структуры температурного поля в комплексе агросерых почв южного Подмосковья с использованием модели [3], настроенной по данным для почв Владимирского ополья [7]. Заметим, что в работах [1] и [6] эмпирические модели тепловых свойств региональных почв использованы для расчетов температуры генетически близких объектов. В общем же случае можно ожидать, что использование эмпирических зависимостей для расчетной оценки тепловых свойств почв, не входящих в регрессионную базу модели, будет приводить к значительным ошибкам.

Однако перечисленные выше частные зависимости для региональных почв часто 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 [32] предлагается для расчета теплоемкости почв использовать модель де Фриза, а для расчета теплопроводности – модель Кемпбелла. В температурном блоке широко известного свободно распространяемого программного продукта «HYDRUS-1D» [33], позволяющего рассчитывать динамику переноса влаги в почвах и грунтах, используются эти же модели, но добавлена возможность для расчета теплопроводности использовать модель Чанга и Хортон. При этом в описаниях программных продуктов область применимости использованных моделей не оговаривается, и не приводится даже примерный диапазон ошибок, которые могут получаться при проведении расчетов.

В связи с этим мы провели небольшое исследование, имевшее своей целью оценить возможность применения моделей де Фриза, Кемпбелла, Чанга и Хортон, Лю с соавторами для расчета теплопроводности российских почв, и сопоставить точность вычислений с использованием этих моделей с точностью расчетов по модели Архангельской.

Проверка моделей проводилась на данных, полученных для агросерых почв Владимирского ополья. Почвенный покров ополья представляет собой комплекс почв с мощным гумусово-аккумулятивным слоем, развитых в микропонижениях палеорельефа – в настоящее время это почвы со вторым гумусовым горизонтом (ВГГ), почв с высоким уровнем залегания карбонатов, развитых на палеомикрододелах, и почв с переходным строением профиля, сформированных в переходных позициях. Контрастность компонентов почвенной комбинации проявляется в значительной вариабельности их свойств, в том числе тепловых [7].

Используя данные об основных свойствах почв, рассчитывали теплоемкость (модель де Фриза), теплопроводность (модели Чанга-Хортон, Кемпбелла, Лю с соавторами) и теплопроводность почвы (сочетание моделей де Фриза и Чанга-Хортон, Кемпбелла, Лю) при различных значениях влажности. Расчетные величины теплопроводности сравнивали с величинами, полученными в лаборатории с использованием метода регулярного режима (всего 354 экспериментальные точки). Рассчитанные и экспериментально полученные зависимости теплопроводности от влажности для пахотного и минерального горизонтов показаны на рисунке

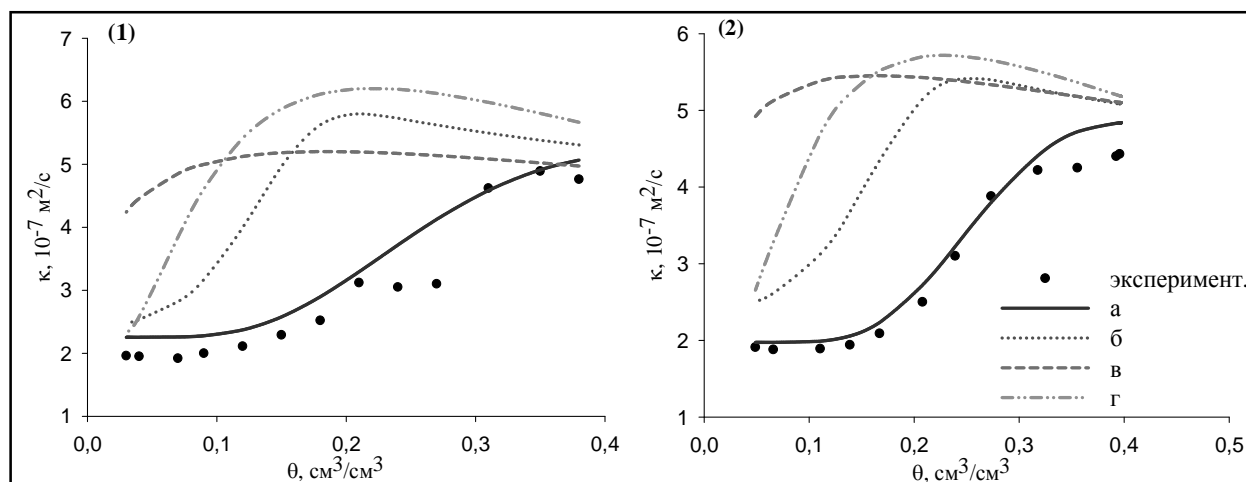


Рис. Зависимость теплопроводности (k) от влажности (θ) для горизонтов Апах (1) и В (2). Приведены экспериментальные данные [7] и результаты расчета с помощью моделей: а - Архангельской [3-5], б - Кемпбелла [23], в - Чанга и Хортон [25], г - Лю с соавторами [31].

Как видно на рисунке, схемы расчета с помощью моделей Кемпбелла и Лю с соавторами показывают удовлетворительные результаты для воздушно-сухой и насыщенной почвы, переоценивая экспериментальные результаты в остальном диапазоне влажности. Сочетание моделей Чанга-Хортон и де Фриза, использованное в «HYDRUS-1D», не описывает S-образную форму кривой зависимости температуропроводности от влажности для минеральных горизонтов. Для последней схемы расчета характерна значительная переоценка экспериментальных значений температуропроводности при всех значениях влажности, за исключением области насыщения.

В целом точность расчетов с помощью зарубежных моделей была неудовлетворительной. Среднеквадратичная величина расхождений между расчетными и экспериментальными значениями температуропроводности при расчетах по моделям Чанга-Хортон и де Фриза составляла 113,4%. При использовании вместо модели Чанга-Хортон моделей Кемпбелла и Лю с соавторами 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 относительные ошибки от 9% для почв ополья (использовались не вошедшие в базу регрессии данные) до 32% для агросерых почв южного Подмосковья и 25% для дерново-подзолистых почв [5]. Таким образом, настроенная по почвам Владимирского ополья модель дает в применении к почвам Русской равнины существенно более высокую точность расчетов, чем модели зарубежных авторов.

Приведенные результаты еще раз подтверждают, что применение полученных для региональных почв эмпирических зависимостей за пределами их регрессионной базы может приводить к возникновению весьма существенных погрешностей. Представляется, что анализ величины этих погрешностей должен быть необходимым этапом при работе с соответствующими моделями. Кроме того, полученные оценки говорят о предпочтительности использования региональных российских моделей, настроенных по почвам сходного генезиса, перед широко распространенными, но по сути узкорегиональными эмпирическими моделями зарубежных авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Мохов И.И., Хон В.Ч. Моделирование температурного и гидрологического режима водосбора сибирских рек в условиях вечной мерзлоты с использованием данных реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 86-93.
2. Архангельская Т.А. Закономерности пространственного распределения температуры почв в комплексном почвенном покрове (на примере агросерых почв центральной части Русской равнины). Дис... на соискание учен. ст. докт. биол. наук. М., 2008. 375 с.
3. Архангельская Т.А. Метод расчетной оценки температуропроводности почвы и его применение для выявления термически инертных зон в комплексном почвенном покрове // Ноосферные изменения в почвенном покрове. Владивосток, Изд-во Дальневост. ун., 2007. С. 432-435.
4. Архангельская Т.А. Новая эмпирическая формула для оценки коэффициента температуропроводности почвы // Материалы научной сессии по фундаментальному почвоведению М., 2004. С. 45-46.
5. Архангельская Т.А. Параметризация и математическое моделирование зависимости температуропроводности почвы от влажности // Почвоведение. 2009. № 2. С. 178-188.
6. Архангельская Т.А. Расчетный метод выявления структуры температурного поля в пахотных почвах палеокриогенных комплексов Русской равнины // Вестн. ОГУ. 2007. Окт. Вып. 75. Ч. 1. С. 28-32.
7. Архангельская Т.А. Температуропроводность серых лесных почв Владимирского ополья // Почвоведение. 2004. № 3. С. 332-342.
8. Бровка Г.П., Ровдан Е.Н. Теплопроводность торфяных почв // Почвоведение. 1999. № 5. С. 587-592.
9. Вершинин П.В., Мельникова М.К., Мичурин Б.Н. и др. Основы агрофизики. М.: Физматгиз, 1959. 903 с.
10. Герайзаде А.П. К вопросу о линейной зависимости коэффициента температуропроводности от механического состава почв // Почвоведение. 1974. № 10. С. 120-123.
11. Гупало А.И. Тепловые свойства почвы в зависимости от ее влажности и плотности // Почвоведение. 1959. № 4. С. 40-45.
12. Де Фриз Д.А. Тепловые свойства почв // Физика среды обитания растений. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. С. 191-214.
13. Дмитриев Е.А. К вопросу о некоторых факторах, определяющих удельную теплоемкость твердой фазы почв // Вест. МГУ. Сер. биол. 1958. № 4. С. 103-111.
14. Дмитриев Е.А. О некоторых закономерностях, определяющих величину и изменения удельной теплоемкости минеральной безводной части

- почв и горных пород // Вест. МГУ. Серия биол. 1959. № 3. С. 79-84.
15. *Иконникова Е.А.* Исследование влияния обработки почвы на ее тепловой режим. Л., 1965.
16. *Набиев Э.Ю., Гусейнов С.Б.* Зависимость теплопроводности почв от содержания физической глины и влажности // Почвоведение. 1990. № 8. С. 139-143.
17. *Набиев Э.Ю., Гусейнов С.Б.* О зависимости коэффициента теплопроводности почв от содержания физической глины // Почвоведение. 1990. № 10. С. 149-151.
18. *Павлов А.В.* Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 284 с.
19. *Серова Н.В.* Распределение теплофизических характеристик почв по европейской территории СССР // ГГО. 1969. Вып. 241. С. 95-107.
20. *Тихонравова П.И., Хитров Н.Б.* Оценка теплопроводности слитоземов Центрального Предкавказья // Почвоведение. 2003. № 3. С. 342-351.
21. *Чудновский А.Ф.* Теплофизика почв. М.: Наука, 1976. 352 с.
22. *Bachmann J., Horton R., Ren T., van der Ploeg R.R.* Comparison of the thermal properties of four wettable and four water-repellent soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 2001. V. 65. P. 1675-1679.
23. *Campbell, G.S.* Soil physics with BASIC: Transport models for soil-plant systems. Elsevier, 1985.
24. *Campbell G.S., Jungbauer J.D., Bidlake W.R., Hungerford R.D.* Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity // Soil Sci. 1994. V. 158. P. 307-313.
25. *Chung, S.-O., and R. Horton* (1987), Soil Heat and Water Flow With a Partial Surface Mulch // Water Resour. Res., 1987. V. 23, № 12. P. 2175-2186.
26. *Cate J., Konrad J.-M.* A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials // Can. Geotech. J. 2005. V. 42. P. 443-458.
27. *De Vries D.A.* Thermal properties of soils // Van Wijk W.R. (ed.) Physics of plant environment. Amsterdam: North Holland Publishing Company. 1963. P. 210-235.
28. *Eitzinger J., Parton, W.J., Hartman M.* Improvement and validation of a daily soil temperature submodel for freezing/thawing periods // Soil Science. July 2000. V. 165(7). P. 525-534.
29. *Johansen O.* Thermal conductivity of soils. Ph.D. diss. Norwegian Univ. of Science and Technol., Trondheim. 1975. (CRREL draft transl. 637, 1977).
30. *Kersten M.S.* Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils // ACFEL Tech. Rep. 23. Univ. of Minnesota. Minneapolis, 1949.
31. *Lu S., Ren T., Gong Y. Horton R.* An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature // Soil Sci. Soc. Am. J. 2007. V. 71. P. 8-14
32. *McBratney A.B., Minasny B.* Soil inference systems // Pachepsky Ya., Rawls W.J. (Eds) Development of pedotransfer functions in soil hydrology. Elsevier, 2004. P. 323-348.
33. *Tarnawski V.R., Gori F.* Enhancement of the cubic cell thermal conductivity model // Intern. J. Energy Res. 2002. V. 26 P. 143-157.
34. *Tarnawski V.R., Wagner B.* A new computerized approach to estimating the thermal properties of unfrozen soils // Can. Geotech. J. 1992. V. 29. P. 714-720.

CONVENTIONAL APPROACHES TO ESTIMATING THERMAL PROPERTIES OF SOILS

© 2009 Т.А. Arkhangelskaya, K.I. Lukyashenko

Moscow State University, Faculty of Soil Science, Moscow;
e-mail: arhangelskaia@rambler.ru, Lou86@yandex.ru

The article provides an overview of mathematical models to compute the thermal properties of soils on their basic properties. The calculated values of thermal diffusivity of agrogray soils derived from using a number of models are compared with experimental data.

Key words: soil, thermal diffusivity of soils, mathematical models.

ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МИНИМАЛЬНОЙ БИОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ НА ПРОГНОЗ БИОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ

© 2009 С.И. Барцев, А.Г. Дегерменджи, Ю.Д. Иванова, А.Л. Щемель

Институт биофизики СО РАН, Красноярск; e-mail: bartsev@yandex.ru, ibp@ibp.ru, lulja@yandex.ru, andong.china@gmail.com

Принципиально неустранимая погрешность в оценке параметров любой биосферной математической модели приводит к вероятностному характеру сценариев, получаемых с ее помощью. Для принятия направленных на биосферу практических решений необходимо знать доверительные интервалы прогноза с беспрецедентным уровнем значимости. Принцип наихудшего сценария направлен сразу на поиск сочетаний параметров модели приводящих к наихудшим, но возможным сценариям развития биосферы. В данной работе рассматривается влияние варьирования (а по сути, погрешности оценок) параметров минимальной биосферной модели на ее динамику. Показано, что способность лесов накапливать углерод в биомассе, приводящая к снижению величины глобального потепления сегодня, повышает риск запуска необратимых катастрофических изменений в будущем.

Ключевые слова: *минимальные биосферные модели, устойчивость биосферы*

ВВЕДЕНИЕ

Экстраполяция наблюдаемых трендов глобальных параметров в будущее указывает на возможность существенных изменений параметров биосферы и климата Земли [8]. Становится все более очевидным, что оценка темпов, масштабов и степени обратимости этих изменений перестала быть чисто академической задачей, а перешла в разряд одной из наиболее важных практических задач.

Важно отметить, что любые вычисленные сценарии биосферной динамики могут быть только вероятностными. Причина заключается в том, что оценки почти всех параметров биосферы и климата имеют приближенный характер. Так, например, оценки количества углерода в атмосфере варьируют от 600 до 760 Гт; в биомассе - от 500 до 850 Гт; в почве - от 1080 до 2000 Гт, первичная продукция фотосинтеза варьирует в диапазоне 110-120 ГтС/год [2, 3, 6, 7]. Наиболее вероятное значение одного из важнейших параметров системы «биосфера-климат» - чувствительности климата, равному повышению глобальной температуры при удвоении атмосферной концентрации CO₂ равно 4,5°C [8], однако по некоторым оценкам этот параметр может достигать 11°C [11].

Обычно модели климата и биосферы направлены на вычисление наиболее вероятного сценария. Это заставляет разработчиков таких моделей учитывать максимально возможное количество факторов и строить большие распределенные модели климата и биосферы. Однако представляется необходимым подчеркнуть, что зна-

ние наиболее вероятного сценария развития биосферы мало что дает для принятия практических решений, поскольку необходимо еще знать доверительные интервалы для всех возможных траекторий, причем с беспрецедентным уровнем статистической надежности (значимости).

Так, например, грубые оценки показывают, что вероятность авиакатастрофы не превышает 10⁻⁴. «Цена» катастрофы примерно 100 человек. При этом люди соглашаются летать. Принимая равноценность жизни любого человека и вводя принцип обратной пропорциональности допустимого риска от числа подверженных риску, можно составить простую пропорцию для вычисления уровня надежности оценок биосферной катастрофы, которая для человечества не должна превышать 10⁻¹¹ за обозримое время его существования.

Из этих грубых оценок ясно, что для практических нужд требуется не вычисление наиболее вероятного сценария, а оценка условий и параметров, при которых, пусть и с малой вероятностью, но осуществляется наихудший сценарий. Такой сценарий возможен, когда реальные значения параметров модели будут находиться на неблагоприятных для нас концах доверительных интервалов, а вклад потенциально присутствующих компенсаторных механизмов равен минимальному из возможного.

Такое видоизменение конечной цели биосферного моделирования было ранее сформулировано в виде «принципа наихудшего сценария» [5]. Принцип наихудшего сценария заключается в выборе и изучении только тех процессов, которые могут максимально быстро привести к не-

гательным изменениям биосферы, и взвешенном игнорировании возможных компенсаторных механизмов.

Большинство математических моделей климата демонстрируют плавную динамику изменений атмосферного CO₂ и приземных температур с увеличением общего количества углерода в атмосфере вследствие сжигания ископаемых топлив [4, 8]. Однако постепенное глобальное изменение - это только возможный вариант будущего, и к тому же достаточно оптимистичный, поскольку в этом случае теоретически возможно ослабить негативные изменения путем уменьшения антропогенного воздействия и даже вернуться к начальному состоянию.

Наихудшим сценарием, является катастрофический пороговый вариант глобальных изменений, когда до определенного порога постепенные изменения являются обратимыми, но при превышении этого порога в системе «биосфера-климат» запускаются лавиноподобные и необратимые изменения глобальных параметров. В данной статье термин «катастрофический» по значению соответствует скорее термину, принятому в теории катастроф, чем обыденному значению, когда любой серьезный природный катаклизм вос-

принимается как катастрофа.

Вследствие вышеизложенного наибольшее практическое значение имеет знание наиболее неблагоприятного, но возможного при данных доверительных интервалах сценария. Однако из-за существенной нелинейности модели наихудшее сочетание параметров модели может оказаться контринтуитивным. Поэтому целью данной работы был прямой расчет и визуализация сценариев развития биосферы при различных сочетаниях параметров и выбор из них наихудшего сценария.

МИНИМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ БИОСФЕРЫ С УЧЕТОМ ВКЛАДА ОКЕАНА

Для целей данной работы обобщенная (включающая сушу и океан) минимальная модель биосферы подверглась упрощению по сравнению с вариантом, опубликованным ранее [5]. Из рассмотрения был исключен блок океанической биоты, вкладом которой в развитие катастрофического биосферного режима, как показали модельные эксперименты, можно пренебречь.

Система уравнений модели имеет следующий вид:

$$\frac{dA}{dt} = S(y, T(A)) + C_{a_up} BM_{out}(A) - P(x, A, T(A)) - C_{a_down} AM_{in}(A) + fuel(t) \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = P(x, A, T(A)) - D(x) \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dt} = D(x) - S(y, T(A)) \quad (3)$$

$$\frac{dB}{dt} = [C_{a_down} AM_{in}(A) + C_{d_up} U] - [C_{f_down} B + C_{a_up} BM_{out}(A)] \quad (4)$$

$$\frac{dU}{dt} = C_{f_down} B - C_{d_up} U \quad (5)$$

Первое уравнение описывает изменения количества углерода в земной атмосфере, второе – изменения количества углерода в биомассе живых растений, третье – динамику органических остатков, четвертое – динамику углерода в фотическом слое океана, пятое – динамику углерода в глубинных слоях океана.

$$P(x, A, T) = V_p \cdot x \cdot (x_{max} - x) \cdot V(A) \cdot f_p(T(A)), \quad (6)$$

где x – количество углерода в биомассе растительного компартмента (ГтС); A – атмосферный углерод (ГтС); T – среднегодовая глобальная приповерхностная температура; V_p – масштабный фактор (1/(ГтС/год)); x_{max} – предельное количество биомассы, зависящее от предельной допустимой плотности растительного покрытия (ГтС) и задается в модели как $x_0 G$, где x_0 – количество наземной биомассы растений в настоящее время, G – коэффициент, характеризующий

Ограничения места заставляют нас отсылать читателя, интересующегося предположениями, принятыми при построении модели, к более ранним публикациям [1, 5]. Здесь только будут описан вид функций, использованных в уравнениях.

Функция скорости роста растительной биомассы (ГтС/год) имеет вид

возможность растений увеличить количество биомассы.

Функция $V(A)$ описывает рост биомассы по отношению к атмосферной концентрации CO₂ в виде хорошо известной функции Моно.

$$V(A) = \frac{A}{K_A + A} \quad (7)$$

Уравнение Моно обычно включает концентрации, но поскольку объем реакционного про-

странства (атмосфера) остается неизменной, модель использует общее количество атмосферного углерода как единицы, чтобы упростить подстройку данных. Параметр K_A выбран равным 900 ГтС на основе экспериментальных данных [9, 10].

Эмпирическая зависимость скорости роста растительной биомассы от температуры T и максимальной температуры T_{max} имеет следующий вид:

$$f(T, T_{max}) = T^d (T_{max} - T), \text{ где } d = 1.5, \text{ и } 0 \leq T \leq T_{max}. \quad (8)$$

Эмпирическая зависимость роста среднегодовой глобально приповерхностной температуры от концентрации CO_2 была взята из опубликованных данных:

$$T(A) = T_o + T_{del} \cdot \log_2 \left(\frac{A}{A_0} \right). \quad (9)$$

где A – текущее количество углерода в атмосфере; A_0 – количество углерода в атмосфере в момент измерения среднегодовой приповерхностной температуры T_o , которая равна $15.5^\circ C$ в настоящее время; T_{del} – чувствительность климата.

Скорость отмирания биомассы (ГтС/год) записывается в простом виде:

$$D(x) = V_d \cdot x \quad (10)$$

где V_d – масштабный фактор; x – количество углерода (Гт) в биомассе.

Скорость почвенного дыхания (разложение мертвой органики) и выделения CO_2 в атмосферу описывается следующей функцией:

$$S(y, T) = V_s \cdot y \cdot f_M(T) \quad (11)$$

где V_s – масштабный фактор; y – количество углерода в мертвой биомассе (Гт); $f_M(T)$ – функция типа (8) выражающая температурную зависимость почвенного дыхания, но при больших значениях максимальной температуры.

В соответствии с задачей данной работы в качестве функции $fuel(t)$ выбрана линейная зависимость, соответствующая сценарию A2 выброса парниковых газов [8] с соответствующими значениями параметров.

В уравнениях (1) и (4) слагаемое $C_{a_down} AM_{in}(A)$ описывает поглощение углекислого газа поверхностным слоем океана, а слагаемое $C_{a_up} BM_{out}(A)$ – эмиссию углекислого газа с поверхности океана в атмосферу. Переменные коэффициенты $M_{in}(A) = e^{-0.03[T(A)-T_0]}$ и $M_{out}(A) = e^{0.03[T(A)-T_0]}$ описывают физическое явление - падение растворимости газа в жидкости при повышении температуры. Эти коэффициенты получены путем простой эмпирической

аппроксимации данных по концентрации CO_2 в воде при различной температуре [2].

В уравнении (5) слагаемое $C_{d_up} U$ описывает апвеллинг, а $C_{f_down} B$ – даунвеллинг.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для удобства визуализации влияния вариации (ошибок оценок) параметров биосферной модели на ее динамику на рисунках показаны семейства траекторий при одновременном изменении уже обсуждаемых выше параметров модели T_{del} и G .

На рис. 1 можно видеть, что траектории динамики биомассы (как и не приведенные в статье траектории других существенных переменных) группируются в своеобразные пучки, соответствующие конкретному значению T_{del} , причем чем больше это значение, тем ближе нисходящий участок пучка к началу координат. Внутри пучка разные ветви соответствуют разным значениям G , причем на нисходящем участке ветвь, соответствующая большему значению, располагается ближе к началу координат. Важно отметить, что на восходящем участке всех траекторий большее значение G соответствует более благоприятному ходу биосферной динамики, а именно растет биомасса, что приводит к меньшей концентрации CO_2 в атмосфере, а значит и меньшему потеплению климата. Но на нисходящих участках траекторий именно большие значения G оказываются более неблагоприятными, поскольку соответствуют большей скорости гибели биоты.

Рисунки 2 и 3 демонстрируют пороговый характер катастрофического процесса. Видно, что при значениях $T_{del} < 6^\circ C$ существенных изменений в динамике биосферы нет, если эмиссия углерода полностью прекращается спустя 60 лет от настоящего времени. В противном случае, можно видеть существенную деградацию биоты, причем, чем больше параметр G , тем тяжелее изменения в биоте. Вариации параметра G могут приводить к качественному изменению динамики температуры в системе «биосфера-климат». На рис. 3 видно, что при больших значениях G ($T_{del} = 6^\circ C$) возникают участки «само-разогрева» системы «биосфера-климат», когда эмиссия парниковых газов полностью прекращена.

ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам моделирования, способность растений (преимущественно древесных) поглощать двуокись углерода и, как кажется, ослаблять остроту проблемы избыточного антропогенного производства CO_2 (Киотский протокол)

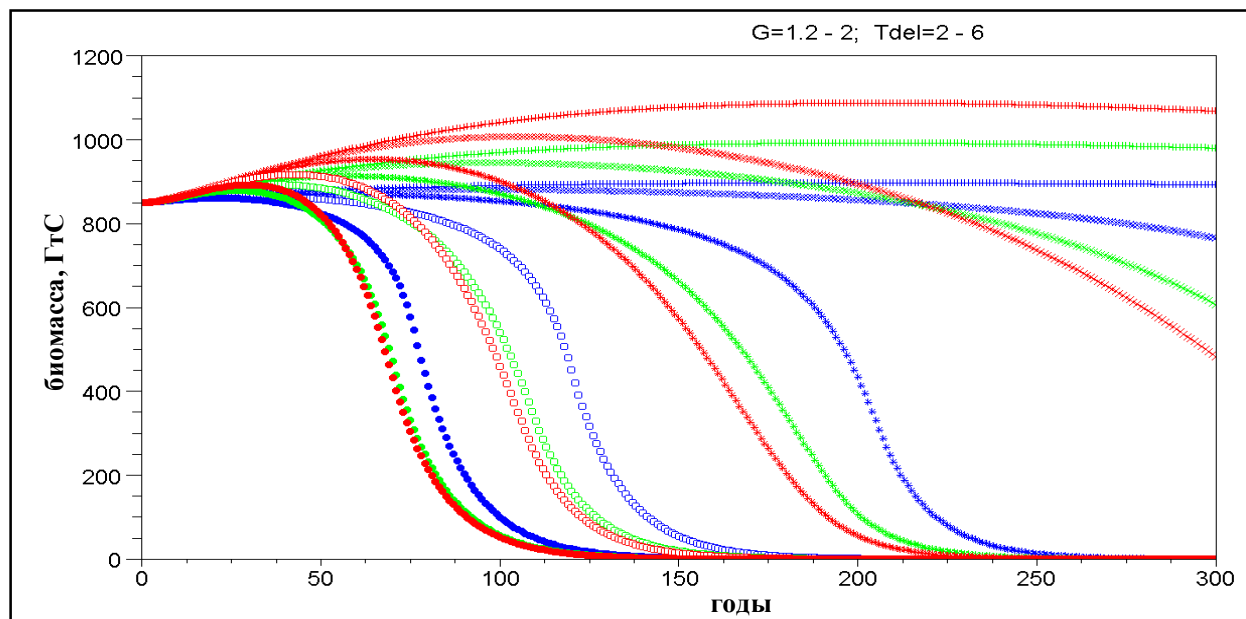


Рис. 1. Ансамбль траекторий количества углерода в биомассе в обобщенной (суша-океан) модели при различных значениях T_{del} и G и линейном росте темпов сжигания углеродсодержащих топлив (сценарий A2 по IPCC)

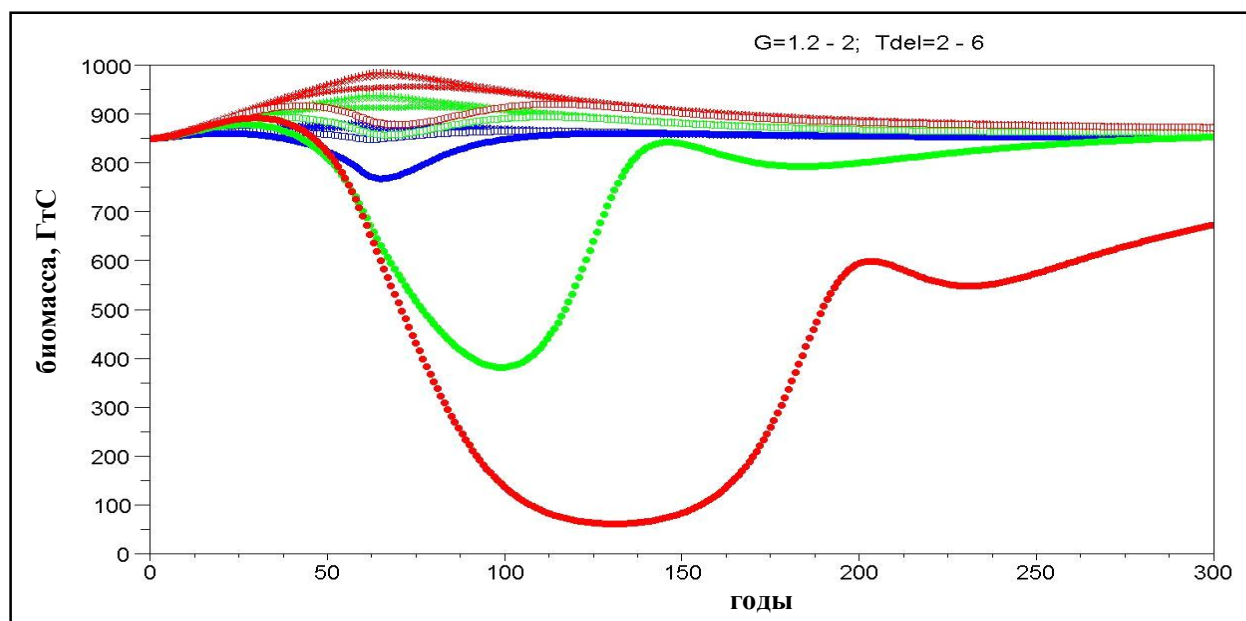


Рис. 2. Ансамбль траекторий количества углерода в биомассе обобщенной (суша-океан) модели в случае полного прекращения сжигания топлив через 60 лет от настоящего времени при различных значениях T_{del} и G

с точки зрения развития катастрофических процессов не является столь однозначной. Так, при относительно малой длительности (дозе) антропогенных выбросов большая поглотительная способность растений действительно приводит к меньшему потеплению и играет компенсирующую роль. Однако если рост CO_2 в атмосфере продолжается, то углерод, накопленный в растениях и перешедший потом в мертвую органику начинает все с большей скоростью, по мере рос-

та температуры, выходить в атмосферу. Причем океан уже не успевает компенсировать такой поток углерода, кроме того с ростом температуры поглотительная способность океана уменьшается.

Кроме того, вследствие наличия нелинейностей компонентов биосферной модели и инерционности океана (вернее системы «фотический слой – глубинные слои») после прекращения антропогенного воздействия возможно падение ко-

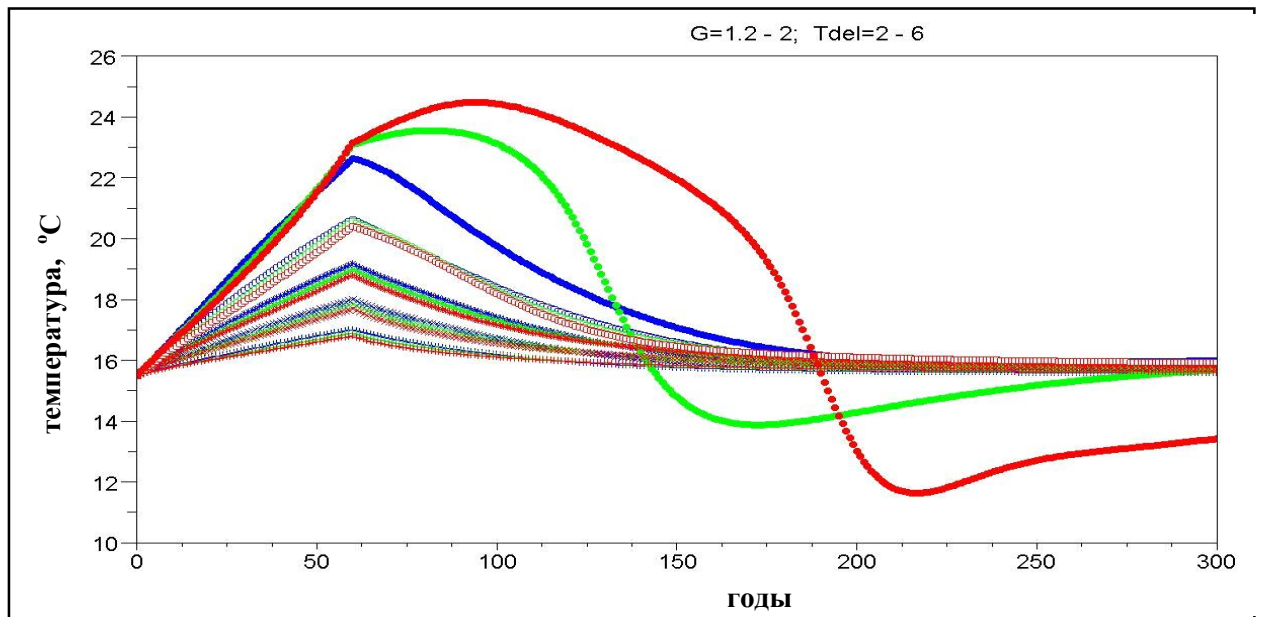


Рис. 3. Ансамбль траекторий глобальной приповерхностной среднегодовой температуры в обобщенной (суша-океан) модели в случае полного прекращения сжигания топлив через 60 лет от настоящего времени при различных значениях T_{del} и G

личества углерода в атмосфере, а значит, и температуры до значений меньших, чем это было перед началом катастрофического процесса. То есть, глобальное потепление, вызванное антропогенными выбросами двуокси углерода, может смениться глобальным похолоданием, если эмиссия углерода прекратится слишком резко.

Следует сказать о результатах, полученных в модели, но не представленных на рисунках. Вариации количества углерода в мертвой органике наиболее существенно проявляют себя при ограниченных длительностях эмиссии углерода в атмосферу. Временной порог запуска катастрофических процессов (дата необратимости) практически не зависит от количества углерода в органике, но тяжесть (максимальная температура, степень разрушения биоты) возрастают с ростом количества углерода. Вариация (ошибка оценки) количества углерода в биомассе приводит к незначительному изменению тяжести изменений, но оказывает влияние на длительность переходных процессов, которая уменьшается с уменьшением углерода в биомассе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Ерохин Д.В. Глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере // 2005. Т.401. № 2. С. 233-237.
2. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. М.: Физматлит, 2004. 336 с.
3. Семёнов С.М. Парниковые газы и современный климат земли. М.: ИЦ «Метеорология и гидрология», 2004. 176 с.
4. Тарко А.А. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов, М.: Физматлит, 2005. 232 с.
5. Bartsev S.I., Degermendzhi A.G., Erokhin D.V. Principle of the worst scenario in the modelling past and future of biosphere dynamics // Ecological modeling. 2008. P. 160-171.
6. Brovkin V., Sitch S., Bloh von W. et al. Role of land cover changes for atmospheric CO₂ increase and climate change during the last 150 years // Glob. Change Biol. 2004. V. 10. P. 1253-1266.
7. IPCC, 2001. Climate Change. 2001: Scientific aspects, UNEP, 881 P. www.ipcc.ch
8. IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p. www.ipcc.ch
9. Morgan J.A., LeCain D.R., Mosier A.R., Milchunas D.G. Elevated CO₂ enhances water relations and productivity and affects gas exchange in C3 and C4 grasses of the Colorado shortgrass steppe // Global Change Biol. 2001. V. 7. P. 451-466.
10. Pritchard S.G., Davis M.A., Mitchell R.J. et al. Root dynamics in an artificially constructed regenerating longleaf pine ecosystem are affected by atmospheric CO₂ enrichment // Environmental and Experimental Botany. 2001. V. 46. P. 35-69.
11. Stainforth, D.A., Aina, T., Christensen, C. et al. 2005. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases // Nature. 2005. № 433, P. 403-406.

INFLUENCE OF EVALUATION UNCERTAINTY OF MINIMAL BIOSHERE MODEL PARAMETERS ON FORECAST OF BIOSPHERE DYNAMICS

© 2009 S.I. Bartsev, A.G. Degermendzhi, Y.D. Ivanova, A.L. Shemel

Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk;
e-mail: bartsev@yandex.ru, ibp@ibp.ru, lulja@yandex.ru, andong.china@gmail.com

The result of principal irremovable inaccuracy of evaluations of parameters of any biosphere mathematical model is probabilistic nature of scenario obtained by it. To make the practical decisions concerning biosphere it is necessary to know credence intervals of unprecedented level of significance. Principle of the worst scenario is immediately directed to the searching for parameter combinations causing the worst but possible scenarios of biosphere dynamics. The influence of variation (essentially, uncertainty of evaluations) of minimal biosphere model parameters on its dynamics is considered. It is shown the ability of forests to accumulate carbon in biomass causing some decreasing of global warming now increases the risk of starting irreversible catastrophic changes in future.

Key words: minimal biosphere models, stability of biosphere

ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОТНОШЕНИЙ МУРАВЬЕВ И РАСТЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РЕШЕТЧАТОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

© 2009 В.В. Бессонов, Г.Е. Рубашко

Институт математических проблем биологии РАН, Московская область, г. Пущино;
e-mail: bvv-70@mail.ru, grubashko@rambler.ru

Разработана решетчатая имитационная модель для исследования взаимодействия популяций растений и муравьев. С помощью модели проанализирована возможность освоения травянистыми многолетними растениями муравейников двух видов (*Lasius niger* L. и *Formica rufa* L.) в зависимости от активности муравьев и с учетом распространения семян муравьями. Проведено сравнение процессов зарастания муравейников исследованных видов звездчаткой ланцетолистной (*Stellaria holostea* L.) и зеленчуком желтым (*Galeobdolon luteum* Huds.).

Ключевые слова: *решетчатая модель, взаимодействие травянистых растений и муравьев.*

ВВЕДЕНИЕ

Сообщества муравьев являются одним из важнейших компонентов биогеоценозов. Их вклад в изменение видового состава растительных сообществ определяется влиянием на физико-химические свойства почвы в процессе гнездостроения, нарушением напочвенного покрова, осуществлением различных этапов семенной инвазии биотопа, участием в динамических процессах растительности в пределах своих кормовых участков. Существует ряд работ [1 - 3], посвященных выявлению особенностей территориального размещения трав вблизи муравейников. Однако, исследование взаимодействия муравьев и растений по-прежнему остается 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 [4].

Для изучения взаимоотношений муравьев и растений мы разработали и исследовали решетчатую имитационную модель на основе представлений о клеточных автоматах для вегетивно-подвижных растений [5 - 8]. Для разработки модели использовался авторский полевой материал 1996 - 2007 гг. и литературные данные. Моделировался процесс зарастания муравейников двух видов - черного садового муравья (*Lasius niger* L.) и рыжего лесного муравья (*Formica rufa* L.) - звездчаткой ланцетолистной (*Stellaria holostea* L.) и зеленчуком желтым (*Galeobdolon luteum* Huds.).

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве модельных растений были выбраны звездчатка ланцетолистная из семейства

гвоздичных и зеленчук желтый из семейства губоцветных - длительновегетирующие растения. В лесных биоценозах ими чаще всего зарастают муравейники исследуемых нами видов муравьев.

Galeobdolon luteum - многолетнее травянистое растение с длинными укореняющимися в узлах лежащими побегами и прямостоячими цветущими стеблями до 30 см высотой. Стебли, разрастаясь, со временем образуют сплошной ковер. Скорость разрастания особей - 50-100 см/в год. Новые вегетативные побеги развиваются не только весной, но и летом [9]. Элементом популяции является парциальный куст, который существует 3-5 лет [10]. Длина вегетативного побега достигает 80 см.

Stellaria holostea - мезофит, встречающийся в лиственных, хвойных и хвойно-широколиственных лесах. Как кистекорневой многолетник с ползучим ветвистым корневищем, *St. holostea* отличается высокой вегетативной подвижностью. Вследствие большой скорости и длительности роста надземных плетей и «подстилочных» горизонтальных побегов (столонов) ее генеративные особи быстро захватывают территорию: длина stolона *St. holostea* составляет 40-70 см [11], что позволяет ей продвигаться на 100 см и более в течение года. Проростки семян появляются в середине - конце мая, еще до начала плодоношения, но возможно прорастание семян и сразу после рассеивания, в тот же вегетационный период. Смертность проростков под покровом материнского растения очень высока, поэтому, несмотря на большое число рассеиваемых диаспор, всходы *St. holostea* в лесу встречаются редко, причем исключительно на лишенных растений участках вследствие низкой конкурентной способности проростков [9]. При таких условиях муравейники, являясь зоогенными нару-

шениями напочвенного покрова с низкой сомкнутостью трав, для звездчатки становятся наиболее привлекательными.

Исследуемые нами виды муравьев - черный садовый (*L. niger*) и рыжий лесной (*F. rufa*) - по способу питания не являются карпофагами, однако, доля семян в их питании, составляет 0,2% [12]. В основном они собирают специализированные мирмекохорные диаспоры, снабженные приманкой для муравьев - элайосомом [13, 14]. Зеленчук желтый является мирмекохором и переносится муравьями *F. rufa* на расстояние до 70 м и муравьями *L. niger* до 10 м (личные наблюдения). 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.

В модели мы рассматривали только активные жизнеспособные муравейники, возрастом более 3-4 лет, с диаметром насыпного купола от 100 см и более, с числом кормовых дорог от 4 до 12. Такие муравейники обладают наибольшими потенциальными возможностями, как для дальнейшего роста и развития, так и для выделения дочерних отводков - способу деления гнезда при котором особи (рабочие, самка и молодь), принадлежащие одной структурной единице гнезда - колонне, уходят, образуя новое гнездо. Средний ежегодный прирост численности активного жизнеспособного муравейника равен 20%. Вокруг

него существует кольцевая зона шириной до 1,5 м, часто лишенная растительности [12, 15] - выстригаемая территория. Для рассмотренных видов была подсчитана средняя скорость переноса семян - количество семян приносимых муравьями за единицу времени по фуражировочной дороге в муравейник.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основе полевых наблюдений и литературных данных разработана решетчатая имитационная модель для исследования взаимодействия популяций травянистых растений и муравьев. Использован метод имитационного моделирования на основе представлений о клеточных автоматах. Модельное представление вида *S. holostea* основано на работах Комарова А.С. и Михайловой Н.В. с соавторами [5-8].

Расчетная площадка представлялась в виде плоской квадратной решетки, размер ячейки которой индивидуален для каждого вида. Считаем, что *St. holostea* L. и *Galeobdolon luteum* Huds. осуществляют вегетативный захват территории только посредством вегетативных побегов. На каждом вегетативном побеге имеются почки, из которых возможно прорастание нового отбega. При появлении препятствия на пути вегетативного отбega он прекращает свой рост. Длина вегетативного побега, вероятность прорастания почки и другие параметры моделируемых растений приведены в таблице..

Таблица 1. Параметры растений, используемые в модели

Параметры	<i>Stellaria holostea</i>	<i>Galeobdolon luteum</i>
Размер ячейки, см	4,2	5,5
Длина вегетативного побега, м/год	0,42	0,77
Число вегетативных зачатков на вегетативный побег, шт	10	7
Вероятность прорастания почки вегетативного побега в первый год жизни, %	0	20
Вероятность прорастания почки вегетативного побега в течение жизни, %	40	40
Длительность жизни, годы	2	5

При формализации наблюдаемых явлений возникла необходимость описания активности муравейника, его силы. Понятие силы муравейника абстрактно, включает в себя не только численность муравьиной семьи, но и ее состояние. Хотя для простоты понимания вопроса можно ассоциировать ее с численностью муравьиной семьи, которая является важным показателем мощности и жизнедеятельности муравейника. Численность семьи определяет возможности муравьев поддерживать оптимальные условия внутри муравейника, защитные способности, количество колонн, численность особей в колоннах, интенсив-

ность движения на дорогах и величину кормового участка. В рассматриваемом случае сила муравейника C_i , описываемая формулой (1), безразмерная величина. За единицу силы муравейника принята сила одной гипотетической колонны муравьев, придерживающейся определенного сектора гнезда, имеющей свою группировку самок, обслуживающей отдельные кормовые дороги. Усиление одной из колонн семьи ведет к увеличению размеров гнезда и к отделению колонны – отводка от материнского муравейника в пределах одной колонии (процесс сходный с роением медоносных пчел). Следовательно, сила,

забираемая уходящим отводком, C_k также равна единице.

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 отводком, $P_k = 0,5$ - вероятность появления отводка, $C_m = 2$ - сила муравейника, при которой возможно появление нового отводка.

По литературным данным через 3-4 благоприятных года после своего появления муравейник может образовывать отводок [15, 16]. Так как средний ежегодный прирост численности активной жизнеспособной муравьиной семьи составляет 20%, то значение коэффициента развития k_c было принято 1,2. С такой скоростью прироста муравейник при благоприятных условиях к 5 году жизни в нашей модели достигает силы более двух единиц ($C_5 = 2,0736$). Таким образом, принимаем в качестве условия появления отводка достижение муравейником силы в две единицы ($C_m = 2$).

Купол муравейника располагался в центре расчетной площадки. Для удобства сравнения диаметр купола был принят 1 м для обоих видов, поскольку этот размерный класс характерен для активных жизнеспособных муравейников. Вследствие активности муравьев возрастает вероятность гибели растений на муравейнике по сравнению с фоном. Эта вероятность зависит от силы муравьиной семьи. Способность муравьев освобождать купол муравейника от определенного вида растений характеризуется коэффициентом гибели растений $k_{deahthill0}$ на муравейнике при $C_i = 1$. При изменении состояния муравейника также меняется коэффициент гибели растений:

$$k_{deahthilli} = k_{deahthill0} C_i.$$

Отрицательное влияние муравьев на растения для вида *F. rufa* выходит за пределы купола. В данной модели принято, что трансформирующая деятельность на муравейнике постоянна на всей площади холма, а за пределами холма влияние муравьев на растения уменьшается по экспоненте, и на границе выстригаемой территории обнуляется. Ширина кольца выстригаемой территории 1 м.

Считаем, что семена собираются муравьями со всего участка в муравейник. По пути часть семян теряется, половина принесенных семян

выносятся и оставляются рядом с муравейником на расстоянии до 0,5 м. Муравьи задают некую направленность распространению растений, а именно: они теряют семена от массива звездчатки по направлению к центру муравейника. У потерянных и вынесенных из муравейника семян, зачастую уже повреждены семенные зачатки. Кроме того, муравьями часто собираются незрелые семена, и доля всхожих семян очень мала. Потери семян по нашим наблюдениям и литературным данным составляют 20% от общего количества перенесенных семян [13]. В модели сделано допущение, что из этих семян всходит на следующий год 3%.

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 $k_{deahthill0}$ изменяли от 0,4 до 1,0, учитывался сбор семян муравьями.

При коэффициенте смертности растений на куполе $k_{deahthill0} = 0,6$ единичные особи прорастают (рисунок). Несмотря на отсутствие выстригаемой территории у муравейника *L. niger*, характер освоения растениями муравейника при тех же значениях $k_{deahthill0}$ качественно повторяет картину, наблюдаемую для *F. rufa*. При коэффициенте смертности растений на куполе $k_{deahthill0} > 0,6$ 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 $k_{deahthill0} < 0,6$ 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полевых наблюдений и литературных данных разработана решетчатая имитационная модель для исследования взаимодействия популяций травянистых растений и муравьев.

Таким образом, 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

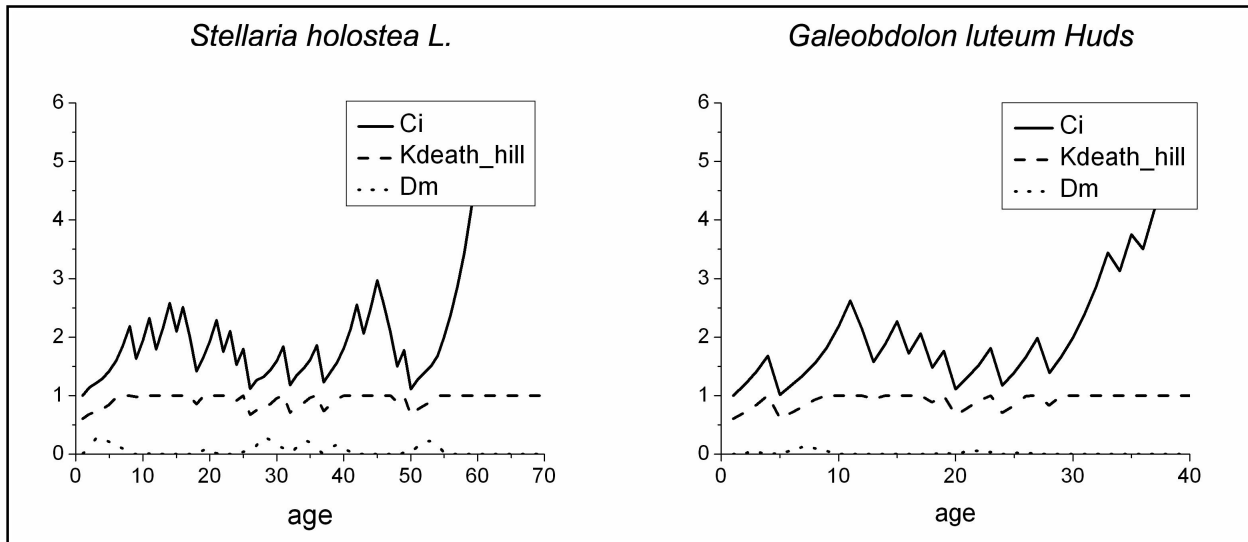


Рис. Развитие муравейников *F. rufa* при $k_{deathhill0} = 0,6$. По оси ординат отложены безразмерные величины: C_i - сила муравейника на i -м шаге; $K_{deathhill}$ - коэффициент смертности растений на куполе на i -м шаге; D_m - доля муравьиного холма, захваченного растениями на i -м шаге

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 $k_{deathhill0} < 0,6$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малоземова Л.А. Связь муравьев с растениями. М., 1985. 17 с. Деп. в ВИНТИ 8.07.85, № 4922 - В 85.
2. Бугрова Н.М., Пишеницына Л.Б. Трансформация пространственной структуры травяного покрова вокруг гнезд *Formica aquilonia* // Успехи совр. биол. 2003. № 3. С. 273-277.
3. Зрянин В.А., Новоселова Н.А., Петрушова Е.С. Анализ растительных группировок вокруг муравейников рыжих лесных муравьев (Hymenoptera, Formicidae). // Поволжский экол. журн. 2004. № 1. С. 48-57.
4. Захаров А.А. Реальные и мнимые проблемы использования муравьев в биологической защите леса // «Муравьи и защита леса»: Материалы XII Всерос. мирмекологического симпозиума. Новосибирск, 2005. С. 224-229.
5. Комаров А.С., Паленова М.М. Моделирование взаимодействующих популяций вегетативно-подвижных трав // Бюл. МОИП. Отд. биол. 2001. Т. 106, № 5. С. 35-41.
6. Комаров А.С. Клеточно-автоматные модели сообществ вегетативно-подвижных растений, учитывающие поливариантность онтогенеза // Материалы X междунар. конфер. «Математика, компьютер, образование». Ижевск, 2003. Вып. 10. Ч. 3 С. 112-124.
7. Михайлова Н.В., Богданова Н.Е., Михайлов А.В. Скорость освоения территории неморальными видами трав (модельный подход) // Бюл. МОИП. Отд. биол. 2006. Т. 111, вып. 1. С. 37-44.
8. 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 // Бюл. МОИП. 2008. Т. 113, вып. 5. С. 68-75.
9. Алексеев Ю.Е., Вахрамеева М.Г., Денисова Л.В., Никитина С.В. Лесные травянистые растения. Биология и охрана: Справочник. М.: Агропромиздат, 1988. 223 с.
10. Восточноевропейские широколиственные леса: история в голоцене и современность / Под редакцией Смирновой. М.: Наука, 2004. Кн. 1. 479 с.
11. Смирнова О.В. Структура травяного покрова широколиственных лесов М.: Наука, 1987. 206 с.
12. Длусский Г.М. Муравьи рода формика. М.: Наука, 1967. 236 с.
13. Левина Р.Е. Способы распространения плодов и семян. - М.: Издательство Моск. ун-та, 1957. 358 с.
14. Новиков В.П. Диаспоры, распространяемые муравьями. // Учен. Зап. Ленингр. пед. ин-т им. А.И. Герцена. 1939. Т. 25. С. 43-45.
15. Дьяченко Н.Г., Русакова Н.Н. Роль рыжих лесных муравьев (*Formica rufa* L. и *Formica Polictena* Foerst.) в экосистемах Беловежской пушчи. // Сохранение биологического разнообразия

разия лесов Беловежской пуци. Каменюки
Минск, 1996. С. 191-201.
16. *Дьяченко Н.Г.* Размеры, количество колонн и

интенсивность движения в семьях рыжих лес-
ных муравьев. // Муравьи и защита леса. Пермь,
2001. С. 72-75.

STUDY OF ANTS AND PLANTS INTERACTIONS BY LATTICE SIMULATION MODEL

© 2009 V.V. Bessonov, G.E. Rubashko

Institute of Mathematical Problems in Biology of RAS, Moscow Region, Pushchino;
e-mail: bvv-70@mail.ru, grubashko@rambler.ru

A lattice simulation model was developed to investigate interaction of herbaceous plant and ant populations. Colonization of *Lasius niger* L. and *Formica rufa* L. ant-hills by *Stellaria holostea* L. and *Galeobdolon luteum* Huds was analyzed taking into account ant activities (including seed dispersal). Comparison of plant growth on ant-hills and hill adjacent territories was performed for the investigated species.

Key words: *lattice model, simulation; ant-plant interaction, ant, plant.*

УДК 004.9:631.4

АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ РАЗЛОЖЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА: БАЙЕСОВСКИЙ ПОДХОД

© 2009 М.Г. Безрукова¹, С.С. Быховец¹, П.Я. Грабарник¹,
А.А. Ларионова¹, М.А. Надпорожская²

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
Московская область, г. Пущино, e-mail: bzmng@rambler.ru, s_bykhovets@rambler.ru,
grya@rambler.ru, ilyaevd@rambler.ru

²Биологический НИИ Санкт-Петербургского государственного университета, г. Петродворец.

Параметры модели разложения органического вещества ROMUL [1, 5] оцениваются по данным экспериментов по потере массы порций различного опада [2]. Такие эксперименты трудоемки, полученные данные характеризуются значительной вариабельностью, и, следовательно, параметризация модели связана со значительной неопределенностью. В данной работе использован подход, основанный на байесовских методах, который позволяет количественно описать неопределенность параметров в терминах апостериорных плотностей.

Ключевые слова: *априорное и апостериорное распределения, байесовское оценивание, динамика органического вещества почв, оценка параметров модели, скорости разложения опада.*

Наличие громадных запасов органического углерода в виде гумуса почв свидетельствует о том, что почву следует рассматривать как мощный сток углерода. Учитывая возраст гумуса почвы, дискуссионным остается вопрос о размерах гумусонакопления в историческом масштабе. Для того чтобы установить, является ли интенсивное накопление углерода результатом прошлых эпох или процесс аккумуляции углерода продолжается в настоящее время, необходимо сочетание экспериментальных наблюдений с моделированием этого процесса на разных отрезках времени, используя динамические модели углеродного цикла в экосистемах

Разложение органического вещества в почве - это сложный многоступенчатый процесс. В то же время почва является важной составной частью лесной экосистемы и необходимо иметь количественные оценки основных потоков (например, эмиссии углекислого газа в атмосферу). Предложено большое количество моделей [1, 7], с той или иной степенью детальности описывающих процессы, происходящие в почве. При этом для каждой конкретной модели возникает задача определения параметров модели по экспериментальным данным.

Традиционный подход при решении такого рода задач состоит в применении метода (взвешенных) наименьших квадратов или максимального правдоподобия (если имеются основания выбрать соответствующую модель данных). Однако применение этих методов накладывает некоторые ограничения на класс моделей, для которых использование этих методов корректно. Кро-

ме того, информация о точности (или надежности) оценок и адекватности модели данным может быть недостаточна, чтобы использовать откалиброванные параметры для целей прогноза поведения модели за пределами условий эксперимента.

В последнее время для решения задач идентификации параметров, калибровки и сравнения моделей используется байесовский подход, привлекательная сторона которого состоит в том, что он дает общий методологический подход, в рамках которого наиболее естественно решается проблема анализа неопределенности, связанной с неполнотой данных, сложностью модели и неустранимой вариабельностью параметров. Хотя байесовские методы были предложены достаточно давно, их применение сдерживалось трудностями вычислительного характера: в отличие от классических статистических процедур, аналитические решения для байесовской модели данных были известны только для небольшого ряда случаев. Однако развитие методов статистического моделирования и, в частности, использование метода Монте-Карло, основанного на применении марковских цепей (МСМС-моделирование), совпавшее с развитием средств вычислительной техники и программного обеспечения, сделало возможным применение этих методов во многих областях, в том числе в экологическом моделировании [8, 9, 10, 11].

В данной работе мы описываем опыт применения байесовских методов для оценивания параметров почвенной модели ROMUL по экспериментальным кривым разложения органического

го вещества и сравниваем с результатами, полученными ранее методом максимального правдоподобия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные данные. Общая схема опытов приводится в работе [3], непосредственно используемые нами данные – в работе [2]. Компостирование образцов проводили в контролируемых условиях (в темноте, при 20°C и оптимальной влажности, т.е. 60% от полной влагоемкости (ПВ) для минеральных компостов и около 300 весовых процентов для большинства растительных компостов. Учет потери массы компостов производили непосредственным взвешиванием воздушно-сухих образцов после 0,5; 1; 3; 6; 9 и 12 месяцев компостирования.

Модель ROMUL. При построении модели необходимо учитывать как сложность описываемых процессов, так и качество экспериментальных данных, по которым идентифицируются параметры модели. Конечный результат, как пра-

вило, представляет собой разумный компромисс между степенью детализацией модели и имеющимися данными. В качестве примера применения байесовских методов мы используем модель динамики органического вещества в почве ROMUL [1, 5]. Органическое вещество почвы в модели представлено тремя пулами: опад (L), подстилка (F) и органическое вещество минеральных горизонтов. Помимо цикла углерода в модели присутствует цикл азота. На каждом шаге, если предусмотрено сценарием, поступает свежий опад (L_0). Далее, часть органического вещества в каждом пуле разлагается и переходит в следующий, часть минерализуется и выводится из системы. Количественные характеристики (скорости разложения и перехода) определяются системой дифференциальных уравнений, вид которых и подробное описание можно найти в [1, 5]. Так как имеющиеся данные соответствуют только первой стадии разложения, то мы имеем дело с частью модели, представленной в виде схемы (рис.1).

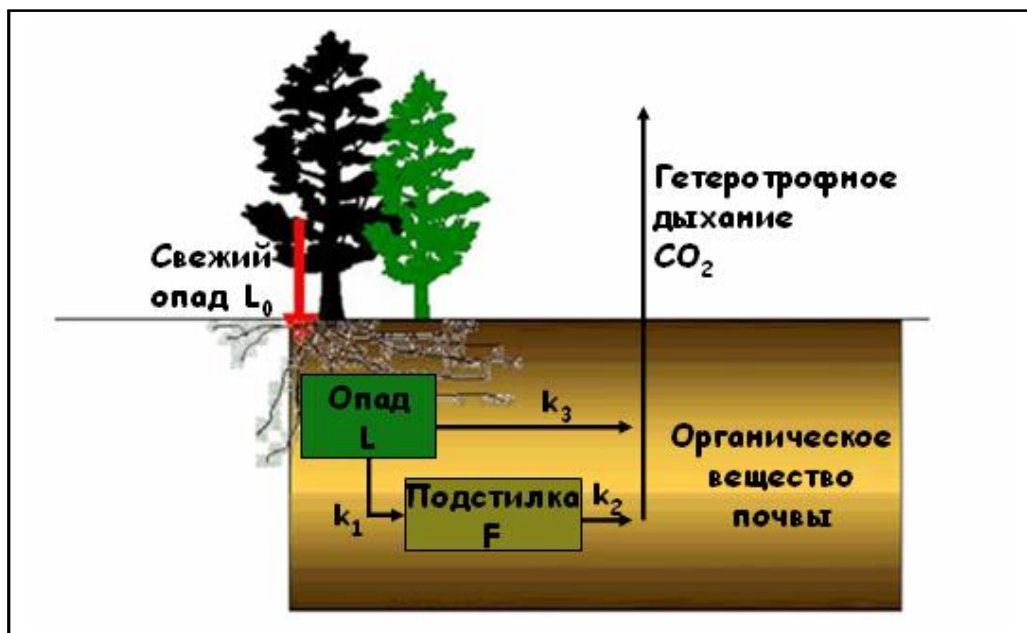


Рис. 1. Схема разложения органического вещества, соответствующая эксперименту

Дифференциальные уравнения, описывающие эту стадию разложения, зависят от трех параметров - k_1 , k_2 , k_3 , которые оцениваются по экспериментальным данным,

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= L_0 - (k_1 + k_3) \cdot L \\ \frac{dF}{dt} &= k_3 \cdot L - k_2 \cdot F \end{aligned} \quad (1)$$

Байесовское оценивание. В байесовском подходе параметры, которые нужно оценить по

экспериментальным данным, трактуются как случайные величины. Подобное допущение может не соответствовать экспериментальной ситуации, но оказывается весьма удобным приемом. Это позволяет рассматривать неопределенность, связанную с оценкой параметров, в терминах вероятностных распределений. Кроме того, априорное распределение параметров $p(k)$ может быть выбрано на основе литературных данных или проведенных ранее экспериментов, что способно улучшить качество оценивания в условиях недостатка эксперименталь-

ного материала. Критическое отношение к байесовским методам основано прежде всего на том, что выбор априорного распределения зачастую субъективен. Однако, использование неинформативного равномерного распределения снимает остроту проблемы. Опишем кратко этот метод. Обозначим выборочные данные через D . Теорема Байеса связывает априорное распределение $p(k)$ с апостериорным $p(k | D)$ через функцию правдоподобия $p(D | k)$

$$p(k | D) = \frac{p(D | k) \cdot p(k)}{p(D)},$$

где $p(D)$ - плотность вероятности, не зависящая от параметров, и которая обычно не участвует в вычислениях. Идея метода оценивания заключается в том, чтобы найти наиболее вероятные значения параметров $k = (k_1, k_2, k_3)$ на основе наблюдавшихся в опыте величин $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$. Другими словами, ищутся те значения параметров, при которых условная вероятность $p(k | D)$ достигает максимального значения. К сожалению, вычислить апостериорное распределение в явном виде, как правило, невозможно из-за того, что $p(D)$ - обычно сложно устроенная функция. Поэтому для нахождения апостериорной вероятности используется метод статистического моделирования, позволяющий получать выборки из распределения, известного с точностью до нормирующего множителя. В данной работе мы использовали алгоритм Метрополиса-Хастингса со случайным блужданием [6]. Идея этого алгоритма заключается в том, чтобы выбирать точки («блуждать») в наиболее вероятном подпространстве пространства параметров. Процедура оценивания на основе этого алгоритма состоит из следующих шагов. Прежде всего для каждого параметра экспертно определяется априорное распределение, и в отсутствии дополнительной информации предполагается, что параметры независимы. Следовательно, мы можем положить $p(k) = p_1(k_1) \cdot p_2(k_2) \cdot p_3(k_3)$.

Далее произвольно выбирается начальная точка $k^{(0)} = (k_1^{(0)}, k_2^{(0)}, k_3^{(0)})$. Кандидат на следующую точку $k^* = (k_1^*, k_2^*, k_3^*)$ выбирается из распределения, описывающего случайное блуждание. Вычисляется отношение апостериорных вероятностей

$$\beta = \frac{p(k^* | D)}{p(k | D)} = \frac{p(D | k^*) \cdot p(k^*)}{p(D | k) \cdot p(k)}.$$

Если $\beta \geq 1$ или $\beta \geq \gamma$ где γ - случайная величина, равномерно распределенная на $(0,1)$, то точка принимается, т.е. $k^{(1)} = k^*$, в противном случае отвергается. После этого алгоритм возвращается к выбору нового кандидата. Получивша-

яся таким образом последовательность точек $(k^{(0)}, k^{(1)}, \dots, k^{(N)})$ после отбрасывания части первоначальных точек, соответствующей переходной фазе, определяет (выборочные) совместное $\hat{p}(k | D)$ маргинальные распределения $\hat{p}(k_i | D)$, которые могут дать представление о степени неопределенности параметров модели, после того, как был проведен эксперимент.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты оценивания параметров модели мы рассмотрим на примере данных по разложению листьев осины. Условия эксперимента и предварительный анализ позволяют сделать предположение, что данные могут быть описаны гауссовским (нормальным) распределением, где среднее соответствует кривой убывания массы органического вещества $m(k)$, определяемой дифференциальными уравнениями (1), а дисперсия оценивалась по экспериментальным данным [2]. В качестве априорных распределений выбиралось равномерное распределение.

На рис. 2 и рис. 3 представлены совместные двумерные распределения и маргинальные распределения, соответственно, полученные после 5000 «успешных» шагов алгоритма. Выборочные распределения с достаточной полнотой описывают степень неопределенности параметров модели. В частности, на двумерных гистограммах хорошо видно, что апостериорное распределение не симметрично, параметры k_1 и k_3 ; k_2 и k_3 существенно скоррелированы. Сведения о высокой корреляции между параметрами полезны, так как могут служить основанием для редуцирования модели. Маргинальные распределения наиболее простой и наглядный способ представления результатов оценивания с помощью байесовского метода, когда параметрический вектор имеет высокую размерность. Форма распределения и сравнение с априорным распределением показывают какой из параметров требует специального внимания и, возможно, изменения модели или получения дополнительной информации.

Заметим, что оценки, полученные двумя способами, методом максимального правдоподобия и байесовским методом, близки. Это естественное следствие гауссовской модели ошибок и равномерного априорного распределения. На рис. 4 представлены кривые, «подогнанные» к данным двумя конкурирующими методами.

В таблице приведены результаты расчетов, сделанные для опытов по потере массы опавов различных типов. Результаты демонстрируют близкое соответствие подходов, максимального правдоподобия и байесовского оценивания.

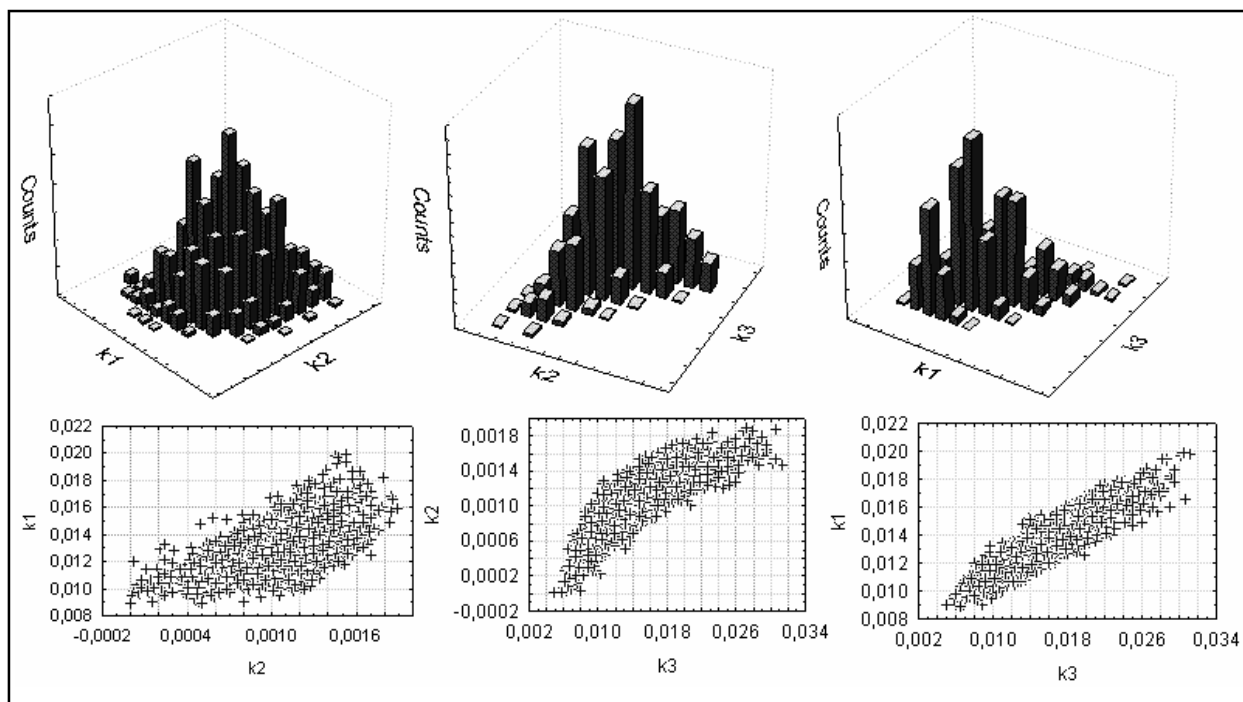


Рис. 2. Выборочные совместные распределения для параметров модели

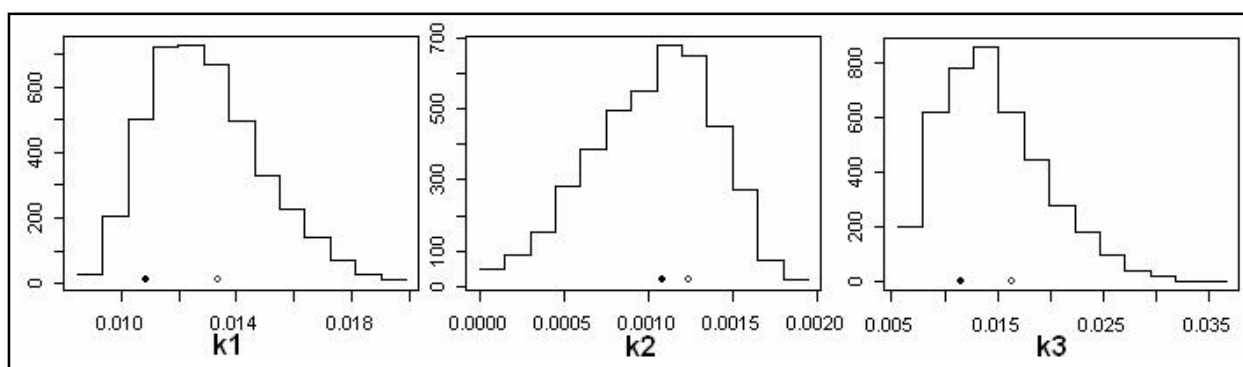


Рис. 3. Выборочные маргинальные распределения для параметров модели: символ (·) соответствует оценке максимального правдоподобия; и символ (°) - среднему маргинального распределения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В практическом применении метод максимального правдоподобия (или метод наименьших квадратов) может быть предпочтительнее, если цель состоит в том, чтобы найти оценки параметров и подогнать модель к данным. Это преимущество связано, главным образом, с выигрышем в вычислениях, так как байесовский метод сопряжен с большой вычислительной работой. Метод максимального правдоподобия хорошо работает в случае, когда оценки модельных параметров имеют небольшую неопределенность. Однако в случае высокой неопределенности данных (небольшое число или высокая вариабельность) и, как следствие, плохой идентификации параметров преимущество, состоящее в оценивании распределения параметров и использовании априорной информации, делают байесов-

ский подход более привлекательным. Поскольку модели экологических систем часто оказываются многопараметрическими в то время как данные, необходимые для идентификации параметров ограничены, использование байесовских статистических процедур имеет большое значение.

Апостериорное распределение было оценено с помощью генерации выборок, основанной на методе Метрополиса-Хастингса, который разработан, чтобы получать выборки из распределений с неизвестной нормирующей константой. Преимущество байесовского метода состоит в том, что он позволяет описать неопределенность параметров в форме вероятностного распределения и байесовских достоверных областей. Кроме того, маргинальные распределения являются достаточно информативным способом описания свойств параметров модели в многопараметрическом случае.

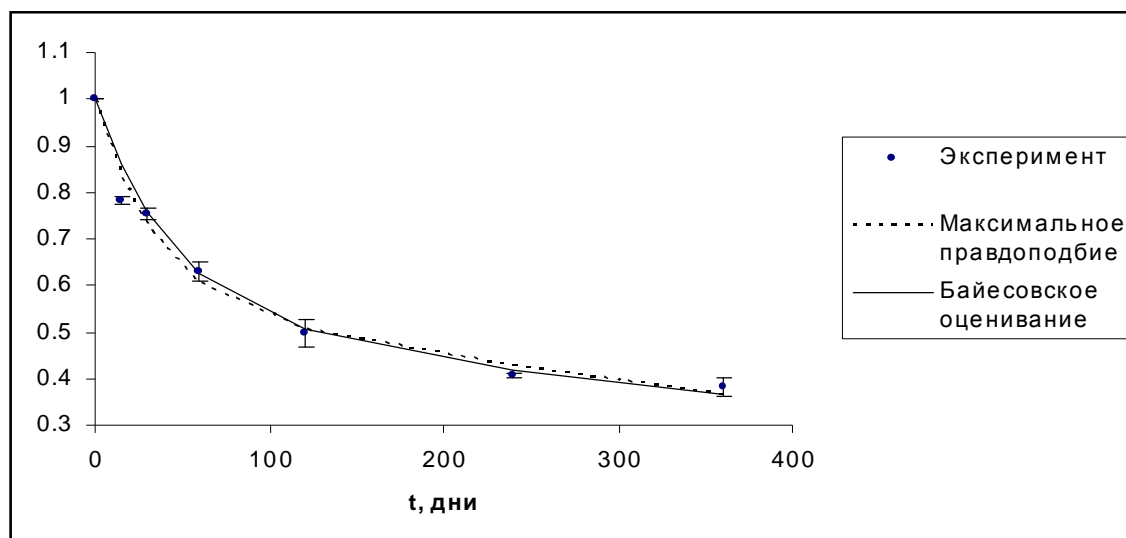


Рис. 4. Данные эксперимента по потере массы органического вещества и сглаженные кривые, рассчитанные методом максимального правдоподобия и байесовским методом

Таблица 1. Оценки параметров модели (1) методом максимального правдоподобия (МП) и байесовским методом, полученные по данным экспериментов с опадом разного типа

Опад	МП k_1	Маргина льное среднее k_1	Байес k_1	МП k_2	Маргина льное среднее k_2	Байес k_2	МП k_3	Маргина льное среднее k_3	Байес k_3
Папоротник Страусник (<i>Matteuccia struthiopteris</i>)	0.02370 (0.00472)	0.03848 (0.016647)	0.02396	0.00121 (0.00017)	0.00122 (0.0002)	0.00117	0.0567 (0.0163)	0.10033 (0.05043)	0.05377
Папоротник Голокучник Линнея (<i>Gimnocarpium dryopteris</i>)	0.02210 (0.00322)	0.23117 (0.094631)	0.02073	0.00093 (0.00014)	0.00114 (0.00014)	0.00086	0.0487 (0.0105)	0.64245 (0.25935)	0.04417
Ольха серая (<i>Alnus incana</i>) (листья)	0.01100 (0.00166)	0.008686 (0.000839)	0.00993	0.00112 (0.00027)	0.00066 (0.00032)	0.00071	0.0214 (0.00689)	0.01216 (0.00313)	0.01525
Рябина (<i>Sorbus aucuparia</i>) (листья)	0.02180 (0.00147)	0.018342 (0.00109)	0.01766	0.00172 (0.00023)	0.00131 (0.00027)	0.00146	0.0213 (0.0032)	0.01461 (0.00226)	0.01501
Осина (<i>Populus tremula</i>) (листья)	0.01340 (0.00137)	0.012914 (0.001933)	0.01201	0.00124 (0.00032)	0.00103 (0.00037)	0.00107	0.0164 (0.00414)	0.01465 (0.0049)	0.01353
Сосна (<i>Pinus sylvestris</i>) (хвоя)	0.00815 (0.00045)	0.008544 (0.000645)	0.00815	0.00021 (0.0007)	0.00067 (0.0004)	0.00021	0.0042 (0.00141)	0.00556 (0.00139)	0.00416
Крапива (<i>Urtica dioica</i>) (листья)	0.07360 (0.00748)	0.59593 (0.230423)	0.07363	0.0013 (0.00011)	0.00139 (0.00013)	0.00130	0.0746 (0.00954)	0.65121 (0.25071)	0.07456
Крапива (<i>Urtica dioica</i>) (стебли)	0.04540 (0.00339)	0.047649 (0.005646)	0.04356	0.0021 (0.00019)	0.00218 (0.00016)	0.00210	0.0416 (0.00511)	0.04497 (0.00746)	0.03925
Липа (<i>Tilia cordata</i>) (листья)	0.03050 (0.00422)	0.031271 (0.007526)	0.02578	0.00169 (0.00017)	0.00156 (0.00021)	0.00164	0.0542 (0.0111)	0.05324 (0.01817)	0.04324
Мать-и-мачеха (<i>Tussilago farfara</i>)	0.03840 (0.00405)	0.0404 (0.007278)	0.03866	0.00124 (0.00016)	0.00121 (0.00019)	0.00118	0.0489 (0.00764)	0.05144 (0.01274)	0.04776
Хвощ полевой (<i>Equisetum arvense</i>)	0.06620 (0.00708)	0.067103 (0.009657)	0.06036	0.00104 (0.00018)	0.00099 (0.00018)	0.00096	0.0518 (0.0078)	0.0516 (0.00964)	0.04466
Зверобой (<i>Hypericum perforatum</i>)	0.01490 (0.00192)	0.013658 (0.00138)	0.01391	0.0011 (0.00053)	0.00067 (0.00033)	0.00109	0.0138 (0.00475)	0.0104 (0.00246)	0.01210
Ромашка аптечная (<i>Matricaria recutita</i>)	0.06030 (0.00648)	0.053392 (0.005432)	0.05969	0.00237 (0.00033)	0.00195 (0.0002)	0.00198	0.0409 (0.00726)	0.03127 (0.00504)	0.03712
Тимофеевка (<i>Phleum pratense</i>)	0.04250 (0.00276)	0.039458 (0.003191)	0.04180	0.00236 (0.0003)	0.00205 (0.00021)	0.00226	0.0261 (0.00354)	0.02169 (0.00304)	0.02492

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / (отв.ред. В.Н. Кудяров). М.: Наука. 2007. 380 с.
2. *Надпорожская М.А., Чертов О.Г.* Экспериментальная база для построения модели РОМУЛ: лабораторные эксперименты по определению скорости разложения растительных опавов, торфа и гумуса // Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. М.: Наука, 2007. С. 70-82.
3. *Чертов О.Г., Чуков С.Н., Надпорожская М.Н.*, О методике изучения функционально-динамических характеристик трансформации органического вещества почв // *Вестник СПб. ун-та.* 1994. сер. 3, вып. 3 (№ 17). С. 106-110.
4. *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. Proce. Pushchino, Russia, 2005. P. 33-34.
5. *Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L.* ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // *Ecological Modelling.* 2001. 138. P. 289-308.
6. *Gilks, W.R., Richardson, S., Spiegelhalter, D.J.* Markov Chain Monte Carlo in Practice. Chapman and Hall, London: 1996.
7. *Smith, P., Smith, J.U., Powlson, D.S. et al.* A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments // *Geoderma.* 1997. V. 81. P. 153–225.
8. *Svensson, M.; Jansson, P.E.; Gustafsson, D. et al.* Bayesian calibration of a model describing carbon, water and heat fluxes for a Swedish boreal forest stand // *Ecological Modelling.* 2008. V. 213. P. 331-344.
9. *Tang S., Heron E.A.* Bayesian inference for a stochastic logistic model with switching points // *Ecological Modelling.* 2008. V. 219. P. 153-169.
10. *Van Oijen M, Rougier J, Smith R.* Bayesian calibration of process-based forest models: bridging the gap between models and data // *Tree Physiol.* – 2005. V. 25. P. 915–927.
11. *Xenakis G., Ray D., Mencuccini M.* Sensitivity and uncertainty analysis from a coupled 3-PG and soil organic matter decomposition model // *Ecological Modelling.* 2008. V. 219. P. 1-16.

ANALYSIS OF UNCERTAINTY OF PARAMETERS OF A DECOMPOSITION ORGANIC MATTER MODEL: BAYESIAN APPROACH

© 2009 M.G. Bezrukova¹, S.S. Bykhovets¹, P.Y. Grabarnik¹,
A.A. Larionova¹, M.A. Nadporozhskaya²

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of RAS, Moscow Region, Pushchini, e-mail: BZMG@rambler.ru, s_bykhovets@rambler.ru, gpya@rambler.ru, ilyaevd@rambler.ru

²Biological Institute of St. Petersburg University, St. Petersburg.

Parameters of model of soil organic matter decomposition ROMUL is estimated by means of experiments on a loss of litters of various types. Such experiments are labor-consuming and data obtained are characterized as high variable, and, therefore, model parameterization is concerned with great uncertainty. In the paper we use an approach based on Bayesian estimation which allows to quantify the uncertainty of the parameters in terms of a posterior distribution.

Key words: *Aprioristic and anocметрупоное distributions, bayesian inference, dynamics of organic substance of soils, estimation of parameters of model, speeds of decomposition organic matter.*

УДК 631.481+631.92+630:004.92

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

© 2009 М.В. Бобровский¹, А.С. Комаров¹, В.Н. Шанин¹,
С.С. Быховец¹, А.В. Михайлов¹, Л.Г. Ханина²

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Московская область, г. Пущино, e-mail: maxim.bobrovsky@gmail.com, as_komarov@rambler.ru, shaninvn@gmail.com, s_bykhovets@rambler.ru, lexey.mikh@gmail.com

²Институт математических проблем биологии РАН, Московская область, г. Пущино, E-mail: lkhanina@rambler.ru

Модель EFIMOD использована для прогноза и анализа динамики углерода почвы при 4 типах сценариев традиционного природопользования, характерных для лесных территорий Европейской России: подсечно-огневое земледелие, переложное земледелие, паровое земледелие (трехполье), рубки. Результаты моделирования показали, что все сценарии природопользования ведут к уменьшению запасов углерода почвы по сравнению с его запасом при свободном развитии лесной экосистемы. При трехполье с удобрением почвы запас углерода стабилизируется. При других сценариях стабилизации не происходит, интенсивность потерь углерода почвы увеличивается в ряду: рубки – подсечно-огневое земледелие – переложное земледелие.

Ключевые слова: имитационное моделирование, подсечно-огневое земледелие, переложная система земледелия, трехполье, рубки, EFIMOD, ROMUL

Обычно при моделировании циклов круговорота элементов время начала значимых антропогенных воздействий на наземные экосистемы относят к середине XIX в. [12]. Однако, на примере Европейской России можно сказать, что задолго до этого времени практически вся эта территория испытывала на себе разнообразные виды интенсивных антропогенных воздействий. Большинство воздействий были связаны с традиционными системами земледелия - подсечно-огневой, переложной и паровой (трехполье), а также с использованием лесных ресурсов (прежде всего, древесины). 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 [14, 15].

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 [9]. 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.

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 [13] вместе со встроенной в нее почвенной моделью ROMUL [10]. 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 динамику экосистемы 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 семян основных видов деревьев – ели, липы, дуба, сосны, березы, осины с плотностью каждого вида 700 шт./га. Этап инициализации

модели составил 370 лет; в итоге «сформировался» смешанный разновозрастный лес с доминированием позднесукцессионных видов деревьев.

Далее моделировали свободное развитие леса и 4 типа сценариев антропогенных воздействий.

(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) Паровая система земледелия в виде трехполья. 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» сцена-

риях 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования показали, что максимальный уровень содержания С сохраняется при естественном развитии лесной экосистемы (рис. 1, А, сценарий F). Средний за период воздействия запас С в почве уменьшается в ряду: (а) свободное развитие леса – (б) строевой лес – (в) дровяной лес, выборочные рубки, трехполье с удобрением раз в 3 года – (г) подсека с оборотом 40 – 120 лет, трехполье с удобрением раз в 9 и 18 лет – (д) подсека с оборотом 20 лет – (е)

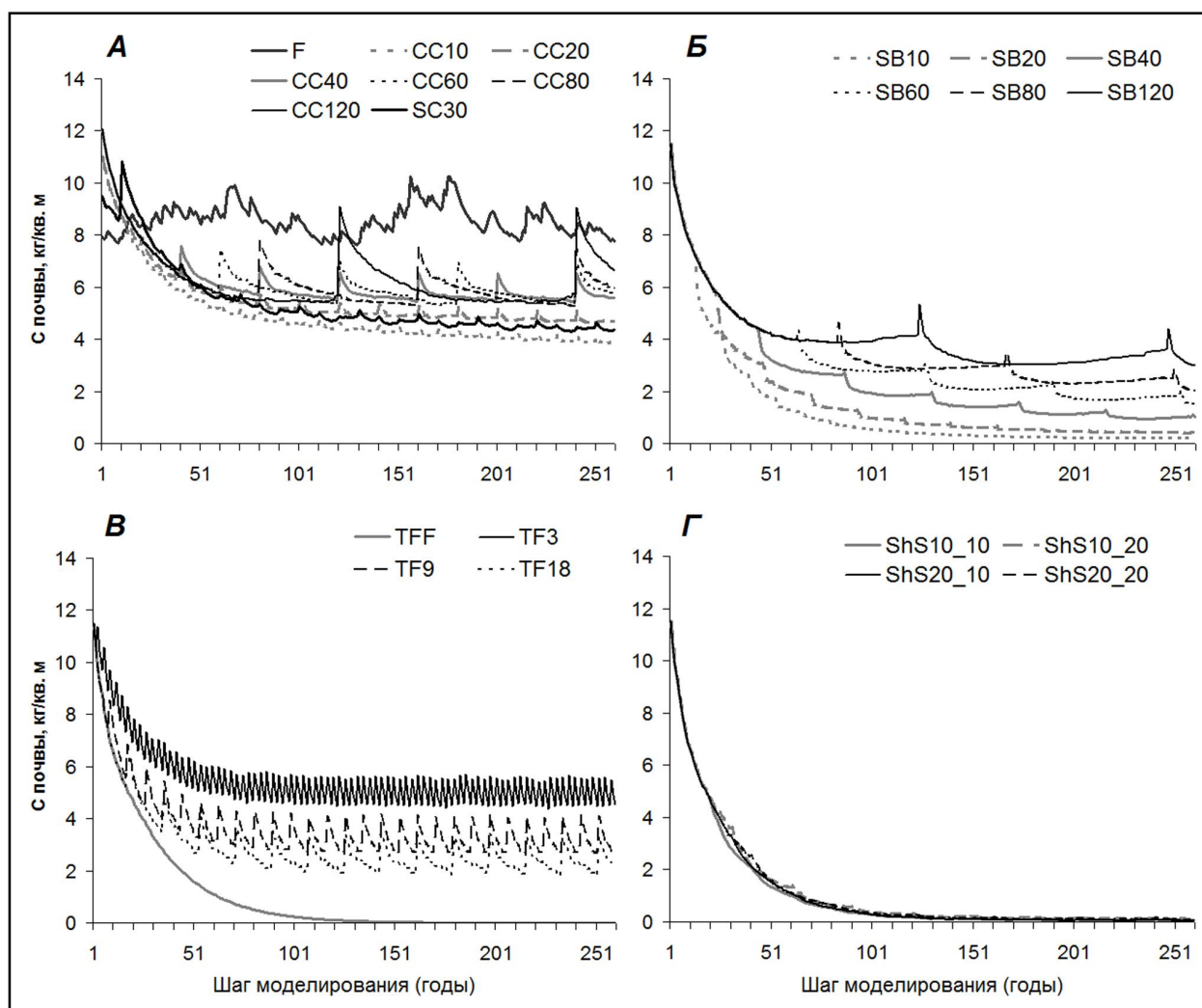


Рис. 1. Динамика углерода почвы после начала антропогенных воздействий: А – сценарии рубок и свободного развития леса; Б – сценарии подсечно-огневого земледелия; В – сценарии трехполья; Г – сценарии перелога.

Обозначения сценариев в тексте

все варианты перелога и трехполье без удобрения (рис. 2).

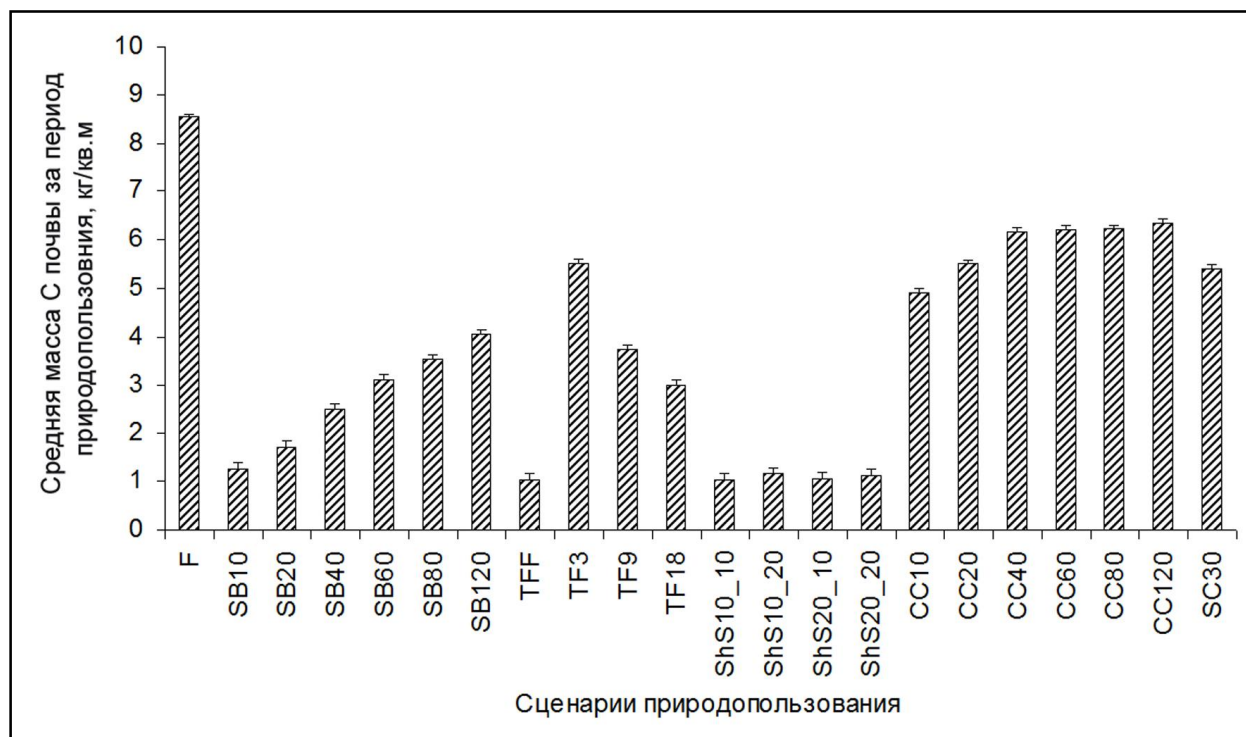


Рис. 2. Средняя масса углерода почвы при разных сценариях природопользования за 260-летний период моделирования: черта над столбцом показывает величину ошибки среднего. Обозначения сценариев в тексте

При оборотах *рубки* от 40 до 120 лет (строгие леса) наблюдали снижение содержания С относительно «фоновой» лесной почвы при отсутствии заметного «накопления потерь» - относительной стабилизации запаса С за период между рубками (рис. 1, А). Хорошо заметно отличие динамики С 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» (стабилизации запаса С за время между рубками не происходит). Малый оборот рубки деревьев ведет к большим потерям С почвы, поскольку в молодом состоянии деревья тратят больше питательных веществ, чем отчуждают с опадом. Так, период наибольшего прироста органического вещества и потребления наибольшего количества элементов питания наблюдается в дубняках в возрасте около 25 лет, осинниках – около 30 лет, сосняках – 30 – 50 лет [6]. Сценарий принудительно-выборочных рубок (SC30) показал динамику С почвы, близкую к его динамике в дровяных лесах.

Подсечно-огневую систему земледелия на территории центра Европейской России применяли на протяжении более 4000 лет [2]. При этом еще в XIX – начале XX в. в России подсеку, и крестьяне, и специалисты в сельском хозяйстве рассматривали как более выгодную альтернати-

ву навозной пашне [4]. Эффективность подсечи зависит от уровня восстановления почвенного плодородия во время «отдыха» – свободного развития леса, что демонстрируют и результаты моделирования (рис. 1, Б, рис. 2). При большой длительности лесной фазы (сценарий SB120) уровень содержания С в почве сравним с трехпольем (сценарий TF9). При всех вариантах подсечи наблюдается ступенчатое уменьшение содержания С в почве, при этом содержание С падает непропорционально уменьшению периода отдыха. При сценариях SB10 и SB20 содержание С уменьшается как на сельскохозяйственной, так и на лесной фазе, при SB40 и SB60 наблюдается стабилизация содержания С на лесной фазе, при SB80 и SB120 – частичная компенсация содержания С на лесной фазе.

Для территории России нет массовых количественных данных по варьированию сроков отдыха и урожайности при подсеке, но они есть для Финляндии. За два века в Финляндии оборот рубки при подсеке сократился с 40 до 25 лет, а урожайность зерновых на лесных полях уменьшилась в 2 раза [2].

Некоторые исследователи относят подсечно-огневое земледелие к «естественным экзогенным» нарушениям [8], мотивируя это тем, что после таких нарушений происходит восстановление «первичных лесов». Наши результаты пока-

зывают, что даже 120 лет спонтанного развития в рассматриваемых условиях не хватает для восстановления запасов органического вещества почвы. В историческое время срок спонтанного развития леса при подсеке составлял 25 – 80 лет [2, 4].

Трехполье считают крупнейшим достижением европейской агрокультуры средневековья. Распространение трехполья в Европейской России относят к XI – XIII в. Трехполье поставило урожайность в прямую зависимость от качества обработки и удобрения земли; последнее служило главным фактором поддержания почвенного плодородия. Результаты моделирования показывают, что при трехполье содержание С в почве зависит от качества (частоты) удобрения (рис. 1, В, рис. 2). Позитивный, но кратковременный эффект внесения навоза или компоста подтверждается экспериментальными данными [5, 11].

Сценарий TF3 близок к представлению об идеальной системе «органического земледелия». На территории России такую систему применяли только на отдельных полях для выращивания требовательных к удобрению почвы культур (например, конопли) и в огородном хозяйстве. По расчетам, для нормального удобрения соотношение площадей пашен и лугов должно составлять 1:1,24 [4]. Такое соотношение угодий в центральной России в историческое время не достигалось. Например, в конце XVIII века площади сенокосов были ниже расчетной нормы в Московской губернии в 4,9 раз; Псковской – 8,2; Смоленской – 10,4; Ярославской – 6,3; Костромской – 6,1; Калужской – 10,0; Тульской – 11,4 раз [4, с. 216]. По данным источников XVII - XIX вв., навоз на пашни вносился нерегулярно, в среднем один раз в 7 – 12 лет. При этом речь идет о полях, ближних к поселениям, дальние поля не унавоживались вовсе [1, 4]. Таким образом, сценарий TF9 соответствует режиму землепользования в богатых помещичьих и монастырских хозяйствах. Сценарий TF18 имитирует уровень агрокультуры хозяйства бедного, но использующего удобрение.

Время «потери силы» земель при отсутствии удобрения по источникам XVIII в. оценивалось в 10 – 30 лет [4]. Это демонстрирует сценарий TF. При распашке именно в первые годы все почвы теряют до 20-40% общего содержания гумуса, затем темпы минерализации снижаются [3, 5], однако почва теряет способность расширенного воспроизводства посевного материала.

Переложная система земледелия была компромиссным средством поддержания почвенного плодородия при отсутствии возможностей как нормально удобрить участок, так и превратить его в залежь. Как и в случае подсеки, скорость уменьшения содержания гумуса зависит от вре-

мени свободного развития леса (рис. 1, г). Результаты моделирования показали слабые различия в характере динамики С почвы при разных сценариях переложного земледелия (рис. 2). В целом перелог характеризуется быстрым падением содержания С в почве, которое не компенсируется в промежутки свободного развития леса. При уменьшении времени ротации наблюдается более резкое падение содержания С как на полевой, так и на лесной фазах перелога. Широкое использование лесного перелога на территории Европейской России в XV - XIX вв. могло быть более эффективным скорее для получения дополнительной дровяной древесины, чем для значимого улучшения качества пашни.

К сожалению, данные для верификации результатов моделирования по большинству сценариев природопользования отсутствуют. Однако сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными для крайних вариантов сценариев паровой системы (TF и TF3) показало их хорошее соответствие. Относительные скорости потерь гумуса по результатам моделирования соответствуют результатам долгосрочных полевых экспериментов [5]. Очень близки они и к результатам изучения содержания гумуса в почве после 20-летнего использования [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показали, что при всех сценариях традиционного природопользования происходит уменьшение запасов углерода почвы по сравнению с его запасом при свободном развитии лесной экосистемы. Восстановление запаса С происходит при длительном развитии леса либо при удобрении почвы. Чем выше частота удобрения, тем на более высоком уровне стабилизируется запас углерода. При других сценариях природопользования стабилизация запаса С не происходит, интенсивность потерь С почвы увеличивается в ряду: рубки – подсечно-огневая система земледелия – переложная система и паровая система без удобрения.

За тысячи лет активного присутствия человека на одной и той же территории происходили разнообразные смены воздействий – чередовались периоды интенсивной эксплуатации земель, активного лесопользования и восстановления леса [1]. Вплоть до XX в. в центральной Европейской России преобладали комбинированные системы земледелия, сочетавшие трехпольный севооборот с периодическим обновлением основного массива пашенных земель за счет перелогов и подсеки [4]. Полученные при помощи моделирования результаты показывают, что приро-

допользование в доиндустриальную эпоху могло оказывать существенное воздействие на глобальный цикл углерода.

Использование данных по соотношению распространения различных систем природопользования позволяет подойти к модельному эксперименту по влиянию хозяйства на структуру и состав лесных экосистем на локальном и региональном уровнях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бобровский М.В.* Лесные почвы: биотические и антропогенные факторы формирования // Восточноевропейские леса. История в голоцене и современность / Под ред. О.В. Смирновой. М.: Наука, 2004. Кн. 1. С. 381-427.
2. История крестьянства в Европе. Эпоха феодализма. Т. 1. М.: Наука, 1985. 569 с.
3. *Золотарева Б.Н., Демкина Т.С., Петрова Л.И., Стулин А.Ф.* Изменение содержания и состава гумуса при сельскохозяйственном использовании почв // Биопродуктивность агроценозов как комплексная проблема. Пушкино, 1989. С. 28-43
4. *Милов Л.В.* Великорусский пахарь и особенности российского исторического процесса. М.: РОССПЭН, 1998. 573 с.
5. *Перепелица В.М.* Роль органических и минеральных удобрений в накоплении гумуса почвы // Почвоведение. 1974. № 3. С. 29-37.
6. *Ремезов Н.П.* Разложение лесной подстилки и круговорот элементов в дубовом лесу // Почвоведение. 1961. № 7. С. 2-12.
7. *Хохлов В.Г.* Органическое вещество дерново-подзолистых почв Смоленской области. Дис. на соиск. учен. степ. канд. биол. наук. М., 1980.
8. *Attiwill P.M.* The disturbance of forest ecosystems: the ecological basis for conservative management // For. Ecol. Manage. 1994. V. 63. P. 247-300.
9. *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, OGS-ICTP, 2007. P. 70-71.
10. *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.
11. *Debosz K., Petersen S.O., Kure L.K., Ambus P.* Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties // Appl. Soil Ecol. 2002. V. 19. P. 237-248.
12. *Denman K.L., Brasseur G., Chidthaisong A. et al.* Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry // In: Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the 4th Assessment Report Of the IPCC. Cambridge University Press, UK and NY USA: 2007.
13. *Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L. et al.* EFIMOD 2 - a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecol. model. 2003. V. 170. P. 373-392.
14. *Lal R.* Forest soils and carbon sequestration // For. Ecol. Manage. 2005. V. 220. P. 242 – 258.
15. *Song C., Woodcock C.E.* A regional forest ecosystem carbon budget model: impacts of forest age structure and landuse history // Ecol. Model. 2003. V. 164. P. 33-47.

MODELLING OF SOIL CARBON DYNAMICS UNDER DIFFERENT SYSTEMS OF FORESTRY AND HISTORICAL TRADITIONAL LANDUSE IN THE EUROPEAN RUSSIA

© 2009 M.V. Bobrovsky¹, A.S. Komarov¹, V.N. Shanin¹, S.S. Bykhovets¹,
A.V. Mikhailov¹, L.G. Khanina²

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of RAS, Moscow Region, Pushchino.

²Institute of Mathematical Problems in Biology of RAS, Moscow Region, Pushchino.

The effects of different historical land-use and forest management systems on soil carbon dynamics in the Central European Russia have been assessed using the model of carbon and nitrogen cycling in forest ecosystems EFIMOD. The following agricultural and forest management scenarios were simulated: (a) slash-and-burn system with various years for crops and forest; (b) three-field crop rotation system with and without organic fertilization; (c) short-term field-forest shifting system, (d) clear cutting forest management system with various rotation years, and (e) selective cutting forest management system. Simulated results showed that soil carbon essentially decreases under frequent agricultural impacts either without fertilization or without prolonged forest stage.

Key words: simulation modelling, slash-and-burn system, field-forest shifting system, three-field crop rotation, forest cutting, EFIMOD, ROMUL.

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВЕННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

© 2009 М.Р. Давлетшина

Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа;
e-mail: davletshina@yandex.ru

Предложена методика оценки устойчивости органического вещества почвы на основе математической теории катастроф и системном анализе почвенных систем. Модель позволяет рассчитать критерии устойчивости для различных типов почв и провести прогнозирование возможных равновесных состояний.

Ключевые слова: *имитационное моделирование, устойчивость, почвенные системы, теория катастроф.*

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.

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. 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.

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 других, диагностики минерального питания растений, накопления и распада поллютантов в агроэкосистемах (пестицидов, нефтепродуктов, радионуклидов) и др.

На использовании уравнений переноса (диффузии) построены «диффузные» модели и применяются для расчета потоков вещества и энергии. В почвоведении уравнения диффузии используются для расчета температурных, концентрационных и иных полей в почвенной массе [5-7].

Для оценки устойчивости гумуса традиционно используются линейные модели, балансовые модели, модели круговорота углерода [3, 7]. 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. Проведен анализ существующих методов математического моделирования на предмет их приложимости к решению проблем почвоведения, показана неадекватность некоторых из них к исследуемым почвенным системам.

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.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

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 [1]. Гумусное состояние почв характеризуется большим набором показателей, отражающих уровни накопления гумуса в почве, его профилное распределение и др. Оценку устойчивости системы гумусовых веществ можно провести различными методами, наиболее эффективным из них является матема-

тическое моделирование.

Рассмотрены почвенно – климатические условия Южной лесостепной зоны.

На основе исследований содержания, запасов, мощностей гумусовых горизонтов, группового и фракционного составов черноземов выщелоченных Южной лесостепи можно сделать вывод, что гумусное состояние данных почв характеризуется высоким потенциальным плодородием, однако, и в этих почвах наблюдается отрицательный баланс гумуса и питательных веществ. Запасы гумуса в слое 0-50 см достигают 385 т/га, в слое 0-100 см – до 570 т/га. Гумус имеет гуматный характер, отношение углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот 2,91-3,65. В целом по республике запасы гумуса составляют $4,6 \cdot 10^9$ т, из которых 15% накоплено в почвах Южной лесостепи. В $0,29 \cdot 10^9$ т гумуса пахотных почв аккумулировано максимальное количество энергии – $6,7 \cdot 10^{21}$ кДж.

Таблица 1. Баланс гумуса и количество аккумулированной в составе гумуса энергии

Зона	Запасы гумуса, т		Энергия гумуса, кДж		Гумус в пахотных почвах, т/га в год		
	На всю площадь	На площадь пашни	На всю площадь	На площадь пашни	Минерализация	Восстановление	Баланс
Южная лесостепная	$0,69 \cdot 10^9$	$0,29 \cdot 10^9$	$16 \cdot 10^{21}$	$6,7 \cdot 10^{21}$	0,4	0,4	-0,1
По республике	$4,6 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^9$	$106 \cdot 10^{21}$	$39,0 \cdot 10^{21}$	1,2	0,3	-0,8

В то же время максимальный дефицит гумуса – около 1,0 т/га в год, что составляет 0,05% гумуса – также наблюдается в черноземах вы-

щелоченных. Основные причины такого дефицита – недостаточное восполнение гумуса и потери вследствие эрозии.

Таблица 2. Запасы и потери почвы и гумуса вследствие эрозионных процессов

Индекс почвы	Всего почвы, тыс. т/га	Потери почвы			Всего гумуса	Потери гумуса, т/га		
		I	II	III		I	II	III
Чернозем выщелочен.	10,3	1,3	3,0	7,4	5999,2	169,4	284,6	389,5
Чернозем типичный	11,1	2,3	3,8	8,6	494,8	100,1	242,3	380,7
Чернозем оподзоленн	9,9	1,1	3,5	7,1	508,6	71,5	192,1	362,6

Поступление органических удобрений в почвы недостаточно для стабилизации баланса. Текущий дефицит в органическом веществе в почвах РБ составляет 4,6 т/га. Для восполнения отрицательного баланса гумуса почвы должны были получать по 8,8 т/га органики при общем объеме вывоза удобрений более 40 млн. т в расчете на

пахотную площадь РБ.

Рассматривая применение различных методов к исследованию почв, проведя анализ, сравнение методов математического моделирования почвы, находим, что наиболее эффективным методом моделирования устойчивости почвы является метод теории катастроф. Согласно этой

теории, катастрофа – это скачкообразное изменение при плавном изменении внешних условий. Потеря устойчивости почвы – есть катастрофа.

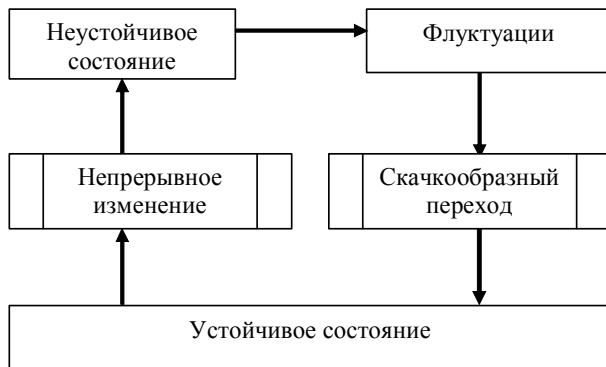


Рис.1 Цикл развития системы

Таким образом, можем говорить о скачкообразном изменении параметров плодородия, которые могут привести к соответствующему переходу почвы в качественно новое состояние. Это состояние будет характеризоваться другими параметрами потенциального плодородия.

При небольших изменениях внешних параметров (антропогенная и естественная деградация, недостаточное поступление органических удобрений, использование тяжелой техники и т.д.) почва некоторое время не теряет своей устойчивости. Но при достижении критических значений даже малое изменение приводит к скачкообразному переходу почвы в новое устойчивое состояние, но с другими показателями. В качестве примера рассматриваются показатели плодородия в динамике.

Таблица 3. Изменение плодородия почв за последние 40 лет

Показатели плодородия	Ед. изм.	Серые лесные почвы				Черноземы выщелоченные			
		1965-1970 гг.	1985-1990 гг.	1995-2000 гг.	2000-2007 гг.	1965-1970 гг.	1985-1990 гг.	1995-2000 гг.	2000-2007 гг.
Мощность гумусового горизонта	см	40,00	36,00	33,00	31,75	80,00	75,00	72,00	69,50
Гумус: содержание запасы в слое 0-50 см	%	5,62	4,46	4,25	4,00	10,20	8,00	7,80	7,50
	т/га	194,00	148,00	140,00	134,00	523,00	385,00	380,00	377,0
Азот: содержание запасы в слое 0-50 см	%	0,29	0,26	0,24	0,22	0,54	0,44	0,40	0,35
	т/га	13,00	11,50	10,80	10,00	22,00	19,00	17,50	14,50

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим устойчивость нелинейной системы в рамках Вольтерровской функции LBX , где B, X запасы органического вещества.

$$\begin{aligned} dB/dt &= Q + aB + LBX \\ dX/dt &= P + kB - vX \end{aligned} \quad (1)$$

Оценивая устойчивость уравнений (1), приходим к выводу о неустойчивости системы при всех $a \geq 0$. Колебательные режимы, как и в модели (3.0), отсутствуют. При отрицательных значениях условие устойчивости запишется в виде:

$$KLB^2 < Q\gamma, \quad (2L\gamma X < a\gamma + P). \quad (2.0)$$

Отсюда видим, что при формировании устойчивости немаловажную роль играют внешние потоки вещества Q, P [9]. Это следует помнить при определении норм допустимого отчуждения сельскохозяйственной продукции, внесения удобрений. Например, при условии отсутствия внешних потоков ($Q \leq 0, P \leq 0$), система (1.0) будет

однозначно неустойчива. Характер фазовой диаграммы можно описать как «седло устойчивый узел» с параметром бифуркации $\gamma = 2Ba$.

Нами доказано, что каждое дополнительное включение параметров модели сопровождается частичной потерей устойчивости. Так, если в уравнение (1.0) включить коэффициент дыхания, то кроме монотонных режимов (устойчивый узел) появляются колебательные режимы (устойчивый фокус).

Анализируя различные математические методы и подходы, установили, что теория катастроф – наиболее эффективный метод исследования устойчивости. Модели теории катастроф описывают резкие скачки системы из одного состояния в другое, т.е. катастрофически быстрые изменения запасов B, X при относительно малом варьировании параметров их трансформации.

Для описания круговорота органического вещества включаем в модель нелинейную положи-

тельную связь между содержанием гумуса и продуктивностью растительного покрова. Эта связь состоит в том, что с ростом продуктивности увеличивается количество поступающих в почву растительных остатков, служащих источником образования гумуса. В свою очередь, гумус обеспечивает растения элементами минерального питания, оптимизирует среду обитания растений и способствует росту продуктивности растительного покрова. Аналитически эту зависимость определяет выражение вида

$$p = \frac{p_0 x_1}{a + x_1}, \quad (3.0)$$

где p - продуктивность растительного покрова; p_0 - потенциальная продуктивность растительного покрова; a - параметр, зависящий от свойств почвообразующей породы и численно равный запасу органического углерода в почве, при котором достигается половина потенциальной продуктивности; x_1 - запас углерода гумуса в почве. Модель представляет собой систему из двух обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= k_{21}x_2 - (k_1 + c)x_1, \\ \frac{dx_2}{dt} &= \frac{k_0 p_0 x_1}{a + x_1} - (k_{21} + k_2)x_2. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Аналогично линейным моделям (3.0) и (4.0), k_1 - константа минерализации гумуса; k_2 константа скорости минерализации растительных остатков; k_{21} - константа скорости гумификации растительных остатков. Решая систему (3.1), определяется эффективный параметр q , представляющий собой функцию параметров круговорота углерода.

$$q = \frac{kk_{21}}{a} - (k_1 + c)k_3. \quad (3.2)$$

При $q < 0$ устойчиво состояние $x_1 = 0$, гумусонакопления не происходит. Точка $q = 0$ является точкой бифуркации системы. При $q > 0$ возникает множество устойчивых стационарных состояний.

Область устойчивости системы определяем из условия $q > 0$:

$$\begin{aligned} p_0 &> \frac{ak_3(k_1 + c)}{k_0 k_{21}}; k_{21} > \frac{ak_3(k_1 + c)}{k_0 p_0}; k_0 > \frac{ak_3(k_1 + c)}{k_{21} p_0}; \\ k_3 &< \frac{k_0 p_0 k_{21}}{a(k_1 + c)}; k_1 < \frac{k_0 p_0 k_{21}}{ak_3} - c; c < \frac{k_0 p_0 k_{21}}{ak_3}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

где $\frac{k_1(Kp)}{k_1}$ - критическое значение константы скорости минерализации гумуса.

Значения параметров круговорота углерода, при которых неравенства (3.3) обращаются в равенства, являясь критическими, при их достижении почва теряет устойчивость и разрушается.

Зная критических значений параметров круговорота углерода, рассчитали индексы устойчивости почв – соотношения параметров реальных систем и соответствующих критических значений. Индексы устойчивости характеризуют удаленность почв от критического состояния, их запас прочности. Мы рассчитали индексы устойчивости черноземов выщелоченных и типичных под пашней и лугом. В табл. 4 приведены индексы устойчивости почв южной лесостепи, характеризующие запас прочности по отношению к минерализации гумуса.

Таблица 4. Индексы устойчивости черноземов

Параметры	Чернозем типичный, луг	Чернозем типичный, пашня	Чернозем выщелоченный, луг	Чернозем выщелоченный, пашня
$\frac{k_1(Kp)}{k_1}$	35,5	10,8	39,1	12,0

ВЫВОДЫ

Полученные результаты свидетельствуют о большом запасе прочности по отношению к потерям углерода в результате минерализации гумуса. У наиболее устойчивых экосистем на черноземах выщелоченных и типичных значения параметров круговорота C отличаются от критических в более чем в 35 раз. В то же время значение эффективного параметра $q = 1.25$, близко

к точке бифуркаций, что говорит о близости параметров данной почвы к критическим значениям.

Анализ устойчивости почв различными методами математического моделирования выявил неадекватность некоторых из них, наиболее эффективным методом оценки устойчивости почвы является метод теории катастроф. Процессы гумусообразования, гумусонакопления и трансформации гумуса носят нелинейный характер,

описываются отрицательными обратными связями. Прогнозы показывают, что при отсутствии внешних потоков для восстановления на прежний уровень углерода детрита необходимо порядка 20-25 лет, лабильных фракций гумуса – от 200 до 2500 лет. Сделана попытка математического моделирования круговорота органического вещества почвы с учетом особенностей данной почвы, позволяющая оценить области устойчивости системы гумусовых веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гарифуллин Ф.Ш., Акбаров Р. А., Хабиров И.К.* Агрофизические свойства черноземов Предуралья Башкортостана и пути их оптимизации. Уфа: Изда-во БГАУ, 2008. 304 с.
2. *Давлетшина М.Р.* Анализ устойчивости почв методами математического моделирования. Дис. на соиск. канд. с.-х. наук, Уфа, 2003. 137 с.
3. *Морозов А.И., Самойлова Е.М.* О методах математического моделирования динамики гумуса. // Почвоведение, 1993. № 6. С. 24-32.
4. *Образцов А.С.* Системный метод: применение в земледелии. М.: Агропромиздат, 1990. 303 с.
5. *Паченский Я.А.* Математические модели физико-химических процессов в почвах. М.: Наука, 1992. 120 с.
6. *Пегов С.А., Хомяков П.М.* Моделирование развития экологических систем. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 217 с.
7. *Рыжова И.М.* Анализ чувствительности системы почва-растительность к изменениям параметров круговорота углерода на основе математической модели // Почвоведение. 1993 № 10. С. 52-56.
8. *Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Шаахмедов Ш.А.* Программирование урожая с помощью динамических моделей // Вест. с.-х. науки. 1987. № 8. С. 55-59.
9. *Смагин А.В.* К теории устойчивости почв // Почвоведение. 1994. № 12. С. 26-34.

THE ANALYSIS OF STABILITY OF SOIL SYSTEM BY THE THEORY OF ACCIDENTS

© 2009 M.R. Davletshina

Bashkir State Agricultural University, Ufa;
e-mail: davletshina@yandex.ru

The analysis of soil stability by the mathematics methods and by the theory of accidents. The model allows to calculate criteria of stability for various types of soils.

Key words: *mathematics modeling, stability, soil system, Bashkortostan, theory of accidents.*

УДК: 576.68+519.876.5

КИНЕТИКА РОСТА БАКТЕРИОПЛАНКТОНА НА ПОЧВЕННЫХ ЭКСТРАКТАХ КРАСНОЯРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

© 2009 Н.Н. Дегерменджи¹, А.Г. Дегерменджи²

¹Красноярский государственный медицинский университет, г. Красноярск;
e-mail: nn1947@yandex.ru

²Институт биофизики СО РАН, Красноярск; e-mail: ibp@ibp.ru

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 (химическое потребление кислорода) на рост автохтонного бактериопланктона Красноярского водохранилища. Определяется максимальная УСР и константа Михаэлиса-Ментена. Данные параметры использовались в экомодели Красноярского водохранилища для оценки эффективности самоочищения.

Ключевые слова: почвенный экстракт, бактериопланктон, кинетика роста, прогноз.

ВВЕДЕНИЕ

Красноярское водохранилище представляет собой глубокий слабопроточный водоем с преимущественно сезонно контролируемым протоком. В разнообразном использовании водохранилища преобладает гидроэнергетика. Площадь водного зеркала составляет 2000 кв. км., объем – 73.3 куб. км., длина - около 390 км, средняя ширина - 5-6 км. Одной из отличительных характеристик водохранилища является значительная переменность уровня водной поверхности - от 234 до 225 м, т.е. диапазон составляет 18 м. Возраст водохранилища - 37 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 [6]. 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. Введение экспериментальных кинетических характеристик в математические прогнозные модели представляет собой новый прогрессивный путь и должно способствовать повышению адекватности теории при прогнозировании состояния экосистемы. Основные трудности возникают при выборе субстрата для экспериментов по кинетическим характери-

кам. Анализ источников некоторых органических веществ в Красноярском водохранилище показал, что основным компонентом является процесс деструкции прибрежной зоны. Количество отложений при деструкции прибрежной полосы при прогнозе на десятилетний период составляет около 40% общего баланса, однако с завершением строительства Саянского моря (вверх по течению) оно поднимется до 73%. Разрушение лесных почв, чернозема способствует поступлению гумуса и других органических соединений в Красноярское водохранилище. Все это приводит к необходимости исследования УСР бактериопланктона (Б) на почвенных экстрактах материалов разрушения береговой полосы и его поглощение.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Почвенных экстракт культуральной среды для культивирования Б приготавливался из почв различных горизонтов, разрушающихся в районе водной станции Сыдинского залива. 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.

Почвенные экстракты приготавливались по методу Фишера [5]: 1 кг почвы плюс 1 литр 0,1% водного раствора Na_2CO_3 , естественная экстракция в течение 24 часов со встряхиванием, центрифугированием и стерилизацией автоклавированием. Химическая потребность в кислороде (ХПК) чистого желтого почвенного экстракта составляла 140 мг ХПК/л. Изменение начальной

концентрации органического вещества во время экспериментов по выращиванию Б осуществлялось перемешиванием различных пропорций экспериментального объема Б и объема экстракта: в контроле (с) - 200 мл экспериментального и 0 мл экстракта, 1 - 20 и 180; 2 - 60 и 140; 3 - 100 и 100; 4 - 140 и 60; 5 - 180 и 20. Колбы помещались в термостат при температуре 20°C. Общая численность Б определялась прямым счетом на ядерных фильтрах под люминесцентным микроскопом; в конце эксперимента измерялась остаточная концентрация ХПК в супернатанте в каждой колбе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПО КИНЕТИКЕ РОСТА

Из динамики величины X ($[X]$ = кл/мл) Б во время экспериментов (с, 1-5) рассчитывалась УСР: $G(S_{ХПК}) = \ln(X_2/X_1)/(t_2 - t_1)$, где $S_{ХПК}$ - средняя концентрация ХПК в течение экспериментального периода УСР ($\mu_{max} = 0,117 \pm 0,019 \text{ ч}^{-1}$) константа Михаэлиса-Ментена ($K_s = 7,85 \pm 6,6$ мг ХПК/л), а также коэффициент поглощения органики почвенного экстракта Б: $y = 11,74 \pm 1,17$ г ХПК/г биомассы.

МОДЕЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ: ДИНАМИКА БАКТЕРИЙ

Расчет динамики Б проводился по имитационной модели экосистемы. Модель имеет следующие основные блоки: гидрологический блок (осуществляющий гравитационное и ветровое течения), блок морфометрии водоема, гидрохимический блок, экологический блок. Экологический блок содержит следующие компоненты: диатомовые и сине-зеленые водоросли, Б, зоопланктон, простейшие, химические компоненты. Зависимость УСР от Б представлена на рис. 1.

Расчет динамики Б совместно с представлением натуральных полевых данных (по заливу Сыда Красноярского водохранилища) проводился для вариантов экосистем различной степени сложности (обозначенных на рис. 2 цифрами 1-8):

1. только гидрологическая модель, биологические процессы «заморожены»;
2. Б 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 зоопланктона;

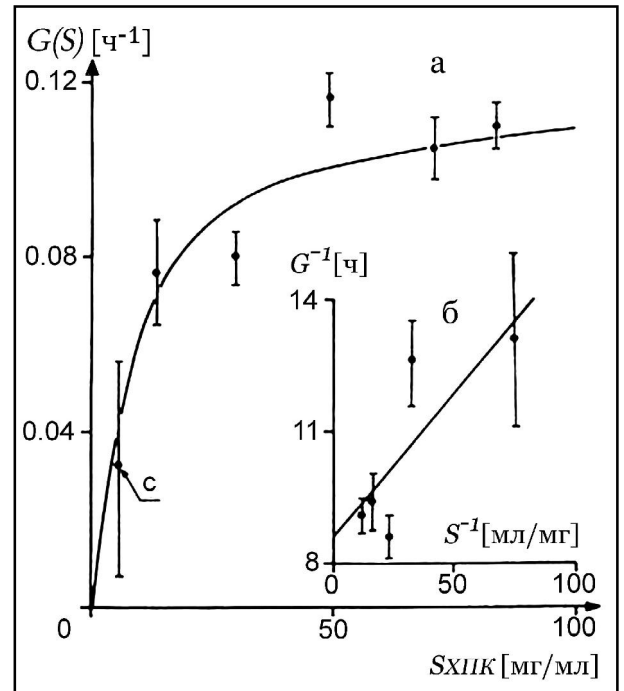


Рис. 1. График зависимости УСР (G) бактериопланктона от ХПК концентрации почвенных экстрактов ($S_{ХПК}$) из материалов обрушений берегов Красноярского водохранилища: а - прямые координаты; б - обратные координаты; с - опыт, не использовавшийся при расчетах μ_{max} и K_s .

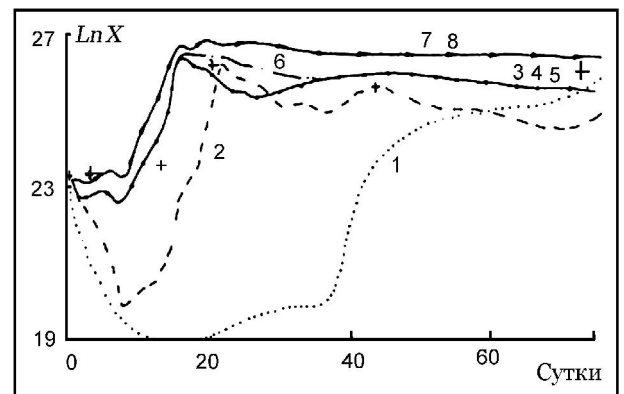


Рис. 2. Расчетная динамика бактерий (+ - данные наблюдений).

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.

Динамика Б связана с входными потоками ограничивающей рост органики в «камеру». При снижении притока органики Б отмирает и плотность Б снижается. Важным следствием этого

является то, что приток аллохтонной органики как таковой не может адекватно объяснить наблюдаемую динамику Б и становится необходимым допустить образование дополнительного аллохтонного вещества в водной экосистеме.

МОДЕЛЬНЫЙ ПРОГНОЗ: ДИНАМИКА САМООЧИЩЕНИЯ

Еще одним применением кинетических характеристик является прогноз самоочищения. В качестве нового параметра введем экономическую оценку ущерба, наносимого сбросами предприятий в совокупности с температурными перепадами на Енисее после строительства Красноярской гидроэлектростанции. Летняя температура на участке от Дивногорска до Красноярска упала с 18-20°C до 10-12°C [3], в то время как зимняя температура воды поднялась на один - два градуса выше точки замерзания. Такие изменения должны оказывать влияние на экосистему.

Для получения эколого-экономической оценки ущерба допустим, что существует только одно загрязняющее вещество (например, общая концентрация S органического вещества), поглощаемого Б. Самоочищение представляет собой снижение S вниз по течению. При допущении высокой турбулентности в вертикальных и боковых измерениях, что вполне вероятно для Енисея, очищение зависит только от расстояния вдоль реки, r , и от времени t . Уравнение динамики экосистемы, объединенное с уравнениями движения Сан-Венана (1) для нестационарного потока жидкости имеют вид:

$$\begin{cases} I_0 - \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{v^2}{c^2 R} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial r}, \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial r} = q \\ \frac{\partial s}{\partial t} + v \frac{\partial s}{\partial r} = -G(s)X, \quad \frac{\partial X}{\partial t} + v \frac{\partial X}{\partial r} = -G(s) \frac{1}{y} X \end{cases} \quad (1)$$

$I \equiv i_0 - \partial h / \partial r$ с типичными граничными и начальными условиями [2]. Здесь t - время; r - координата, рассчитанная вдоль потока; Q - расход воды; i_0 - уклон дна; h - уровень воды; I - уклон водной поверхности в виде разности между уклоном дна и глубиной (h), изменяющейся по потоку; $v(r, t)$ - средняя скорость на участке r ; g - ускорение тяжести; R - гидравлический радиус; $c=c(R)$ коэффициент Шези (Shezy factor); q - приток на единицу водного потока; $w(h, t)$ - «живое» сечение; $X(r, t)$ - биомасса Б; $G(s)$ - УСР Б как функция S ; $S(r, t)$ - концентрация загрязняющего вещества, т.е. растворенного органического вещества (РОВ); $1/y$ - коэффициент урожайности.

Для простоты рассмотрим стационарную задачу для системы (1). Решение такой системы

относительно $s(r)$ (при линейной УСР:

$$G(s) = \mu_{\max} / K_s * S \equiv k * S \text{ имеет вид:} \\ s(r) = (X_0 / y + s_0) s_0 / (X_0 / y * \exp[k(X_0 / y + s_0) r / v] + s_0) \quad (2),$$

где $s_0 = s(0)$, $X_0 = X(0)$, т.е. для $i=0$.

В случае, когда УСР Б описывается уравнением Моно $G(s) = \mu_{\max} s / (K_s + S)$, аналитическое выражение для $s(r)$ преобразуется к трансцендентному виду:

$$s_0 ((X_0 / y + s_0) - s(r))^a / s(r) = \\ (X_0 / y)^a \exp[k(X_0 / y s_0) r / v] \quad (3),$$

где $a \equiv 1 + (X_0 / y + s_0) / K_s$.

Проанализируем следующую ситуацию: каким образом s_0 - начальная концентрация загрязняющего вещества в месте «предыдущего» выброса влияет на фоновую концентрацию этого вещества на участке до «следующего» выброса? Можно показать (см. формулу (3)), что при очень высоких и очень малых концентрациях s_0 величины $s(r)$ будут небольшими. Следовательно, существует такая критическая величина

$s_0 = s_0^{crit}$, после которой концентрация $s(r)$ снижается, т.е. может возникнуть «парадоксальная ситуация» когда при повышении загрязненности где-то вверху по течению концентрация загрязнения на некотором расстоянии вниз по течению снижается. При большой начальной биомассе X_0 имеем аналитическую оценку: $s_0^{crit} > v / (rk)$. Учет насыщения в зависимости УСР (3) может вызвать появление еще одной критической концентрации s_0 , после которой фоновая концентрация вновь начнет подниматься (рис. 3).

Допустим, что на расстоянии r' был произведен сброс того же загрязняющего вещества с очистных сооружений со скоростью Q_d и концентрацией $S_i(r')$ Обозначив концентрацию РОВ на расстоянии $r' - \varepsilon_1$ ($\varepsilon_1 \approx 0$) вверх по течению от места сброса как $S_{up}(r')$ и вниз по течению ($r' + \varepsilon_1$), как $S_{dw}(r')$ получаем (при условии полного перемешивания)

$$S_{dw}(r') = Q / (Q_d + Q) S_{up}(r') + Q_d / (Q_d + Q) S_i(r') \\ \text{или } (1 + \beta) S_{dw}(r') = S_{up}(r') + \beta S_i(r'), \quad (4)$$

где $\beta \equiv Q_d / Q$ - коэффициент перемешивания. При неполном перемешивании Q можно заменить на соответствующий поток.

Величина S_i может быть связана с концентрацией загрязняющего вещества на входе очистного сооружения (P) отношением $\alpha P / (\alpha + m) = S_i$. Стоимость (m) резко повышается с повышением степени очистки. Наивысшая возможная концентрация $S_{dw}(r')$ не должна

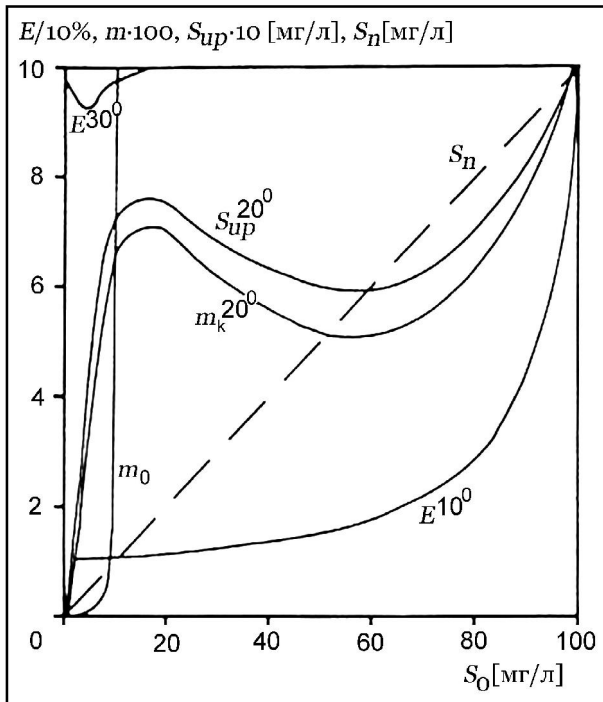


Рис. 3. Самоочищение (E), стоимость очистки (m) и концентрация загрязняющего вещества РОВ (S_{up}) как функция концентрации «выше» по течению (S_0); цифры вверху - температуры воды; S_n - концентрация без самоочистки ($k=0$).

превышать максимально допустимую концентрацию - ПДК. Следовательно, S_i также имеет верхний предел $S_i \leq (1 + \beta) ПДК / \beta + S_{up} / \beta$. Это условие, ограничение $S_i P$ и выражение (4), приводят к искомой формуле стоимости очистки (m) с допущением на предисторию самоочищения в реке

$$m = \{ \alpha [\beta (P - ПДК) + S_{up}(r') - ПДК] \} / \{ \beta ПДК - (S_{up}(r') - ПДК) \} \quad (5)$$

В зависимости от требуемой точности оценки (m) концентрацию S_{up} в (5) можно рассматривать в виде (2) или (3). Оценка m сама по себе не определяет ущерба; скорее стоимость сохранения природы (очистки), но изменения этой величины могут обеспечить знание ущерба или прибыли при изменении условий. При объединении с (2) выражение (5) обеспечивает стоимость очистки как функцию параметров экосистемы, таких как максимальная УСР, урожайность и т.д. Если эти важнейшие характеристики соотносены с влиянием факторов окружающей среды, B_i , таких как температура, токсиканты и т.д. составляющие ущерба можно определить для любого фактора.

а) Общий ущерб - составляющие ущерба. В общем случае стоимость очистки (m) является функцией внешних факторов (B_i), или $m = m(B_1, \dots, B_n)$, Соответственно, общий ущерб

(или прибыль) Δm при небольших отклонениях B_i от начальных величин B_i оценивается выражением:

$$\Delta m = \sum_{i=1}^n (\partial m / \partial B_i) | B_i' * \Delta B_i.$$

Величина $\partial m / \partial B_i$ определяет ущерб или экономии приписываемые «единичному» изменению влияния B_i , а $\Delta m_i = (\partial m / \partial B_i) * \Delta B_i$ представляет собой составляющую ущерба в случае изменения коэффициента на ΔB_i .

Проведем оценку ущерба, вызванную изменением, скажем, температуры, T . Применим $S_{up}(r)$ в виде уравнения (2) или при строгих ограничениях. Легко доказать, что $m = Q_1 \exp(dr) + l_1 / Q_2 \exp(dr) + l_2$, где явный вид параметров не приводится для экономии места $d = kX_0^{v-1} / y$. Пусть $d=d(T)$. В диапазоне исследованных температур было экспериментально обнаружено, что $(\partial k / \partial T) > 0$.

Другими словами, приводится увеличивающаяся часть УСР как функция температуры. Тогда, $\Delta m_T \equiv (\partial m / \partial T) \Delta T = \lambda (\partial k / \partial T) \Delta T (\lambda < 0)$ (6).

Последнее выражение показывает, что с падением температуры Δm_T положительно. Следовательно, снижение температуры приводит к ущербу, который можно оценить в строгих количественных терминах по формуле (6).

б) Какова стоимость самоочистки? На этот необычный, но важный вопрос можно ответить очень четко. В гипотетическом случае отсутствия самоочистки ($k=0$) стоимость очистки составляет

$$m_0 = \alpha (\beta P - S_{up}^{crit} + s_0) / (S_{up}^{crit} - s_0)$$

где $S_{up}^{crit} \equiv (1 + \beta) ПДК$.

С допущением природного механизма очистки ($k \neq 0$) она составляет

$$m_k = \alpha [\beta P - S_{up}^{crit} + S_{up}(r)] / [S_{up}^{crit} - S_{up}(r)].$$

При равенстве всех прочих условий стоимость дается разностью ($m_0 = m_k$). В действительности, это - оценка финансовой «помощи» очистному сооружению, обеспечиваемой водной экосистемой. Тогда, $E = (m_0 - m_k) / m_0$ представляет собой экономию, приписываемую данной «помощи». Преимущество данной оценки заключается в независимости от параметра α - стоимости самоочистки - которая является неизвестной.

Для конкретизации оценки ущерба воспользуемся экспериментальными результатами, полученными на Красноярском водохранилище.

Нами принято, что та же зависимость УСР (рис.1) сохраняется в нижнем бьефе Красноярского водохранилища ($S_{ХПК}$) и выражена как $S_{sgr} : S_{sgr} = S_{ХПК} * 1.7$ [1].

$$G(S) = k'(T) S / (13.75 + S);$$

$$k'(T) = 0.34 \exp\{ -[(T - 32) / 11.3]^2 \}.$$

Расчетные величины E , S_{up} и t для некоторых модельных параметров ($P=0.001$; ; $X_0=0.33$; $ПДК=10$), экспериментальных данных $G(S)$ (рис.1) и $y=0.0501$ и натуральных значений $r=40$ км; $v=4$ км/час) показаны на рис.3. $S_{up}(r)$ использовалась в виде уравнения (3). В модельном примере снижение средней летней температуры на 10°C привело к 40%-ному снижению экономии.

При данной оценке экономических последствий экологических изменений экосистема рассматривается в свете экономической целесообразности. Объединение с другими экспертными критериями может привести к комплексному принятию решений по водопользованию. Преимуществом предлагаемого подхода является четкость всех легко определяемых параметров. Данный подход может быть итеративно использован для полного описания экономической эффективности экосистемы для всей реки.

В настоящей статье мы рассмотрели нетрадиционный подход к моделированию качества воды и динамики бактериопланктона, основанный на цепочке теоретических и экспериментальных исследовательских этапов. Данный экспериментальный метод получения кинетической информации совместно с моделированием может найти применение в различных сферах водопользования на водохранилищах.

Работа выполнена при поддержке Интеграционных проектами СОРАН № 50 и № 95.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. С.-Петербург: Гидрометеиздат. 1-444с.
2. Антонцев, С.А. и Меурманов А.М. Математические модели совместного движения поверхностных и грунтовых вод, НГУ: Новосибирск. 1979.
3. Гительзон И.И., Абросов Н.С., Гладышев М.И., Дегерменджи А.Г., Сидько Ф.Я., Шевырновгов А.П., Гольд В.М. и Гольд С.З. Енисей: проблемы крупнейшей реки Сибири // В кн.: Круговорот углерода и минеральных веществ в крупнейших реках мира / Под ред. Дегенс Е.Т. и Р. Херрера. Сондербд. Гамбург. SCOPE/ UNEP, 1985. №58, с. 471-485.
4. Дегерменджи, А.Г., Печуркин Н.С. и Шкиденко А.Н.. Автостабилизация факторов роста в биологических системах. Новосибирск: Наука. 1979. с.1-141.
5. Тенпер, Е.З., Шилинкова Б.К. и Переверзева Г.Л. Микробиологический практикум. Агропромиздат, Москва. 1987. 1-239с.
6. Карр Н.Г. и Уиттон Б.А. Биология цианобактерий. Унив. Беркли Пресс, Беркли. 1982. 1-688с.

GROWTH KINETICS OF AQUATIC MICROORGANISMS ON SOIL EXTRACTS IN KRASNOYARSK RESERVOIR AND MATHEMATICAL MODELING

© 2009 N.N. Degermendzhy¹, A.G. Degermendzhi²

¹Krasnoyarsk Medical Academy, Krasnoyarsk; E-mail: nn1947@yandex.ru

²Institute of Biophysics SB RAS, Akademgorodok; E-mail: ibp@ibp.ru

The ecological forecasting of microorganisms and water quality dynamics in Krasnoyarsk reservoir is based on knowledge of dependence of specific growth rate (SGR) on limiting substrata. It investigated the influence of soil extract on the growth autochthonic bacterioplankton of Krasnoyarsk reservoir. The maximum SGR and Michaelis-Menten constant (on chemical oxidation decomposition (COD) - permanganate) is determined. This parameters are used in ecomodel of Krasnoyarsk reservoir and Yenisei river to estimate the payoff of self-purification.

Key words: soil extract, bacterioplankton, growth kinetics, prediction.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ КОНТРОЛЯ ГЛОБАЛЬНОГО ДЕМОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

© 2009 Б.М. Долгоносков

Институт водных проблем РАН, г. Москва; e-mail: borismd@aqua.laser.ru

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

Ключевые слова: *демографический процесс, информационная динамика, гиперболический рост, переходный период.*

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

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

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. 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 [4, 10].

Прежде, чем развивать эти представления, напомним тезис Т. Мальтуса о том, что «численность народонаселения неизбежно ограничивает-

ся средствами существования» [7]. В работе [6] приведенный тезис переформулирован следующим образом: «...рост численности человечества на каждый данный момент времени ограничен потолком несущей способности Земли, обусловленным наблюдаемым в данный момент времени уровнем развития жизнеобеспечивающих технологий». Это высказывание можно формализовать следующим образом. Пусть N_i - потолок несущей способности, медленно изменяющийся с ростом уровня развития технологий, а t - соответствующий (медленный) масштаб времени, отслеживающий изменение уровня технологий. При данном их уровне текущая численность человечества $n(\tau)$ может претерпевать значительные изменения, которые протекают намного быстрее, чем развитие технологий. Соответствующий масштаб времени τ существенно меньше масштаба t (рис. 1). Время τ будем называть локальным, а t - историческим, $t \gg \tau$. Локальные процессы, связанные с отклонением от потолка несущей способности и релаксацией к равновесию, описываются уравнением Ферхюльста $dn/d\tau = rn[1 - n/N(t)]$, где N_i играет роль несущей емкости среды. Проблема состоит в том, чтобы описать исторический процесс роста потолка несущей способности N_i . Именно в историческом масштабе времени проявляется информационная сущность цивилизации. Рассмотрим эту проблему более подробно.

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 (рис. 2). 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 $R \sim e^q$ состоя-

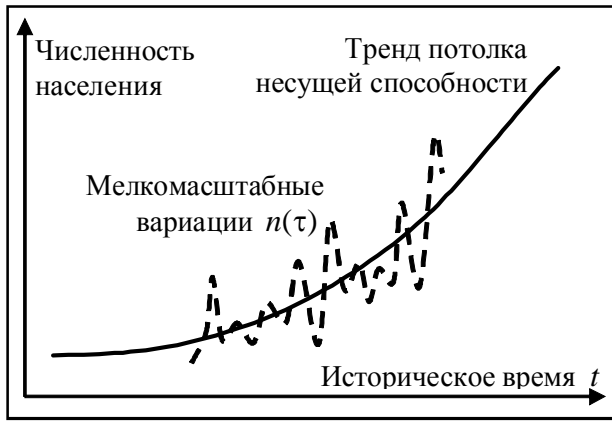


Рис. 1. Разномасштабные демографические процессы.

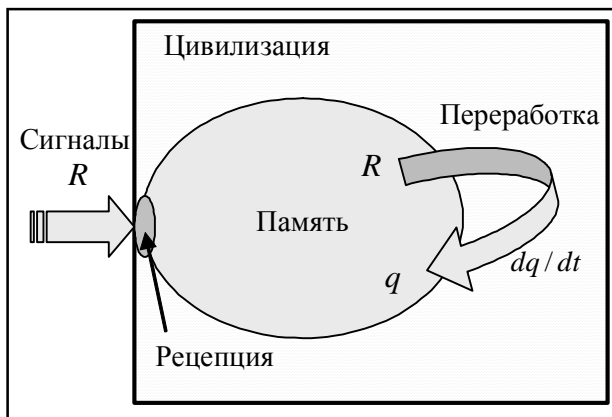


Рис. 2. Схема производства знаний.

ний внешнего мира. Рост знаний экспоненциально расширяет кругозор цивилизации и ее возможности в развитии жизнеобеспечивающих 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, киноплёнка, образцы и пр.). Поскольку $R \gg q$ преобладающая часть памяти любого типа, но особенно внешней памяти на компьютерных носителях, заполнена именно сырой рецептируемой информацией. Проведем оценку разных типов памяти.

Генетическая память. Геном человека содержит $3 \cdot 10^9$ пар нуклеотидов (1 п.н. = 1 бит). При нынешней численности человечества примерно в 6.5 млрд. чел. общая генетическая память человечества составляет $2 \cdot 10^{19}$ бит.

Нейронная память. Мозг человека содержит $\sim 10^9 - 10^{11}$ нейронов (или бит, если считать нейрон элементарной ячейкой памяти с двумя состояниями) [1, 9]. Отсюда следует грубая оценка общей нейронной памяти человечества $\sim 10^{19} -$

10^{21} бит. Более точную оценку можно получить, если предположить, что нейронная память была равна по объему генетической в эпоху становления человека, когда гоминиды стали превышать по своему интеллекту животных такого же размера и типа питания. Это было примерно 5 млн. лет назад. Тогда объем мозга был в 4 раза меньше мозга современного человека. Объем генетической памяти за это время практически не изменился. Следовательно, в то время у гоминид нейронная память была равна генетической и составляла $3 \cdot 10^9$ бит/чел. В настоящее время нейронная память вчетверо больше этой величины: $1,2 \cdot 10^{10}$ бит/чел. Зная численность населения, нетрудно подсчитать, что сегодня общая нейронная память человечества около $8 \cdot 10^{19}$ бит.

Внешняя память. В настоящее время из разных видов внешней памяти преобладает память на компьютерных носителях. Грубую оценку можно получить, считая, что сейчас число компьютеров в мире порядка миллиарда, а память жесткого диска порядка 100 Гбайт $\sim 10^{12}$. Тогда общая память компьютеров $\sim 10^{21}$ бит. Другая оценка основана на подсчете произведенной информации. По данным исследователей из университета Беркли в 2002 г. человечеством было произведено информации $18 \cdot 10^{18}$ байт, при этом в четырех информационных средах сохранено $5 \cdot 10^{18}$ байт информации (печать - 0.01%, видео и киноплёнка - 7%, магнитные - 92% и оптические носители - 0.01%) [3, 5]. Переводя в биты, получим, что только в одном 2002 г. во внешней памяти накоплено $1,4 \cdot 10^{20}$ бит информации. Если учесть накопления за все годы до настоящего момента, то оценка $\sim 10^{21}$ бит покажется даже заниженной.

Таким образом, в настоящее время внешняя память как минимум на порядок превзошла нейронную. Проведенные оценки показывают, что всю историю человечества преобладала внутренняя память, и только с появлением и развитием персональных компьютеров (1980-е годы) внешняя память достигла уровня внутренней, а затем и превзошла ее (рис. 3). 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.

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 $R \sim e^t$, то и $N \sim e^t$ – значит, всё это время не только объем информа-

ции, но и численность росла экспоненциально с накоплением знаний. Скорость производства знаний цивилизацией складывается из интеллектуальной деятельности индивидов, поэтому в целом она пропорциональна численности населения: $dq/dt = wN$, где w - средняя производительность человека. Отсюда следует уравнение производства знаний $dq/dt \sim e^q$, которое показывает, что процесс идет с обострением. Он сопровождается ускоренным развитием жизнеобеспечивающих технологий, вызывающим такой же ускоренный рост численности. Исходя из уравнения производства знаний и соотношения $q \sim \ln N$, нетрудно получить уравнение роста численности: $dq/dt = wN^2$, решение которого $N = [w(t_1 - t)]^{-1}$ дает известный гиперболический закон роста с моментом сингулярности $t_1 = 1/(wN_0)$ (где N_0 - начальная численность), который по оценкам первооткрывателей этого закона Х. фон Фёрстера, П. Моры и Л. Амиота [11] попадает на 2026 год (рис. 4).

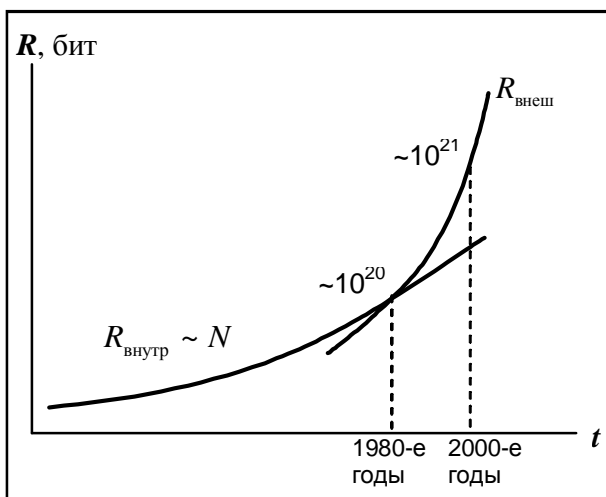


Рис. 3. Рост объема внутренней и внешней памяти.

Таким образом, оказывается, что гиперболический закон, обнаруженный указанными авторами эмпирически, имеет чисто информационную природу. В принципе, он должен выполняться для любой цивилизации, в которой свойства индивидов (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

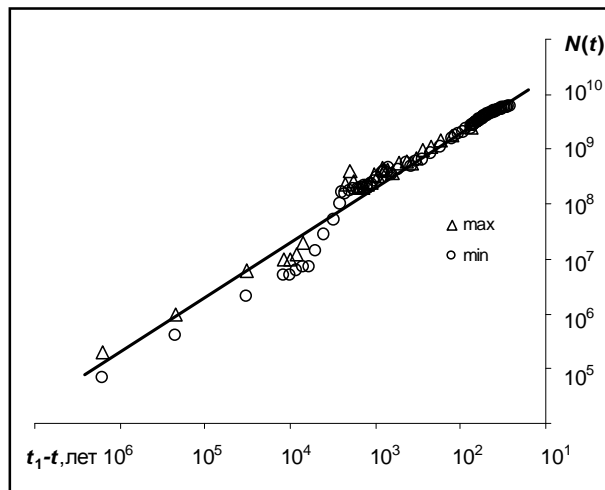


Рис. 4. Гиперболический закон роста численности населения Земли.

прежде человечество приобретает сильную 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, торможению роста численности и, может быть, даже снижению численности до уровня, не разрушающего биосферу. В популяционной динамике эти ограничения обычно учитывают на основе представлений о несущей емкости среды K . Эта величина определяется как максимальный размер популяции, который может быть достигнут при заданных условиях. Используя это понятие, запишем уравнение популяционной динамики в переходный период

$$dN / dt = wN^2(1 - N / K). \tag{1}$$

Емкость среды представляет собой отношение общего объема ресурсов R_0 к средним потребностям одного человека R_1 , т.е. $K = R_0 / R_1$. Незрелое общество малой численности слабо влияет на ресурсную базу, поэтому $R_0 \approx \text{const}$. Рост знаний q приводит, через создание новых

технологий, к пропорциональному увеличению потребностей человека: $R_1 \sim q$. В итоге емкость среды, сначала очень большая, постепенно убывает по закону $K \sim 1/q$. В развитом обществе объем ресурсов R_0 растет с накоплением знаний благодаря формированию ресурсных циклов. Одновременно растут потребности человека R_1 ввиду увеличения стоимости жизни. По достижении стационарной численности населения рост знаний продолжается, поддерживая рост ресурсов R_0 и потребностей R_1 при постоянном их отношении: $K = \text{const}$.

Найдем зависимость $K(q)$, охватывающую оба крайних случая. Так как вся деятельность человечества по изучению материального мира направлена в конечном итоге на выявление и производство новых ресурсов, их общий объем растет вместе с накопленным объемом информации по степенному закону $R_0 \sim R^\alpha$, $\alpha > 0$ (основание этого закона – отдельная задача, которая требует привлечения теории алгоритмов). Так как $R \sim e^q$, то $R_0 = ce^{\alpha q}$, $c > 0$. Потребности человека R_1 растут линейно с увеличением общего объема ресурсов: $R_1 = a + bR_0$, где a и b – постоянные, $b > 0$. Линейность обусловлена преобладанием товаров массового потребления. Небольшие отклонения от линейности возникают лишь при учете предметов роскоши, которые потребляет немногочисленная элита. Для определения взаимосвязи между параметрами в линейном законе учтем, что человечество не может существовать без знаний, так как теряется способность ориентироваться в сложном мире. Поэтому в пределе $q \rightarrow 0$ должны исчезать потребности человека $R_1 \rightarrow 0$, а общие ресурсы – стремиться к минимуму $R_0 \rightarrow 0$, (остается только то, что есть в природе в готовом виде). Указанные условия в применении к выражению для R_1 дают $a + bc = 0$, или $a = -bc$. С учетом этого, выражение для R_1 можно представить в виде $R_1 = bc(e^{\alpha q} - 1)$. Составляя отношение R_0/R_1 найдем емкость среды

$$K = N_c e^{\alpha q} / (e^{\alpha q} - 1),$$

где введена демографическая емкость Земли $N_c \equiv 1/b$ к которой стремится K при безграничном росте знаний. Эта величина соответствует наибольшему размеру человеческой популяции, который может вынести биосфера планеты без ее необратимой деградации.

Скорость изменения емкости среды в процессе роста знаний человечества нетрудно определить, если продифференцировать по времени найденное соотношение для K и использовать связь $dq/dt = wN$. В результате получим

$$dK / dt = \alpha wNK (1 - K / N_c). \quad (2)$$

Отметим, что это уравнение не содержит какого-либо упоминания о количестве накопленных

знаний q , а оперирует только с переменными K и N . Оно имеет естественную интерпретацию, состоящую в том, что скорость изменения емкости среды пропорциональна, во-первых, самой емкости (т.е. наличному объему ресурсов), во-вторых, численности населения, которое использует и воспроизводит ресурсы, и, в-третьих, отклонению емкости от ее равновесного значения N_c .

На раннем этапе развития человечества размер популяции мал $N \ll N_c$, а емкость среды, напротив, велика $K \gg N_c$. Со временем численность растет, а емкость снижается. В конечном итоге достигается стационарное состояние, в $N = K = N_c$.

Система уравнений (1)-(2) описывает демографический переход, который происходит в настоящее время. Она содержит три параметра: α , w , N_c . Наблюдаемому гиперболическому росту (рис. 4) отвечает значение $w^{-1} = 200$ млрд. чел. лет. На рис. 5 этот режим роста описывается кривой 1. Сценарии переходного периода рассчитывались при разных значениях параметров N_c и α (табл. 1). Имеющимся демографическим данным не противоречат сценарии развития с разными значениями α . Как видно из таблицы, при малых α велика разница между максимальной численностью цивилизации N_{max} и ее стационарным уровнем N_c . Вблизи точки максимума планета сильно перенаселена, ее демографическая емкость значительно превышена, провоцируя драматическое падение численности. Иная ситуация при больших α . Промежуточный максимум отсутствует, а численность населения постепенно дорастает до демографической емкости Земли.

Продолжительность переходного периода характеризуется временным масштабом t_c , который связан с N_c соотношением $N_c t_c = w^{-1}$. В таблице представлены сценарии, упорядоченные по возрастанию t_c – от 20 до 2000 лет. Сценарий 2 близок к прогнозу ООН, по которому численность населения возрастет до 9.1 млрд. чел. к середине текущего века и продолжит увеличиваться дальше. Сценарий 8 дает максимум численности около 7 млрд. чел., достигаемый в 2014 г. После этого идет снижение численности, сначала быстрое, а затем медленное, в течение примерно 2000 лет.

Для ограничения числа возможных сценариев необходимо использовать независимые оценки демографической емкости N_c . В настоящее время человечество потребляет по оценкам [2, 12] около 20% планетарной биомассы, тогда как допустимое изъятие, не разрушающее биосферу, не превышает 1%. То же можно сказать и об антропогенном тепловыделении, которое состав-

Таблица 1. Параметры рассчитанных сценариев (N_{\max} - максимальная численность, достигаемая в момент t_{\max})

№ сценария	t_c , год	N_c , млрд.	α	N_{\max} , млрд.	t_{\max} , год
2	20	10	1.81	10	∞
3	25	8	1.28	8.27	2049
4	30	6.67	1.02	7.67	2033
5	40	5	0.709	7.25	2025
6	60	3.33	0.442	7.00	2020
7	100	2	0.251	6.87	2017
8	2000	0.1	0.0118	6.71	2014

ляет 15-23% от производства энергии всей биосферой при допустимом пороге в 1%. Если следовать этим оценкам, человечество уже примерно в 20 раз превысило допустимый предел мощности своей экономики и вышло за пределы устойчивости биосферы. Возврат к разумному хозяйствованию возможен при снижении на порядок численности населения [2, 8], т.е. до уровня $N_c \sim 0.1-1$ млрд. чел., который находится между сценариями 7 и 8. Таким образом, возможен вариант, когда численность населения достигнет максимума примерно в 7 млрд. чел. в 2014-2017 гг. Затем пойдет быстрый спад численности до уровня 5.1-5.6 млрд. чел. к 2050 г. и далее до уровня 3.4-4.1 млрд. чел. к 2100 г. Последующая более медленная стабилизация численности может занять от сотен до тысяч лет. Подчеркнем, что сценарии с радикальным изменением численности, если таковые реализуются, неизбежно будут сопровождаться крупномасштабными социальными катаклизмами вследствие дестабилизации окружающей среды, истощения ресурсов, неравномерности развития стран и ряда других факторов. Тем не менее, нельзя категорически утверждать, что радикальные сценарии неизбежны.

Проведенный анализ показывает, что единственной крупномасштабной движущей силой глобального демографического процесса являются знания. В эпоху роста с обострением именно количество накопленных знаний выступает в качестве ведущей медленной переменной, к которой подстраивается численность населения. Однако с началом действия глобальных ресурсных и экологических ограничений роль основного регулятора численности постепенно переходит от количества накопленных знаний к скорости их производства. Высокая скорость жизненно необходима для преодоления внутренних противоречий цивилизации и противостояния permanently возникающим новым вызовам природы. При постоянной скорости производства знаний численность в конечном итоге стабилизируется на уровне

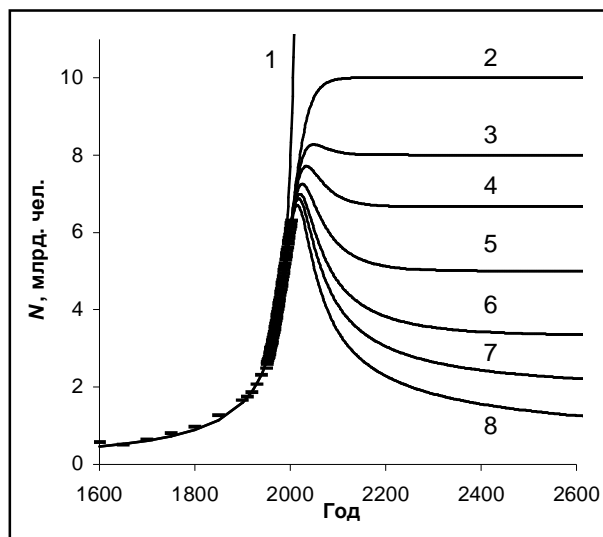


Рис. 5. Сценарии переходного периода. Параметры кривых см. в табл. 1.

не, обеспечивающем гомеостатическое сосуществование цивилизации и биосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блум Ф., Лейзерсон А., Хофстедтер Л. Мозг, разум и поведение. М.: Мир, 1988. 248 с.
2. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ, 1995.
3. Губайловский В. Избыточность доступа // Что нового в науке и технике. 2005. № 5. С. 26–35.
4. Долгоносов Б.М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов. М.: Либроком/URSS, 2009. 440 с.
5. Еремин А.Л. Ноогенез и теория интеллекта. Краснодар: Сов. Кубань, 2005. 356 с.
6. Малков А.С., Коротаев А.В., Халтурина Д.А. Математическая модель роста населения Земли, экономики, технологии и образования // Новое в синергетике: новая реальность, новые проблемы, новое поколение. М.: Наука, 2007. С. 148–186.
7. Мальтус Т. Опыт закона о народонаселении / Перевод И.А. Вернера. М.: Издание К.Т. Солдатенкова, 1895.
8. Поляков В.И. Неизбежность развития глобального экологического кризиса в XXI веке // Энергия. 2002. № 9. С. 42–49.
9. Хакен Г. Принципы работы головного мозга. М.: ПЕР СЭ, 2001. 351 с.
10. Dolgonosov B.M., Naidenov V.I. An informational framework for human population dynamics // Ecological Modelling. 2006. V. 198. P. 375–386.
11. Foerster H. von, Mora P.M., Amiot L.W. Doomsday: Friday, 13 November, A.D. 2026 // Science. 1960. V. 132. P. 1291–1295.
12. Vitousek P.M., Ehrlich P.R., Ehrlich A.N., Matson P.A. Human appropriation of the products of photosynthesis // BioScience. 1986. V. 36. P. 368–373.

**INFORMATIONAL AND ECOLOGICAL MECHANISMS
OF REGULATING THE GLOBAL DEMOGRAPHIC PROCESS**

© 2009 B.M. Dolgonosov

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow
E-mail: borismd@aqua.laser.ru

Civilization is considered a system producing knowledge. On this basis a model of global demographic dynamics is developed to describe the long epoch of hyperbolic growth and the current transient period, completed by establishing a homeostasis in the civilization–biosphere system.

Key words: *demographic process, informational dynamics, hyperbolic growth, transient period.*

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА НАКОПЛЕНИЯ ЗАПАСОВ ПОДСТИЛКИ В БОЛОТНЫХ БЕРЕЗНЯКАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ: ГЕОСТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

© 2009 Т.Т. Ефремова¹, А.Ф. Аврова², О.П. Секретенко³

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, г. Красноярск; e-mail: ¹efr2@ksc.krasn.ru;
²avrova@ksc.krasn.ru; ³sekretenko@forest.akadem.ru

В пространственном распределении подстилок болотных березняков выявлены три уровня вариабельности - трендовый, структурный, необъяснённый, которые обусловлены сочетанием типов леса, связанных с особенностями гидрологического режима, парцеллярной расчленённостью и континуальностью напочвенного растительного покрова. Построены эмпирические и модельные вариограммы распределения запасов подстилки. Корреляция запасов подстилки после вычитания трендовой составляющей значима. Радиус пространственной корреляции равен 38,5 метров, отношение наггет/плато 50% характеризует умеренный класс пространственной корреляции.

Ключевые слова: *пространственная структура, геостатистика, подстилка, болотные березняки.*

ВВЕДЕНИЕ

Проблема пространственной изменчивости запасов лесной подстилки относится к числу слабо изученных. Между тем подстилка является одним из главных источников питания древесных растений, служит вмещителем семенных запасов, горючих материалов, определяет лесопродукционный потенциал насаждений и, активно воздействуя на почвенные процессы, приводит к постепенному накоплению почвами новых признаков и свойств. В текущее время в связи с изменением планетарного климата активно обсуждаются биосферные функции лесной подстилки в качестве углеродаккумулирующей системы.

Среди древесных формаций изучением запасов лесной подстилки наименее всего охвачены березняки [12], и прежде всего гидроморфных местообитаний, несмотря на их широкое распространение. Так, на территории Западной Сибири болотные березняки занимают площадь 12,5 млн. га, что составляет 27,4% формационной структуры лесных болот данного региона [5]. Доминирующей является болотно-травяная, а также гипновая группа типов леса, которые слагаются крапивой, папоротниками, лабазником, вейниками, осоками, болотным разнотравьем, а также гипновыми и сфагновыми мхами.

Сложившаяся практика характеризует запасы подстилок на основании некоторого числа отобранных образцов, давая представление о среднем уровне накопления и его вариабельности, что не позволяет выявить истинные масштабы пространственной неоднородности.

Геостатистический подход обычно используется в тех исследованиях, где изучаемый пока-

затель распределен по территории непрерывно, то есть его величина может быть в принципе определена в любой точке исследуемой площади. Достаточно широко его применение встречается в почвоведении [2, 3, 6, 8, 9, 10, 13], в том числе для изучения пространственной структуры накопления лесной подстилки [1, 11]. Основой метода является построение эмпирических и модельных вариограмм, показывающих, насколько различны значения показателя в двух точках пространства в зависимости от расстояния (и направления) между ними. По известной модельной вариограмме величина показателя может быть рассчитана методом кригинга в произвольной точке пробной площади. С точки зрения практических исследователей самой привлекательной чертой геостатистики является стандартизация методологии, дающая возможность описать пространственную структуру, используя только два числа, одно из которых характеризует расстояние, за пределами которого исчезает корреляция, другое - интенсивность проявления корреляции. При этом явно или неявно предполагается, что значения изучаемого показателя различаются тем меньше, чем ближе друг к другу расположены в пространстве точки, в которых он измерен. Прикладные исследования обычно заканчиваются построением эмпирической и модельной вариограмм, без определения точности оценки их значений и параметров, и указанием класса пространственной корреляции по отношению величины необъясненной вариации к объясненной.

Однако остается ряд вопросов. В какой мере интерпретация вариограмм является субъективной? Какому пространственному рисунку может

соответствовать наблюдаемая вариограмма и каков механизм возникновения этого рисунка? Есть ли основания для утверждений относительно присутствия периодичности или других закономерных изменений в распределении признака по площади, или так может выглядеть случайно сформировавшийся пространственный рисунок? Сравнивая вариограммы, относящиеся к разным пробным участкам, может ли исследователь установить, что закон пространственного распределения признака на них различен? Или мы наблюдаем только разные реализации одного и того же закона? Разрабатываемый в последнее время подход, основанный на моделировании пространственной структуры явления и последующей статистической проверке наблюдаемого распределения на соответствие предложенной модели может решить такого рода вопросы [14, 17, 18]. В идеале, в виде математической модели формулируются представления о механизмах возникновения пространственной структурированности изучаемого показателя.

Цель данной работы состоит в количественном описании методами геостатистики закономерностей пространственного распределения запасов подстилки в болотных березняках на примере экологического профиля, в пределах которого наблюдается смена типов леса от крупнотравных до сфагново-мёртвопокровных.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Болотные березняки. Исследования проводились в междуречье Оби и Томи на одном из наиболее крупных лесоболотных массивов площадью 2,3 тыс. га, сложенного мощными до 6,5–7 м мезо-евтрофными торфами. К настоящему времени здесь сформировалась локально обособленная внутриболотная гидрографическая сеть, стержневыми элементами которой является речка Еловка и древний заторфованный тальвег в 100–140 м от русла, по которому весной аккумулируются потоки талых вод. Большая часть болота покрыта лесом. Изучались насаждения березы пушистой, окаймляющие береговой вал, представленные разнообразными типами леса. Дренированность торфяных почв, примыкающих к руслу внутриболотной речки, заметно возрастает. Вглубь торфяного массива изменяется уровень почвенно-грунтовых вод (рис. 1а), снижается их проточность, уменьшается плотность сложения и зольность торфяного субстрата, возрастает его кислотность, что обуславливает соответствующую смену доминирующих растительных группировок. Тренд типологического спектра плавно изменяется от крупнотравных типов леса до сфагново-мёртвопокровных. Не-

посредственно у береговой линии формируется папоротниково-крапивно-лабазниковый березняк, примыкает к нему вейниково-крапивно-лабазниковый, в заторфованном тальвеге находится вейниково-осоковый, далее вглубь болотного массива - зеленомошно-болотно-разнотравный березняк, за ним сфагново-мёртвопокровный. Таким образом, накопление подстилки в пределах группы типов болотных березняков определяется как гидрологическими условиями экотопа, так и характером напочвенного растительного покрова, закономерно изменяющегося по мере удаленности от дренирующего русла внутриболотной речки (рис. 1б). От береговой линии вглубь болота был проложен экологический профиль размером 270 м × 50 м. Здесь в течение трех лет (2004–2006 гг.) отбирались образцы по семидесяти точкам опробования с минимальным расстоянием между ними 10 м (рис. 2). Изучались средние за три года запасы подстилки.

Вариография. Одним из условий возможности применения методов геостатистики является стационарность, то есть среднее значение показателя должно быть постоянным на всем исследуемом участке. Если это условие не соблюдается, трендовая составляющая вычитается и вариограмма строится для регрессионных остатков. Тренд может быть или внутренний, то есть связывающий значения показателя с координатами, или внешний, если данные содержат информацию о пространственном распределении другого показателя, объясняющего направленное изменение изучаемой величины. Второе предпочтительней, так как в принципе модель поверхностного тренда должна иметь интерпретацию с точки зрения предметной области [14].

Для расчета эмпирической вариограммы, без учета направления прямой, соединяющей точки, применялась ее «классическая» оценка:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(r_i) - Z(r_i + h)]^2,$$

где r_i - координата i -той точки опробования, $Z(r_i)$ - значение показателя в этой точке, h -расстояние между двумя точками (лаг), $N(h)$ - число пар точек, отстоящих друг от друга на расстоянии h . При независимом распределении величина эмпирической вариограммы не отличается от выборочной дисперсии на любом расстоянии между точками отбора образцов.

Использовалась сферическая модель вариограммы:

$$y(h) = \begin{cases} C_0 + C(1,5h/Q - 0,5h^3/Q^3), & h \leq Q \\ C_0 + C, & h > Q \end{cases}$$

где C_0 - наггет-дисперсия, соответствующая необъясненной части вариации, C - структурная

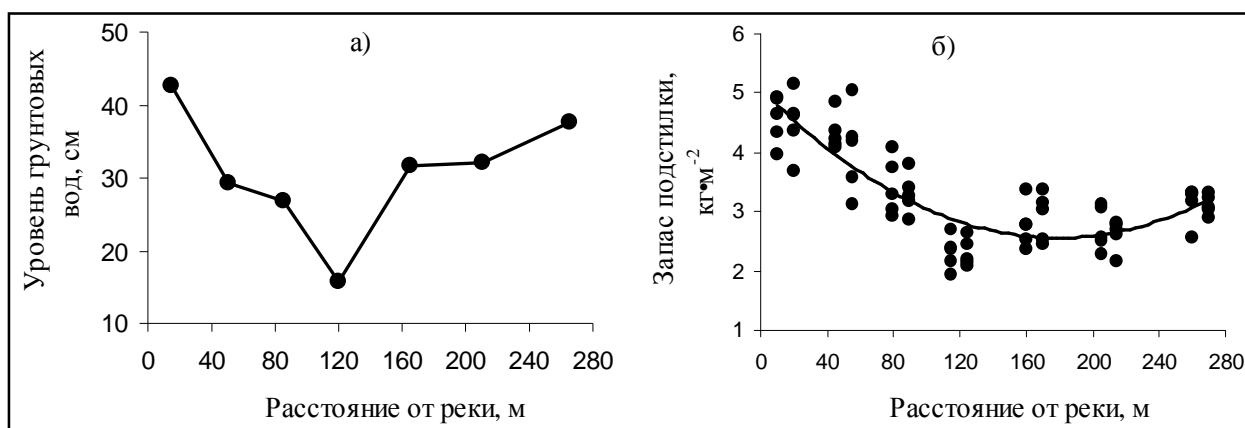


Рис. 1. Изменение уровня грунтовых вод (а) и запасов подстилки (б) в зависимости от расстояния до русла внутриболотной речки.

дисперсия, или объясненная часть вариации, Q - радиус корреляции, $C_0 + C$ - пороговая дисперсия, или плато [4, 8]. Параметры модельной вариограммы рассчитаны методом наибольшего правдоподобия.

Критические области принятия гипотез о виде распределении показателя по площади получены методом Монте-Карло. Последовательность проведения таких тестов для проверки соответствия характеристик точечных структур теоретическим моделям описана, например, в работах Д. Штояна [17, 18]. В геостатистике для всех точек с координатами, в которых измерены значения наблюдаемого показателя, генерируются его теоретические значения согласно выбранной модели, по этой реализации модели рассчитывается вариограмма. Этот цикл (генерация значений – расчет вариограммы) повторяется k раз [15]. Предлагаются величины $k = 99$ для уровня значимости $\alpha = 0.05$ и $k = 999$ для $\alpha = 0.01$ [18]. По всему набору полученных вариограмм для каждого лага находят максимальные и минимальные значения, получая таким образом верхнюю и нижнюю границы области принятия гипотезы о соответствии наблюдаемого распределения теоретическому [15]. Для моделирования независимого распределения применяется слу-

чайная перестановка наблюдаемых значений показателя при фиксированных координатах. Для проверки гипотезы о том, что на близких расстояниях значения показателя скоррелированы, в качестве модели распределения используется случайное гауссовское поле с ковариационной функцией и параметрами, соответствующими рассчитанной модельной вариограмме [14, 15].

Все вычисления выполнены в пакете geoR [14, 16], который является одним из модулей среды R, предназначенной для статистической обработки данных (<http://www.r-project.org>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В экогенетическом ряду мезо-евтрофных березняков выделено шесть типов лесной подстилки: сильноразложившаяся, среднеразложившаяся, корневищная (груборазложившаяся), торфянистая, оторфованная и торфяная. Подстилка того или иного строения приурочена в основном к конкретным типам леса. Полнопрофильная сильноразложившаяся подстилка формируется преимущественно в папоротниково-крапивно-лабазниковом березняке, примыкающем к руслу внутриболотной речки. Вглубь торфяного массива (по мере увеличения моховой растительности и болотного разнотравья в составе напочвенного покрова) строение подстилок упрощается: корневищная, оторфованная и торфянистая слагаются главным образом листовым и ферментативным подгоризонтами, торфяная - очесом сфагновых мхов. Мощность и запасы подстилок по мере удаления от русла речки изменяются соответственно: 5,7 см ($4,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$) > 4,7 (3,7) > 3,6 (2,1) < 4,5 (2,5) < 6,2 см ($3,0 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$). По профилю в целом средний запас подстилки $3,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$, минимальный - $1,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$, максимальный - $5,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}$ (рис. 3).

Каждая точка отбора образцов с номером i характеризуется четырьмя величинами - запасом подстилки Z_i , уровнем стояния почвенно-

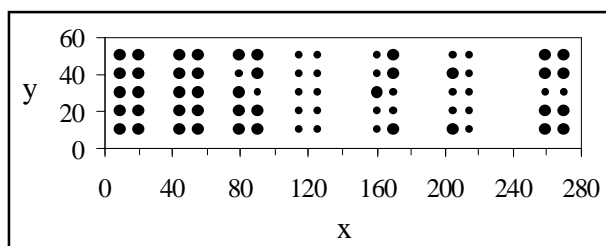


Рис. 2. Схема расположения мест отбора образцов подстилки на экологическом профиле, x - расстояние от русла внутриболотной речки, y - от границы профиля, м. Площади маркеров пропорциональны запасам подстилки.

грунтовых вод w_i , координатами x_i и y_i . Систематическое снижение, а затем возрастание запасов подстилки вдоль экологического профиля (рис. 1б) вызвано совместным влиянием двух гидрологических факторов - уровнем грунтовых вод w (рис. 1а) и их проточностью. С участков профиля, на которых грунтовые воды расположены близко к поверхности почвы, то есть значе-

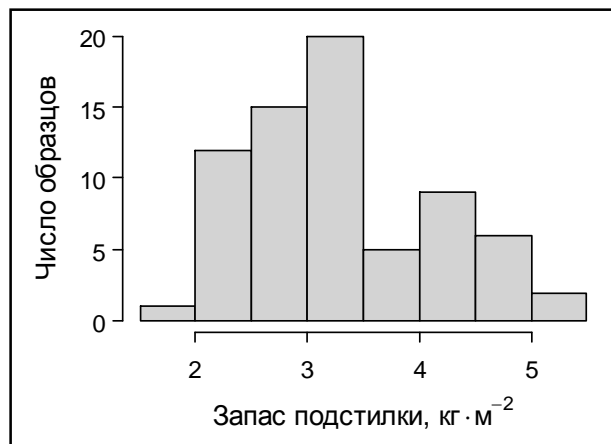


Рис. 3. Гистограмма распределения запасов подстилки в формации болотных березняков.

ния w_i малы, весенний паводок может уносить верхнюю рыхлую часть подстилки. Уменьшение проточности по мере увеличения расстояния x от русла внутриболотной речки приводит к тому, что более продуктивная травянистая растительность сменяется менее продуктивной. Зависимость запасов от этих показателей выражается уравнением линейной регрессии:

$$\hat{w}(w, x) = 2,22 + 0,061 \cdot w - 0,00635 \cdot x.$$

Коэффициенты уравнения значимы, $p < 0,001$; $R^2 = 0,71$. Таким образом, около 70% изменчивости запасов подстилки объясняется гидрологи-

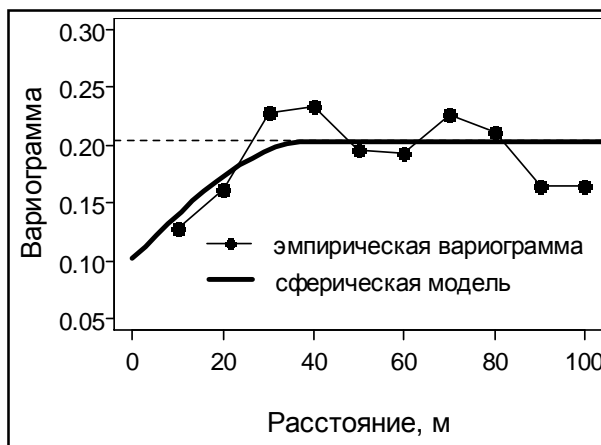


Рис. 4. Эмпирическая вариограмма регрессионных остатков запасов подстилки и ее аппроксимация сферической моделью (радиус корреляции 38,5 м, пороговая дисперсия 0,202, наггет-дисперсия 0,102). Пунктиром обозначена величина выборочной дисперсии (0,203).

ческими факторами. Попытаемся определить, какая часть пространственной вариабельности объясняется тем, что на более ли менее близких расстояниях величины запасов подстилки коррелируют между собой, так как продуцируются группировкой растительности одного и того же типа леса. Эмпирическая вариограмма, построенная для регрессионных остатков $R_i = Z_i - \hat{w}(w_i, x_i)$, на расстояниях 10 и 20 метров имеет значения, заметно меньшие, чем величина выборочной дисперсии, также можно ожидать, что предельное расстояние, на котором проявляется корреляция значений, составляет около 30 метров (рис. 4). Получены следующие параметры сферической модели вариограммы: радиус корреляции 38,5 м, наггет-дисперсия 0,102, пороговая дисперсия 0,202. Отношение двух после-

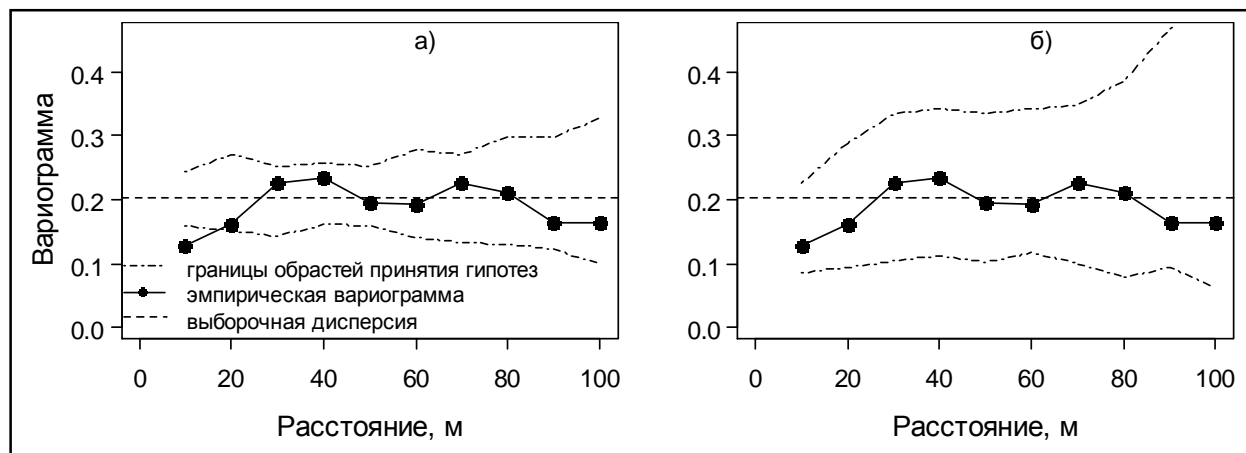


Рис. 5. Эмпирическая вариограмма и 99%-ные области принятия нулевых гипотез: а) о независимом распределении регрессионных остатков запасов подстилки по площади, б) о распределении в соответствии со сферической моделью. В каждом случае использовались по 200 имитаций соответствующих распределений.

дних величин составляет 50,5%, что соответствует классу умеренной пространственной корреляции [2]. Значение эмпирической вариограммы находится за пределами области принятия гипотезы о независимом распределении регрессионных остатков только для расстояния 10 метров (рис. 5а). Говорить о наличии двух максимумов (на расстояниях 35 и 70 метров, рис. 4) или о периодическом поведении вариограммы нет оснований, так как значения этих точек лежат внутри области принятия гипотезы о независимом распределении показателя. Пространственная корреляция описывается моделью гауссовского случайного поля со сферической ковариационной функцией и параметрами, соответствующие подогнанной ранее модельной вариограмме. Эмпирическая вариограмма не выходит за границы области принятия гипотезы о распределении остатков в соответствии с этой моделью (рис. 5б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены пространственные закономерности накопления подстилки в группе типов болотных березняков, различно удаленных от русла внутриболотной речки в пределах экологического профиля. Выявлены три уровня вариабельности – трендовый, структурный, необъяснённый. Трендовая составляющая связана с особенностями гидрологического режима (глубиной стояния почвенно-грунтовых вод и степенью их проточности), формирующего типологическое разнообразие болотных березняков. Структурная вариабельность (после вычитания тренда) определяется сочетанием типов леса, то есть своеобразием напочвенного растительного покрова. Необъяснённая вариабельность (нагетт-дисперсия), видимо, обусловлена парцеллярной расчленённостью и континуальностью фитоценоза. Построены эмпирические и модельные вариограммы распределения запасов, получены области принятия гипотез о независимом распределении показателя и о его распределении в соответствии со сферической моделью вариограммы., показано, что корреляция запасов подстилки после вычитания регрессионной составляющей значима. Отношение нагетт/плато, равное 50,5%, характеризует умеренный класс пространственной корреляции. Необъяснённое пространственное варьирование составляет 15%.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 08-04-92501.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благовещенский Ю.Н., Богатырев Л.Г., Соломатова Е.А., Самсонова В.П. Простран-

ственная изменчивость мощности подстилки в лесах Карелии // Почвоведение. 2006. № 9. С. 1029-1035.

2. Геостатистика и география почв [под ред. В. П. Красильникова]. М.: Наука, 2007. 175 с.

3. Гумматов Н.Г., Жиромский С.В., Мироненко Е.В., Пачепский Я.А., Щербаков Р.А. Геостатистический анализ пространственной изменчивости водоудерживающей способности серой лесной почвы // Почвоведение. 1992. № 6. С. 52–62.

4. 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. № 11. М.: ВИНТИ, 1999. С. 33–54.

5. Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Блойтен В. Биологическая продуктивность и углеродный пул фитомассы лесных болот Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2005. № 1. С. 29-44

6. Иванникова Л.А., Мироненко Е.В. Теория регионализированных переменных при исследовании пространственной вариабельности показателей агрохимических свойств почвы // Почвоведение. 1988. № 5. С. 113-121.

7. Кузякова И.Ф., Романенков В.А., Кузяков Я.В. Метод геостатистики в почвенно-агрохимических исследованиях // Почвоведение. 2001. № 9. С. 1132–1139.

8. Кузякова И.Ф., Романенков В.А., Кузяков Я.В. Применение метода геостатистики при обработке результатов почвенных и агрохимических исследований // Почвоведение. 2001. № 11. С.1365-1376.

9. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Дмитриев Е.А. Структуры пространственной вариабельности агрохимических свойств пахотной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1999. № 11. С. 1359–1366.

10. Сидорова В.А., Красильников П.В. Почвенно-географическая интерпретация пространственной вариабельности химических и физических свойств поверхностных горизонтов почв степной зоны // Почвоведение. 2007. № 10. С. 1168-1178.

11. Соломатова Е.А., Красильников П.В., Сидорова В.А. Строение и пространственная вариабельность лесной подстилки в ельнике чернично-зеленомошном Средней Карелии // Почвоведение. 1999. № 6. С. 764-773.

12. Честных О.В., Лыжин В.А., Кокишарова А.В. Запасы углерода в подстилках лесов России // Лесоведение. 2007. № 6. С. 114-121.

13. Corstanje R., Grunwald S., Lark R.M. Inferences from fluctuations in the local variogram about the assumption of stationarity in the variance // Geoderma. 2008. V. 143. P. 123–132.

14. Diggle P.J., Ribeiro Jr.P.J. Model-based geostatistics. NY.: Springer New York, 2007. 228 p.

15. Gneiting T., Sevcikova H., Percival D.B.,

- Schlather M., Jiang Y.* Fast and Exact Simulation of Large Gaussian Lattice Systems in R^2 : Exploring the Limits. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 2006. V. 15. P. 483-501.
16. *Ribeiro P. J. Jr., Diggle P. J.* GeoR: A package for geostatistical analysis // *R-NEWS*, 2001. V. 1. № 2. ISSN 1609-3631. P. 15–18.
17. *Stoyan D.* Basic Ideas of Spatial Statistics // *Statistical Physics and Spatial Statistics. Lecture Notes in Physics*. Springer, 2000. V. 554. P. 3-21.
18. *Stoyan D., Stoyan H.* Fractals, random shapes and point fields. Chichester: John Wiley and Sons, 1994. 389 p.

THE SPATIAL PATTERN OF ACCUMULATED BIOMASS LITTER IN A BOG BIRCH FOREST IN WESTERN SIBERIA: A GEOSTATISTICAL ANALYSIS

© 2009 T.T. Efremova¹, A.F. Avrova², O.P. Sekretenko³

V.N. Sukachev Forest Institute SB RAS, Krasnoyarsk; ¹efr2@ksc.krasn.ru;
²avrova@ksc.krasn.ru; ³sekretenko@forest.akadem.ru

The accumulation of biomass litter was measured at each of the 70 sampling locations in the 270x50 m transect in a bog birch forest. Nearly 70% of the spatial variation in the accumulated biomass of litter is explained by the drift of the properties of the ground water along the transect. Sample and model variograms were used to quantify the spatial correlation of the residuals from the corresponding linear model. The radius of the spatial correlation was estimated as 38.5 m, the nugget variance as 0.102, and the signal variance as 0.1. The statistically significant spatial correlation of the residuals is explained by the spatial structure of the vegetation.

Key words: *geostatistics, bog birch forest, litter, spatial pattern.*

СИНХРОННАЯ КВАЗИТРЕХМЕРНАЯ (Q3D) СЕКЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ БИОМАССЫ СООБЩЕСТВА ДЕРЕВЬЕВ

© 2009 В.В. Галицкий

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пушкино;
e-mail: galvv@rambler.ru

Представлен элемент архитектуры дерева - секция - и описаны модели свободно и несвободно растущего дерева и сообщества деревьев, использующие некоторые свойства секции. Модели демонстрируют ряд реальных свойств дерева и сообщества.

Ключевые слова: *секция дерева, виртуальное дерево, трехмерные модели дерева и сообщества деревьев.*

В работах [1, 2, 3] представлены двумерные модели растения и сообщества растений и некоторые результаты их анализа и применения. Эти модели показали свою адекватность при анализе «правила - 3/2» [4] и эффекта не монотонности динамики конкуренции в однородных сообществах деревьев [5, 6]. Однако при качественно соответствующем сути дела поведении количественные модельные результаты в некоторых случаях заметно отличаются от реальных. Это может быть связано с несоответствием трехмерного объекта и его двумерного представления. Ниже кратко описан подход к трехмерному моделированию динамики биомассы дерева и конкуренции в сообществе деревьев, исходящий из принципа «минимального угла зрения» [7].

СЕКЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СВОБОДНО РАСТУЩЕГО ДЕРЕВА

На примере ели вводится в рассмотрение элемент архитектуры дерева секция – стволовые мутовка с ветвями и междуузлие и, тем самым, выделяется секционная структура дерева [8, 9] (см. также [10]). Это дает возможность разложить известную динамику $B(T)$ биомассы¹ всего дерева в распределенную по высоте дерева систему динамик $b_i(T)$ биомасс составляющих дерево секций (T - возраст всего дерева). Динамика i -секции (акропетально - $i = 0, 1, 2, \dots$) начинается с появления на макушке дерева почки, дающей начало секционному осевому междуузлию, которое растет в высоту в течение сезона. В следующем сезоне ситуация повторяется для $(i+1)$ -секции.

Рассмотрим соотношение между биомасса-

ми реальной i -секции дерева и целого дерева, используя образ *виртуального i -дерева*. В момент T_i инициирования каждой новой i -секции дерево начинает реализовывать новую *виртуальную* динамику $B_i(T-T_i)$ биомассы виртуального дерева – верхней части всего дерева, начинающейся с этой i -секции ($B_i(x) = 0$ при $x = T-T_i, j=0$). С нулевой секции начинает реализовываться виртуальная динамика биомассы виртуального 0-дерева, которая совпадает с реальной: $B_0(T) = B(T)$. В момент T_{i+1} появляется следующее виртуальное $(i+1)$ -дерево, вложенное в предыдущие виртуальные деревья. Биомасса реальной i -секции есть разность биомасс виртуальных i - и $(i+1)$ -деревьев

$$b_i(T) = B_i(T - T_i) - B_{i+1}(T - T - \Delta T), \quad (1)$$

где ΔT - временной шаг появления секций.

Предполагая функции $B_i(x)$ монотонными и ограниченными (σ -функции²) можно получить ряд интересных (и реальных) свойств динамики биомассы секции. Модельный результат И.А. Полетаева [11] показывает, что рост дерева в высоту ограничен и может быть описан выражением

$$H(T) = H_m \tanh(T / A_2). \quad (2)$$

Согласно этому, в двумерных моделях [1,3] биомасса свободно растущего дерева описывается как заданная на всей положительной полуоси

$$B(T) = B_m \tanh^\mu(T / A_1), \quad (3)$$

где $\tanh(x)$ - тангенс гиперболический; A_1, B_m, A_2, H_m - размерные параметры, μ - аллометрический показатель, в случае изометрии равный 3. Рисунок 1 представляет нормированные на максимальные значения зависимости $H(T)$ и $B(T)$ при $A_1 = A_2$ и $\mu = 3$. Для описания динамики биомассы $B_i(T-T_i)$ виртуального i -дерева выражение, подобное выражению (3), используется далее с за-

¹ Термин *биомасса* здесь, как и в других работах автора, применяется для обозначения физиологически активной части массы растения. Соответственно, *фитомасса* - физиологически пассивная часть.

² Термин предложен Д.О. Логофетом.

менной параметра V_m на $V_{m,i}$. Из процедуры получения выражения (1) следует, что конкретный вид функции $V(T)$ не существует.

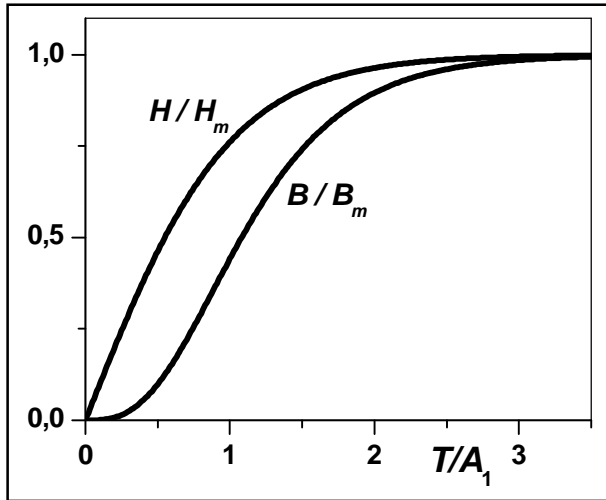


Рис. 1. Динамика высоты дерева и его биомассы

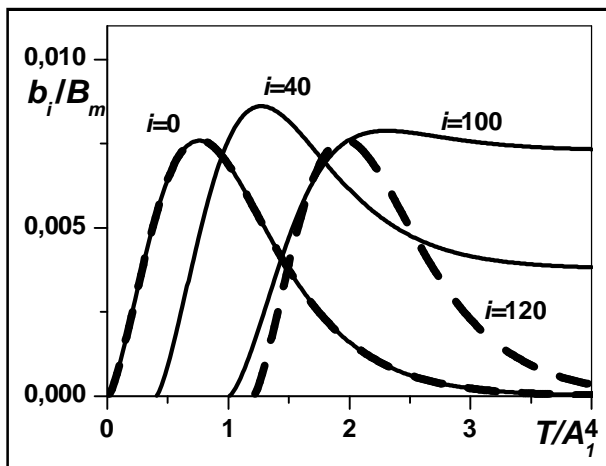


Рис. 2. Динамика биомассы секций.

Акропетальное оголение ствола. Из выражения (1) и предположения об идентичности σ -образных динамик $V_i(T-T_i)$ виртуальных деревьев следует, что динамика биомассы секции имеет колоколообразную форму, т.е. качественно отличается динамика для дерева. Из этого следует, что биомасса секций с возрастом акропетально оголяется, что действительно имеет место для многих видов деревьев. Колоколообразная форма динамики суммарной массы хвои ветви ели (и, следовательно, яруса из примерно пяти ветвей и соответствующей секции) была продемонстрирована с использованием метода возрастных рядов по натурным данным в работе [12]. На рис. 2 (штриховые линии) представлена динамика биомассы, вычисленная с использованием (1) и (4) для нескольких секций.

Невозможность σ -образной динамики фитомассы. Ограниченность или неограниченность динамики биомассы и фитомассы дерева при $T \rightarrow \infty$ не могут быть показаны непосредственно натурным наблюдением. Как известно, биомасса $V(T)$ является источником фитомассы $P(T)$ растения и, следовательно, в рамках детальности используемой модели дерева всю накопленную на момент T растением фитомассу можно описать неким интегралом от $V(T)$ в пределах от 0 до T . Предполагая, что интенсивность производства биомассой фитомассы не слишком быстро уменьшается с возрастом и учитывая σ -образность функции $V(T)$, можно заключить, что рост фитомассы дерева неограничен. Биологические аргументы для такого вывода смотри в работах [13, с. 9; 14, с. 55].

Предельная форма свободно растущего дерева. При идентичности динамик $V_i(x)$ виртуальных деревьев, означающей отсутствие зависимости виртуальной биомассы деревьев от высоты (от номера секции - меры высоты положения секции), предельная форма есть небольшое число (одна в пределе) живых секций (которые имеют существенную биомассу) на вершине дерева, занимающего область свободного роста - круг, т. е. нечто подобное зонтику. На рис. 3 представлена динамика распределений биомассы секций по высоте свободно растущего дерева для нескольких возрастов T . Некоторые формы деревьев, например, в саванне указывают, что этот эффект можно встретить в реальности (см. также [10, fig.22, p. 391]; 13, рис. 177, 187, с. 287, 300]).

Распределение биомассы по секциям. Наблюдения форм деревьев многих лиственных (и не только) видов деревьев зрелого возраста показывают, что акропетальное оголение ствола значительно замедляется, если не заканчивается на некоторой высоте (в отличие от идеального случая, рис. 3). Это значит, что динамика биомассы секций с большим номером i (большой высотой возникновения), возможно сохраняя «колоколообразную» форму, не обязательно стремится к нулю с увеличением возраста секции (рис. 2, сплошные). Для этого достаточно, чтобы величина $V_{m,i}$ в выражении (4) зависела бы некоторым образом от высоты H_i появления соответствующего виртуального i -дерева:

$$V_i(T, H_i) = V_{m,i}(H_i) \tanh^\mu(T/A_1).$$

При этом следует заметить, что зависимость биомассы $V_i(T, H_i)$ виртуального i -дерева от высоты H_i не отражается в заданной зависимости биомассы $V(T)$ всего реального дерева. Очевидно, что из (1) и (4) следует $V_i(T, H_i) > V_{i+1}(T, H_{i+1})$. Это соотношение следует также из физических соображений [11]. Можно предположить, что тип

зависимости

$$B_m(H_i) = B_m f_0(x), x = H_i / H_m, \quad (5)$$

который определяет форму распределения биомассы по секциям, может быть специфичным для биоморф деревьев. Функции $f_0(x)$ должны быть невозрастающими и уменьшаться от 1 в точке $x = 0$ до 0 в $x = 1$.

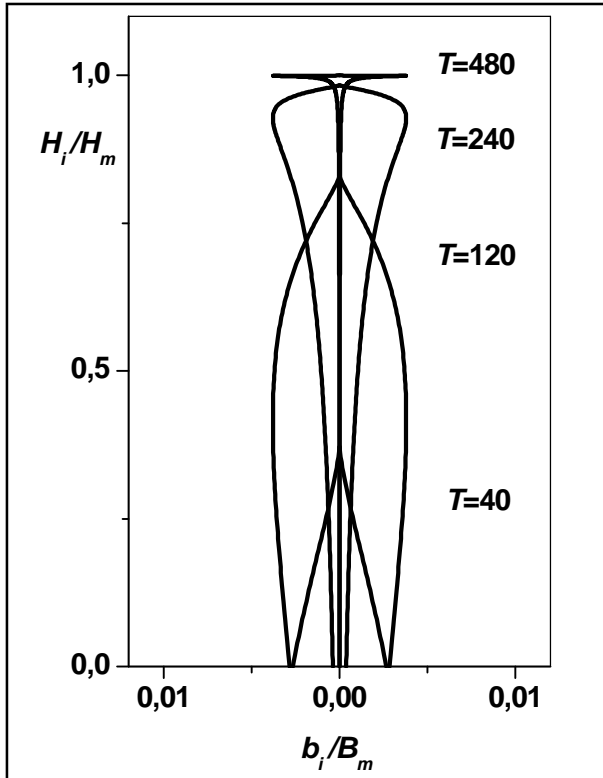


Рис. 3. Образование «зонтикообразной» формы дерева

примера распределения биомассы дерева по высоте ($f_0(x) = (1-x)^r$), иллюстрирующие сказанное (более подробно см. [10]).

СЕКЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЕРЕВА, РАСТУЩЕГО НЕ СВОБОДНО

Как и в двумерном случае [1, 2, 3], площадь территории, доступной дереву в сообществе, принимаем как меру доступных дереву ресурсов. Свяжем азимутальную структуру биомассы дерева и секций с формой и размером территории, на которой дерево растет. Свободно растущее дерево, очевидно, имеет годограф азимутального распределения биомассы в форме круга увеличивающегося с возрастом радиуса. Вполне естественно предположить, что если по какому-то азимуту форма территории не обеспечивает выполнение условий свободного роста, то для этого азимута рост биомассы будет замедляться и, вообще говоря, соответствующая часть биомассы начнет отмирать. Натурные наблюдения над соседними деревьями показывают, что нижние соприкасающиеся части крон между ними растут гораздо слабее, чем в противоположных направлениях, а рост верхних, вообще говоря, не зависит от азимута. Такое различие ситуаций с нижними и верхними частями кроны определяет необходимость использования трехмерных моделей конкуренции в сообществе.

Секция и секторы. Дерево в сообществе и составляющие его секции используют ресурсы и растут на части территории сообщества – полигоне Вороного (рис. 5, штриховая линия). Разобьем круг свободного роста (угол 2π) и, соот-

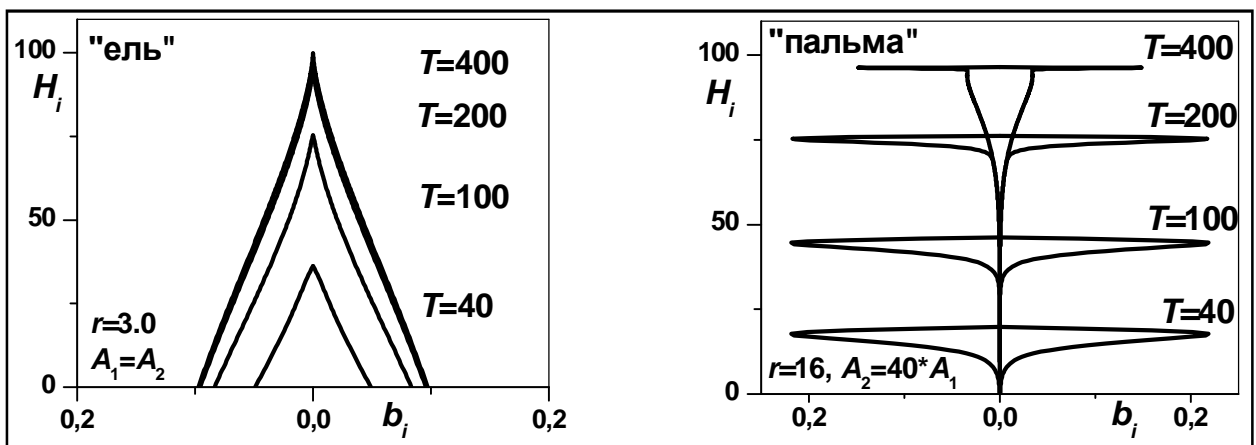


Рис. 4. Динамика распределения биомассы дерева по высоте (по секциям)

Другим источником разнообразия распределений биомассы дерева по секциям (по высоте) в рамках данной модели является соотношение масштабов времени A_1 и A_2 динамики биомассы и высоты в (1) и (2). На рис. 4 представлены два

ответственно, полигон на n_s одинаковых секторов и к каждому j -му сектору i -й секции применим с соответствующими изменениями уравнение, использованное при двумерном моделировании динамики биомассы дерева [3]:

$$db_{i,j} / dT = \kappa(T - T_i)(b_{i,j} / \tau(B, T) + f_1(b_{i,j} / b_{F,i,j})db_{F,i,j} / dT) - b_{i,j} / \tau(B, T), \tag{6}$$

$$\kappa(T - T_i) = \min(1, a_{i,j}(T - T_i) / a_{F,i,j}(T - T_i)), \tag{7}$$

$$\tau^{-1}(B, T) = (\alpha B^{k-1} + \tau^{-1}) / (1 + c_G(1 - \kappa(T - T_i))), \tag{8}$$

$$f_1(b_{i,j} / b_{F,i,j}) = (b_{i,j} / b_{F,i,j})^\gamma / (1 + c_G(1 - \kappa(T - T_i))), \tag{9}$$

где $a_{i,j}(T - T_i)$ и $a_{F,i}(T)$ площадь пересечения j -сектора полигона с кругом свободного роста и площадь, необходимая для свободного роста в возрасте T дерева соответственно, $b_{i,j}(T - T_i)$ и $b_{F,i}(T - T_i)$ биомасса данного сектора и свободно растущего сектора, αB^{k-1} удельные затраты на основной обмен биомассы B дерева ($0 < k < 1$),

$1/\tau_M$ удельная интенсивность производства фитомассы биомассой, c_G коэффициент дыхания роста [15], функция $f_1(x)$ существенна при возобновлении роста растения ($0 < \gamma < 1$). На рис. 5 представлена динамика годографов биомассы 0-секции дерева, растущего на полигоне.

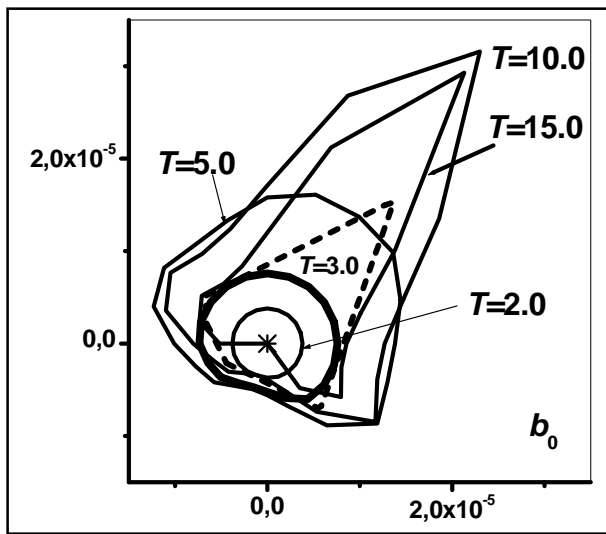


Рис. 5. Полигон и динамика годографов биомассы 0-секции.

На рис. 6 приведены модельные динамики биомассы дерева, растущего на полигоне, изображенном на рис. 5, при различных значениях масштабного коэффициента k_s (разных значениях площади полигона). В отличие от двумерной модели, секционная модель дерева показывает, что дерево, растущее на полигоне *любой* площади (рост «в цилиндре»), не отмирает и его биомасса выходит на стационарное значение, определяемое имеющейся площадью роста. Механика этого достаточно очевидна: секции нижней части кроны, последовательно достигающие предела площади полигона, со временем отмирают, но зато появляются свободно растущие секции в верхней части кроны. Этот существенный вывод указывает на то, что деревья в сообществе отмирают (сообщество изреживается) не непосредственно из-за недостатка площади (ресурсов), а из-за того, что недостаточность ресурсов приводит к уменьшению скорости роста дерева в высоту. Более подробно результаты данного раздела рассматриваются в [16].

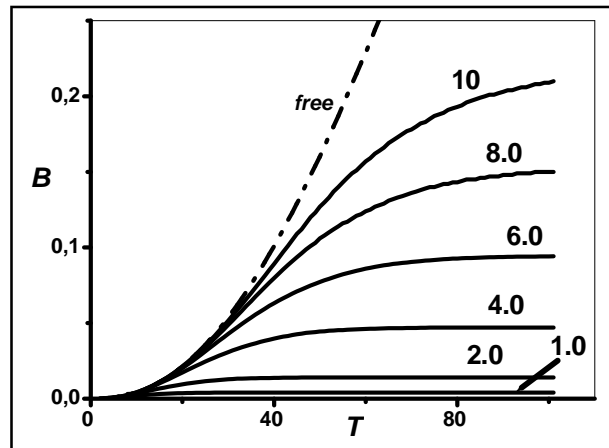


Рис. 6. Динамика биомассы дерева для полигона разной площади

СИНХРОННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СООБЩЕСТВА ДЕРЕВЬЕВ

Алгоритм *квazitрехмерной синхронной модели сообщества деревьев*, как и в случае двумерной модели состоит в следующем. На территории сообщества исходно по некоторой схеме размещаются модели деревьев. Каждому дереву путем построения мозаики Вороного ставится в соответствие часть территории (и соответствующие ресурсы). Каждое дерево развивается в соответствии с площадью территории, которой оно обладает, и явным образом не взаимодействует с соседями. Если в некоторый момент этой территории (ресурсов) стало недостаточно, то дерево начинает отмирать и при выполнении соответствующего условия оно считается отмершим. После отмирания дерева занимавшая им территория подлежит разделу по некоторым правилам между его соседями, что и является, собственно, явным взаимодействием деревьев в *модельном* сообществе. Соседи отмершего дерева, получив прибавку территории, могут, если они тоже находились на стадии отмирания, изменить свои намерения и продолжить рост.

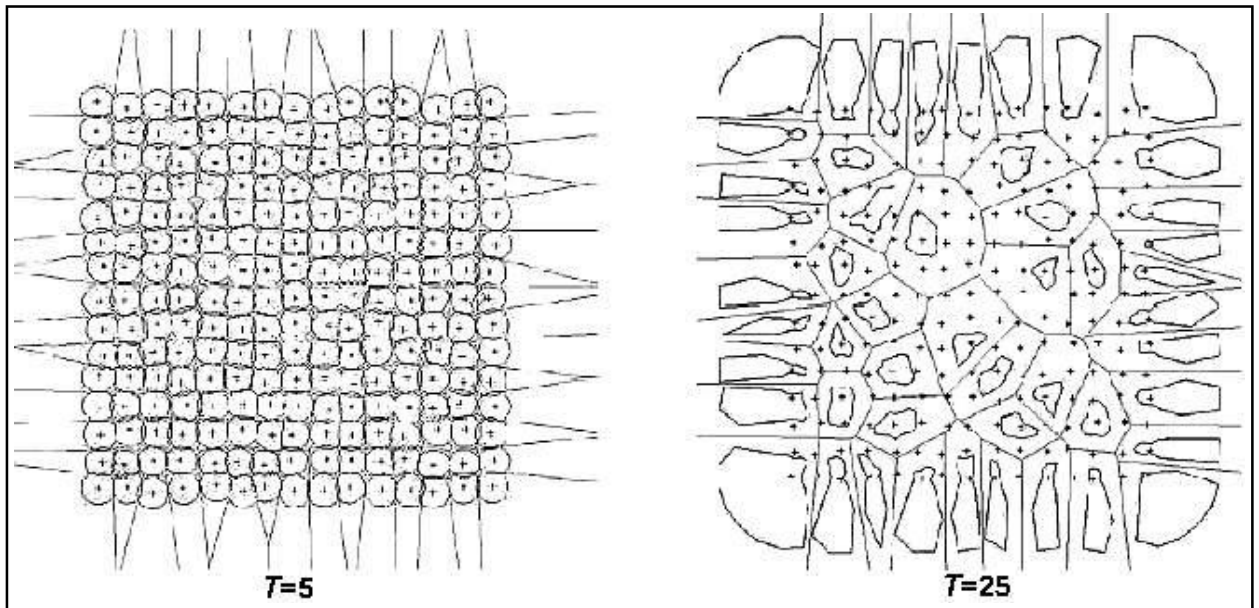


Рис. 7. Динамика мозаики Вороного и системы годографов биомасс деревьев в ходе изреживания сообщества

Очевидно, что в действительности члены сообщества взаимодействуют при использовании ресурсов не только в трагические моменты, но и в промежутках между ними. Поскольку, разделив между деревьями территорию сообщества, мы уже используем двумерные оценки ресурсов, приходящихся на дерево в сообществе, и соответствующий механизм взаимодействия функционирует во времени точно и радикально, то для непрерывного во времени взаимодействия деревьев остается лишь взаимодействие в третьем измерении, т.е. в ходе роста в высоту (подробнее см. [17]).

На рис. 7 представлены для двух моментов времени мозаики Вороного и годографы биомасс деревьев однородного сообщества [5, 6]. В качестве критерия отмирания дерева использовалось соотношение $B_i \leq \varepsilon_M B_{n,i}$, где B_i - биомасса i -го дерева, $B_{n,i}$ - величина средней биомассы деревьев, соседних по полигону Вороного к фокальному i -тому дереву, параметр $\varepsilon_M < 1$. Подобные эмпирические соотношения разной степени громоздкости между характеристиками фокального дерева и его соседей используются в качестве индексов конкуренции во многих работах по эмпирическому анализу влияния окружения дерева на его рост [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, трехмерные модели конкуренции должны отличаться от двумерных именно учетом различий в росте деревьев в высоту, связанных с различием в обеспечении их территорией (ресурсом). Очевидно, что различие в ско-

рости роста соседних деревьев должно приводить со временем к пространственной «десинхронизации» разновозрастных секций соседних деревьев и, соответственно, к необходимости поиска способов учета этого процесса в модели динамики биомассы дерева.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 06-04-49366).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галицкий В.В. Моделирование сообщества растений: индивидуально-ориентированный подход. I. Модель растения // Изв. РАН. Сер. биол. 1999. № 5. С. 539-546.
2. Галицкий В.В. Моделирование сообщества растений: индивидуально-ориентированный подход. II. Модель сообщества // Изв. РАН. Сер. биол. 2000. № 2. С. 178-185.
3. Galitskii V.V. The 2D modeling of tree community: from «microscopic» description to macroscopic behavior // For. Ecol. & Manag. 2003. V. 183. № 1 - 3. P. 95-111.
4. Галицкий В.В. Модельный анализ правила -3/2 для сообщества растений // Докл. РАН. 1998. Т.3 62. С. 840-843.
5. Галицкий В.В. О динамике интегральной меры конкуренции в сообществах растений различной степени однородности // Изв. РАН. Сер. биол. 2006. № 2. С. 156-164.
6. Galitskii V.V. Dynamics of competition in uniform communities of trees // Community Ecology. 2006. V. 7. P. 69-80.
7. Галицкий В.В., Тюрюканов А.Н. О методологических предпосылках моделирования в биогеоценологии. // А.Н. Тюрюканов. Избранные

- труды. М., 2001. С. 94-108.
8. Галицкий В.В. О динамике распределения по высоте биомассы свободно растущего дерева. Модельный анализ // Докл. РАН. 2006. Т. 407, Т. 4. С. 564-566.
 9. Галицкий В.В. Секционная структура дерева. Модельный анализ вертикального распределения биомассы // Исследовано в России. 2008. № 128. С. 1309-1320. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/128.pdf>
 10. Barthulomy 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.
 11. Полетаев И.А. О математических моделях биогеоэкологических процессов. // Проблемы кибернетики. № 16. М.: Наука, 1966. С. 175-177.
 12. Цельникер Ю.Л. Структура кроны ели // Лесоведение. 1994. № 4. С. 35-44.
 13. Серебрякова Т.И., Воронин Н.С., Еленевский А.Г. и др. Ботаника с основами фитоценологии: Анатомия и морфология растений. М.: Академкнига, 2006. 543 с.
 14. Тимирязев К.А. Жизнь растения. 8-е издание. М.: М. и С. Сабашниковы, 1914. 360 с.
 15. Makela A., Hari P. Stand growth model based on carbon uptake and allocation in individual trees. // Ecol. Model. 1986. V.33. P. 315 - 331.
 16. Галицкий В.В. Квазитрехмерная модель динамики биомассы дерева. // Исследовано в России. 2005. № 242. С. 2480-2490. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/242.pdf>
 17. Галицкий В.В. Синхронная квазитрехмерная секционная модель динамики биомассы сообщества деревьев // Исследовано в России. 2006. № 158. С. 1464-1471. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/158.pdf>
 18. Weigelt A., Jolliffe P. Indices of plant competition // J. Ecol. 2003. V. 91. P. 707-720.

SYNCHRONOUS QUASI-TRIDIMENSIONAL (Q3D) SECTIONAL MODEL OF DYNAMICS OF THE BIOMASS OF TREES' COMMUNITY

© 2009 V.V. Galitskii

Institute of physical-chemical and biological problems of soil science RAS, Pushchino;
e-mail: galvv@rambler.ru

The element of architecture of a tree - section is presented and models of tree, freely both not free growing, and the communities of trees using some section properties are described. Models present a number of real properties of a tree and community.

Keywords: *tree section, a virtual tree, three-dimensional models of a tree and community of trees.*

«СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ» (AB4) ЭМИССИИ CH₄ ИЗ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2009 М.В. Глаголев¹, А.Ф. Сабреков², Ш.Ш. Максютов³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
e-mail: m_glagolev@mail.ru

² Югорский Государственный Университет; e-mail: misternickel@mail.ru

³ Национальный институт изучения окружающей среды, Япония, г. Цукуба;
e-mail: shamil@nies.go.jp

«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 $5,1 \pm 2,4$ ТгС-CH₄/год.

Ключевые слова: метан, эмиссия парниковых газов, Западная Сибирь.

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, [11] 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 [6]. Особый интерес в этом отношении представляют болотные экосистемы России (занимающие вместе с заболоченными мелкоотторфованными землями примерно 21,6% ее территории [1]). 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 [15], а второй – в [11]. 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 обнадеживающие результаты). Задача данной работы состояла в обобщении результатов мониторинга региональной эмиссии метана с территории Западной Сибири в рамках иного подхода, называемого нами «стандартной моделью» (СМ). СМ представля-

ет собой совокупность периодов эмиссии метана (ПЭМ), электронной картографической основы и плотностей распределения вероятностей величин удельных потоков из типичных экосистем.

С появлением новых данных мониторинга СМ непрерывно совершенствуется, в связи с чем следует говорить об историческом ряде таких моделей. Для удобства было предложено обозначать СМ трехзначным кодом, в котором первый знак (*прописная буква латинского алфавита*) соответствует принятому в данной модели набору ПЭМ и *определяет тип модели*, второй (*строчная буква латинского алфавита*) – совокупности площадей различных типов болот и соотношению элементов микроландшафтов в них (*класс модели*), а третий (*цифра*) – системе типичных величин удельных потоков (*серия модели*).

В предлагаемой вниманию читателя работе мы описываем наиболее точную на сегодняшний день СМ Ab4. В ней средняя площадь пространственной единицы составляет около 1400 км², количество типичных ландшафтов увеличено до восьми. Также вновь пересмотрены характерные потоки за счет добавления большого массива новых измерений.

МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Региональный поток (F , ТгС-CH₄/год) вычисляется по формуле

$$F = \beta \cdot \sum_{k=1}^l F_k; \quad F_k = \sum_{i=1}^n f_{ik} \cdot S_{ik} \cdot T_k; \quad f_{ik} = \sum_{j=1}^m (\varphi_{jk} \cdot \alpha_{ijk});$$

где β - коэффициент пересчета мг в Тг ($\beta = 10^{-15}$); F_k (мгС-CH₄/год) поток метана из k -ой природной зоны ($k = 1, 2, \dots, l$, $l = 7$: $k = 1$ лесостепь,

$k = 2$ - подтайга, $k = 3$ - южная тайга, $k = 4$ - средняя тайга, $k = 5$ - северная тайга, $k = 6$ - лесотундра, $k = 7$ - тундра); f_{ik} (мгС-СН₄ м⁻² час⁻¹) удельный поток метана с болотных комплексов i -го типа в k -й природной зоне ($i = 1, 2 \dots n$, $n = 20$ в соответствии с типологией западно-сибирских болот Романовой, как она описана в [20]); S_{ik} (м²) - площадь болотных комплексов i -го типа в k -й природной зоне (для подсчета площадей использовали электронную карту болотных комплексов Западной Сибири [20]); T_k (час/год) период эмиссии метана в k -й природной зоне (тундра- 2472, лесотундра- 2880, северная тайга - 3312, средняя тайга - 3984, южная тайга - 4128, подтайга - 4632, лесостепь - 4824); α_{ijk} - доля ландшафта j -го вида ($j = 1, 2 \dots m$, $m = 8$: $j = 1$ приозерные сплавины, $j = 2$ мерзлые бугры, $j = 3$ гряды, $j = 4$ - олиготрофные мочажины, $j = 5$ - мезотрофные болота, $j = 6$ - эутрофные болота, $j = 7$ - внутриболотные озера, $j = 8$ - рямы) на болотах i -го типа в k -й природной зоне (численные значения α_{ijk} взяты из [20]); φ_{jk} - удельный поток метана из микроландшафта j -го вида в k -й природной зоне (величины φ_{jk} получаются статистическим моделированием в соответствии с эмпирическими распределениями вероятностей по методу обратного преобразования [13]).

Эмпирические распределения вероятностей удельных потоков метана (φ_{jk}) для каждого типичного микроландшафта всех природных зон Западной Сибири строили на основании собственных экспериментальных данных и опубликованных измерений других исследовательских групп [14; 18; 19; 8].

Измерения удельных потоков СН₄ осуществляли камерно-статическим методом как описано ранее см. [4; 5]. Эти измерения проводили в летне-осенние периоды, начиная с 1995 г., на десятках исследовательских полигонов (время и место измерений могло варьировать от года к году) во всех природных зонах Западной Сибири за исключением тундры и степи. Для болотных ландшафтов тундры в модели принимаются характерные удельные потоки, измеренные в воркутинской тундре и опубликованные в [2], а наличием болот в степи пренебрегаем. Конкретные исследовательские полигоны описаны нами ранее в публикациях, посвященных непосредственно экспериментальным исследованиям в той или иной природной зоне Западной Сибири - см. [3-5, 7-9].

Анализ неопределенности регионального потока, обусловленной неопределенностью удельного потока с микроландшафта J -го вида в K -й природной зоне проводили следующим образом. Все φ_{jk} при $J \neq j$, $K \neq k$ фиксировали на уровне

медиан их распределений, а для φ_{jk} оставляли принятое в модели вероятностное распределение.

При заданных таким образом φ_{jk} получали распределение регионального потока. В качестве численной оценки его неопределенности принимали разность третьей и первой квартилей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Квартили всех эмпирических распределений вероятностей удельных потоков СН₄ приведены в таблице 1. В основном эти распределения представляют собой (похожие на лог-нормальное) распределения «с длинным хвостом». Такие распределения действительно типичны для эмиссии метана – обсуждение этого вопроса и дальнейшие ссылки см., например, в [4]. Реже встречаются более симметричные распределения, похожие на нормальное. Наконец, есть распределения с несколькими максимумами. Если это не артефакт математического метода построения эмпирического распределения плотности вероятности, то последние могут получаться из-за объединения нескольких реальных классов объектов в рамках одного типичного класса ландшафта по [20]. Так, например, принято выделять крупномочажинные и мелкомочажинные комплексы [12], в то время как в [20] приводятся данные лишь для распространенности олиготрофных мочажин вообще.

Статистическое моделирование на основе СМ Ab4 дало достаточно логичную картину географического расположения источников метана (рис. 1), связанных, в основном, с подтайгой и южной, а также (в несколько меньшей степени) со средней тайгой; севернее для образования метана не являются оптимальными температурные условия, а южнее – гидрологический режим. Получающееся в результате моделирования значение регионального потока СН₄ с территории Западной Сибири составляет $5,1 \pm 2,4$ ТгС-СН₄/год.

Может показаться, что СМ дает лишь современный географический «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, существуют работы (например, [10, 16] и др.), посвященные как прогнозированию локальных экосистемных преобразований, так и моделированию смещения природных зон при возможном изменении климата. Таким образом, предсказание эмиссии СН₄ на основе СМ станет возможным при ее соединении с соответствующими биоклиматическими моделями.

Анализ чувствительности и неопределенности (табл. 2) показал, что по вкладу в неопределенность регионального потока типичные болотные ландшафты можно разделить на несколько групп. Нули в табл. 2 объясняются тем, что в данной зоне нет соответствующих ландшафтов (например, в тундре не может быть рямов и гряд). Но при этом следует различать две ситуации: действительное отсутствие данных ландшафтов в природе (как в только что приведенном примере) и недоработки электронной карты (в частности, очевидно, что переходные болота должны существовать и в средней, и в южной тайге). Наибольшие неопределенности имеют потоки из рямов и гряд средней и южной тайги, олиготрофных мочажин болот северной и средней тайги, эвтрофных болот южной тайги, подтайги и лесостепи, а также внутриболотных озер северной и южной тайги (порядка 10² ктС каждая).

Для использования СМ совместно с современными биоклиматическими моделями необходимо предусмотреть возможность описания сезонного хода эмиссии CH₄ (поскольку временной шаг в моделях часто принимается меньше года, например, 1 месяц). В связи с этим в Ab4 принята линейная зависимость эмиссии от температуры предыдущего месяца (если она положительна, в противном случае эмиссия принимается равной нулю). Принятая «зависимость с месячным за-

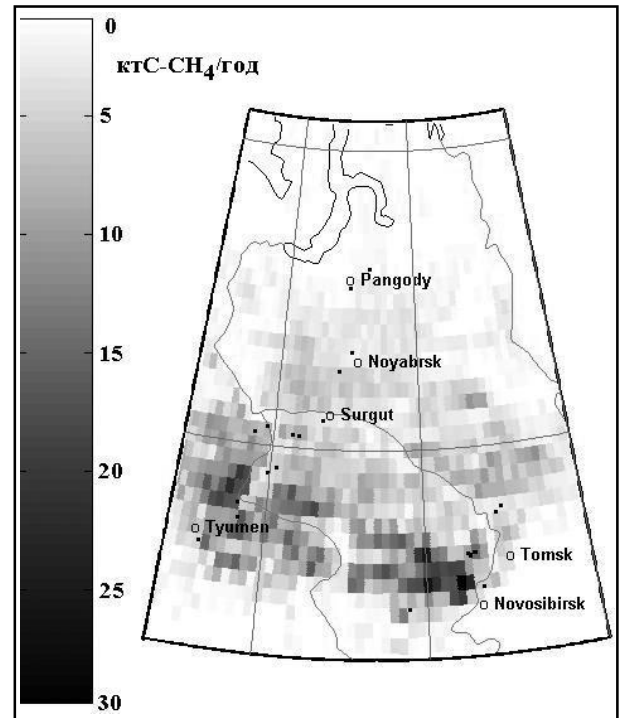


Рис. 1. Карта-схема годовой эмиссии метана, выдаваемая моделью Ab4. (Точками изображено местоположение основных исследовательских полигонов измерения эмиссии метана).

паздыванием» позволяет достаточно хорошо описать экспериментальные данные (рис. 2).

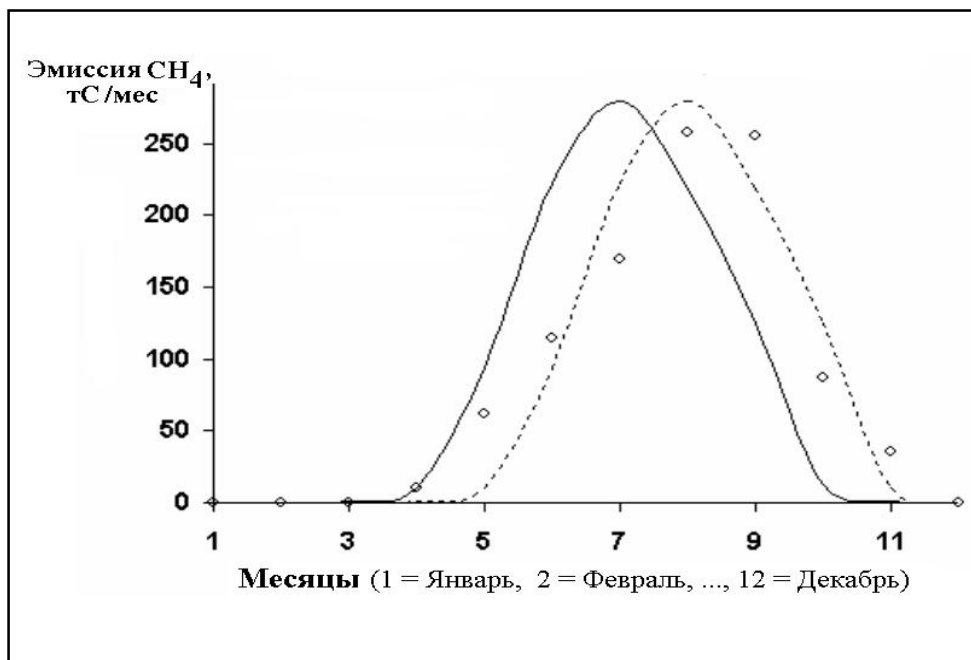


Рис. 2. Эмиссия метана в районе исследовательского полигона на Бакчарском болоте (из полуградусной ячейки с центром 59,75° с.ш., 82,25° в.д.). (Кружками изображены данные, пересчитанные из результатов измерений [17]; (непрерывной линией - расчет по модели, предполагающей зависимость средней эмиссии в текущем месяце от средней температуры воздуха текущего месяца; прерывистой линией - расчет по модели, предполагающей зависимость средней эмиссии в текущем месяце от средней температуры воздуха предыдущего месяца)

Таблица 1. Типичные величины потоков CH_4 ($\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$) 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 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			$\frac{0.45}{0.23, 0.65}$	$\frac{1.69}{0.94, 2.72}$			
Мочажины и гальи	олиготрофные	$\frac{0.06}{0.03, 0.42}$	$\frac{1.12}{0.77, 1.37}$	$\frac{0.34}{0.12, 1.53}$	$\frac{0.80}{0.15, 1.90}$	$\frac{2.98}{1.80, 4.30}$	$\frac{2.68}{1.88, 3.46}$
	мезотрофные	$\frac{0.47}{0.07, 1.82}$	$\frac{1.28}{0.70, 2.52}$	$\frac{0.68}{0.13, 4.64}$	$\frac{0.91}{0.21, 2.10}$	$\frac{4.00}{2.48, 7.50}$	$\frac{8.53}{2.47, 16.3}$
	эвтрофные			$\frac{1.97}{0.82, 2.47}$			
Приозерные сплавины	$\frac{4.81}{2.73, 7.07}$			$\frac{1.64}{0.55, 13.44}$			
Внутриболотные озера	$\frac{0.55}{0.26, 1.36}$		$\frac{1.40}{0.14, 2.74}$	$\frac{0.33}{0.10, 0.96}$	$\frac{5.30}{0.27, 23.66}$		

Таблица 2. Неопределенности потока CH_4 ($\text{кгС} \cdot \text{год}^{-1}$), вносимые в региональный поток типичными болотными экосистемами Западной Сибири.

Болотный ландшафт	Природная зона или подзона						Подтайга	Лесостепь
	Тундра	Лесотундра	Тайга					
			Северная	Средняя	Южная			
Мерзлые бугры	4.73	3.04	3.80	0.02	0	0	0	
Рямы	0	0	16.71	357.61	326.47	50.52	0.1	
Гряды	0	0	10.51	244.87	144.74	4.99	0	
Мочажины и гальи	олиготрофные	2.00	5.67	174.37	128.95	78.87	2.96	0
	мезотрофные	0.01	0.48	20.64	0	0	0.16	0
	эвтрофные	94.96	7.06	2.62	6.06	117.77	306.49	124.8
Приозерные сплавины	0	0.05	35.76	68.70	18.06	0.87	0	
Внутриболотные озера	2.77	6.46	131.60	1.73	208.04	4.59	0	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вомперский С.Э., Сири́н 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.
2. *Глаголев М.В., Смагин А.В.* Приложения MATLAB для численных задач биологии, экологии и почвоведения. М.; 2005. 200 с..
3. *Глаголев М.В., Суворов Г.Г.* Эмиссия метана болотными почвами средней тайги Западной Сибири (на примере Ханты-Мансийского автономного округа) // Доклады по экологическому почвоведению (электронный журнал), Вып. 6, № 2. С. 90-162. URL: http://jess.msu.ru/index.php?option=com_scibibliography&func=view&id=55&Itemid=121&catid=65.
4. *Глаголев М.В., Чистотин М.В., Шнырев Н.А., Сири́н А.А.* Летне-осенняя эмиссия диоксида углерода и метана осушенными торфяниками, измененными при хозяйственном использовании, и естественными болотами (на примере участка Томской области) // Агрохимия. 2008. № 5. С. 46-58.
5. *Глаголев М.В., Шнырев Н.А.* Летне-осенняя эмиссия CH_4 естественными болотами Томской области и возможности ее пространственно-временной экстраполяции // Вестник МГУ, сер. Почвовед. 2008. № 2. С. 24-36.
6. *Заварзин Г.А.* Микробный цикл метана в холодных условиях // Природа. 1995. № 6. С. 3-14.
7. *Казанцев В.С., Глаголев М.В.* Эмиссия CH_4 в подзоне северной тайги: «стандартная модель» Аа3 // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сб. науч. тр. кафедры ЮНЕСКО Югорского гос. ун. Вып. 1 Новосибирск. 2008. С. 200-207.
8. *Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г.* Углеродный

- обмен в криогенных экосистемах. М.: Наука. 2008. 344 с.
9. Клепцова И.Е., Корнюшенко Е.Г., Глаголев М.В. Эмиссия CH₄ в подзоне лесотундры: «стандартная модель» Аа3 // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата: Сб. науч. тр. каф. ЮНЕСКО Югорского гос. ун. Вып. 1. Новосибирск. 2008. С. 191-199.
 10. Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природной экосистем. М.: Наука. 2008. 427 с.
 11. 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.
 12. Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и Ко, 2001. 584 с.
 13. Харбух Дж., Бонэм-Картер Г. Моделирование на ЭВМ в геологии. М.: Мир. 1974.
 14. Слободкин А.И., Паников Н.С., Заварзин Г.А. Образование и потребление метана микроорганизмами в болотах тундры и средней тайги / Микробиология 1992. Т. 61, № 4. С. 683-691.
 15. 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. Res. & Inform. Office, 1998. - P. 79-111.
 16. Golubyatnikov L.L. // Международная конф. «ENVIROMIS-2008»: Тез. докл. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2008. С. 90.
 17. Maksyutov S., Inoue G., Sorokin M. Methane fluxes from wetland in west Siberia during April-October 1998 // Proc. of the Seventh Symp. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. – Tsukuba: Isebu. 1999. P. 115-124.
 18. Naumov A.V. Emission of CH₄ and CO₂ in connection with temperature conditions of peat bog soils in the northern taiga subzone // Proc. of the Intern. Field Symp. West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present 2001. P. 110-112.
 19. Naumov A.V., Huttunen J.T., Repo M.E. West Siberian peatlands: comparative study of greenhouse gas emission in middle taiga and forest tundraclimatic conditions // Proc. of the Second Intern. Field Symp. West Siberian Peatlands and Carbon Cycle: Past and Present Tomsk: Изд-во НТЛ, 2007. P. 132-135.
 20. 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.

«STANDARD MODEL» (AB4) OF CH₄ EMISSION FROM WEST SIBERIAN MIREs

© 2009 M.V. Glagolev¹, A.F. Sabrekov², Sh.Sh. Maksyutov³

¹ Moscow State University, Moscow; e-mail: m_glagolev@mail.ru,

² Center for Global Environmental Research; e-mail: misternickel@mail.ru

³ National Institute for Environmental Studies, Japan, Ibaraki, Tsukuba, Onogawa;
e-mail: shamil@nies.go.jp

«Standard model» presents summation of emission periods, cartographical foundation and density functions of probability distribution of methane flux's value from typical ecosystems. Regional CH₄ emission from West Siberian mires is estimated in 5,1±2,4 TgC-CH₄ per year on the basis of model Ab4.

Key words: *methan, emission of greenhouse gases, West Siberia.*

УДК: 574.45:581.524.442:630*43

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ КАЛЬЦИЯ В СЕВЕРОТАЕЖНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ

© 2009 Ю.С. Хораськина¹, А.С. Комаров², М.Г. Безрукова³, Н.В. Лукина⁴, М.А. Орлова⁴

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино; e-mail: yulia_hor@rambler.ru; ² as_komarov@rambler.ru; ³ work.message.system@gmail.com

⁴ Учреждение Российской академии наук Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, г. Москва; e-mail: lukina@cepl.rssi.ru

В данной работе представлены результаты моделирования динамики кальция в почвах северотаежных лесных экосистем. Модель представляет собой описание потоков вещества между пулами, включая подробное описание трансформации и минерализации лесной подстилки. Для калибровки модели использовались экспериментальные данные по северотаежным лесам.

Ключевые слова: круговорот кальция, математическое моделирование экосистем, вторичные минералы, выщелачивание, влияние pH.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что кальций – самый распространенный щелочноземельный элемент в земной коре, встречающийся как в магматических породах – гранитах, так и в метаморфических – базальтах. Благодаря своему ионному радиусу и заряду, Са часто встречается в алюминицево-силикатных минералах, таких как пироксен, амфибол и полевые шпаты, особенно в плагиоклазе. Осадочные породы – известняк, доломит, гипс и фосфориты богаты Са. Благодаря большому количеству, заряду и слабой способности к гидратации ион Са сильнее связывается глинами и гуматами по сравнению с другими катионами металлов. Са относительно легко выветривается как растворенный катион из первичных и вторичных минералов, но скорость выветривания значительно зависит от pH раствора (Likens et al., 1998).

Кальций – жизненно необходимый элемент для прокариот, грибов, растений и животных. Для растений является важным регулятором роста и развития, а также входит в состав ряда ферментов. Концентрация кальция в живых организмах, где он является структурным элементом, довольно высока. Са плохо выщелачивается из живых листьев благодаря относительной иммобилизации в пектатах клеточных стенок и мембранах.

Неорганический кальций почвах присутствует как структурный компонент первичных и вторичных минералов, почвенного поглощающего комплекса (ППК) и как катион почвенного раствора. Благодаря ионному заряду ион Са не так быстро теряется почвами с большой катионно-обменной емкостью, по сравнению с кислыми почвами с высоким содержанием обменного алюминия. В ППК из щелочно-земельных металлов больше всего кальция и поэтому он очень

важен для регуляции кислотности почв.

Кальций поступает в лесные экосистемы с атмосферными выпадениями и в результате выветривания минералов. После освобождения в ходе разложения и минерализации органического вещества ион Са поступает в почвенный раствор, из которого может адсорбироваться в ППК, поглощаться растениями или микроорганизмами или выщелачиваться из почвенного профиля (Likens et al., 1998).

В этой работе мы попытались описать динамику кальция в лесной экосистеме с помощью достаточно простой математической модели. Кальций поглощается растениями из почвенного раствора, в биомассе растений он накапливается, после отмирания растений или их частей переходит в органические остатки (опад), которые затем минерализуются в почве. При этом Са переходит в доступную для растений форму (ионы почвенного раствора и ППК) и вновь поглощается растениями. Часть доступного кальция участвует в образовании новых минералов (оксалаты кальция) или выщелачивается вниз по профилю. Вынос кальция из лесной экосистемы осуществляется за счет внутрпочвенного стока, поверхностного стока и стока с грунтовыми водами, а также при вырубке и отчуждении биомассы за пределы экосистемы.

Биогеохимический круговорот в экосистемах северной тайги обладает следующими особенностями. Растительные остатки в этих условиях разлагаются медленно, растворимые продукты быстро удаляются из почвы с просачивающимися водами. В результате в верхней части почвы накапливается преимущественно грубый кислый гумус, поглощающий комплекс резко ненасыщен Са и Mg. Для тайги характерен азотный тип химизма биологического круговорота ($N > Ca$), в

широколиственных – кальциевый $Ca > N$. В холодной тайге разложение органических веществ протекает медленнее, микроорганизмы работают менее энергично, время их деятельности меньше, некоторые группы бактерий отсутствуют. Масса подстилки более чем в 10 раз превышает опад зеленой части, что свидетельствует о заторможенности биогеохимического круговорота (Башкин, 2004).

Известные модели биологического круговорота биофильных элементов в лесных экосистемах обычно включают в себя подробное описание почвенной части круговорота и детально рассматривают химию почвенного раствора на основе уравнений равновесия ионного обмена. При этом описание растительности во всех моделях оказывается слишком упрощенным.

Так, например, модель PROFILE разработана в Швеции, в Университете Лунда, первоначально для решения проблем закисления почв (Sverdrup, 1996.). Модель рассчитывает химию почв в равновесном состоянии, в котором все поступление кислоты в почвенную систему сбалансировано процессами выветривания, потребления азота или выноса кислоты из системы. Эта модель используется для расчета скорости выветривания исходя из геохимических свойств почв, таких как механический и минералогический состав, все входные данные могут быть изменены по почвенным образцам.

PROFILE является статической моделью, она не отвечает на вопрос о скорости подкисления или скорости восстановления почвенного профиля. С этой целью применяется динамическая модель – SAFE. Эти модели являются частью системы моделей ForSAFE, в которую входят также модель DECOMP разложения органического вещества почвы, гидрологическая модель, и модель MAKDEP, описывающая рост леса. Таким образом, если рассматривать комплекс моделей, то можно описать динамику круговорота основных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), которые в модели рассматриваются суммарно (Sverdrup, 1996, Walse, 1998).

Тем же целям отвечает и NuCM – модель, описывающая круговорот элементов минерального питания с дневным, недельным или месячным шагом, разработанная в 1988 коллективом авторов (Johnson et al., 2000) для хвойных и широколиственных лесных экосистем для имитации влияния атмосферных выпадений, вырубки лесов, изменения количества осадков, повышения температуры и уровня CO_2 и известкования почв. Описывает круговорот N, P, K, Ca, Mg и S на уровне насаждения, также включает в себя потоки главных катионов (H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+),

анионов (NO_3^{-2} , SO_4^{-2} , Cl^{-1} , HCO_3^{-} , ортофосфат, органические ионы) и кремния в осадках, лизиметрических водах и почвенном растворе. Конструкция модели опирается на химию почв и почвенных растворов. Экосистема представлена в модели в виде ряда растительных и почвенных слоев.

Цель данной работы – разработать модель динамики пулов кальция в лесной почве, для связи динамики пулов кальция с динамикой пулов органического вещества и азота почвы, опираясь при этом на экспериментально определяемое минимальное число уравнений и коэффициентов модели. В соответствии с этой целью можно выделить следующие задачи: 1. учет содержания органического вещества в почвенных горизонтах для возможности определения начальных состояний соответствующих пулов кальция; 2. использование значений скоростей минерализации органического вещества, полученные в модели динамики органического вещества почвы ROMUL (Chertov et al., 2001; 3. описание специфической задержки доступного кальция в форме вторичных минералов в отдельном пуле и поиск условий его включения в общую динамику пулов кальция; 4. при условии, что в северотаежных лесах можно предположить стационарность динамических процессов, провести калибровку коэффициентов, 5. учесть различия между динамикой пулов кальция и динамикой пулов органического углерода и охарактеризовать их поправками к коэффициентам модели ROMUL, как это было ранее сделано для динамики пулов азота.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В нашей модели мы будем придерживаться следующей схемы почвенного профиля для северотаежных экосистем. Мы выделяем в отдельный пул доступный для растений (и микроорганизмов) кальций – A_v , включая в него кальций почвенного раствора и обменный кальций. Поскольку в модели не будет введена отдельно жидкая фаза – почвенный раствор, то этот пул выступит неким его аналогом. Выделены пулы в следующих почвенных горизонтах и подгоризонтах:

L_{Ca} – пул кальция в свежем и неразложившемся опаде, содержится в верхнем подгоризонте подстилки.

F_{Ca} – В этом подгоризонте находятся полуразложившиеся и разложившиеся растительные остатки. Здесь же сосредоточена основная масса вторичных минералов кальция – оксалатов.

H_{Ca} – пул кальция в гумусовом подгоризонте, содержащем грубый гумус

$A1_{Ca}$ – пул в минеральном горизонте, содержащем светлый гумус, связанный с минеральными частицами, этот горизонт формируется с участием дождевых червей.

B – пул кальция минерального горизонта (Е-подзолистый), который обеднен кальцием вследствие вымывания.

C – пул кальция в минеральном горизонте, обогащенном кальцием за счет вмывания из вышележащих. В этой статье динамика трех последних пулов не рассматривается. Для L_{Ca} и F_{Ca} пулы делятся на фракции соответственно фракциям поступающего опада – хвоя, ветви, древесина, кора, толстые и тонкие корни. В пулах H_{Ca} и $A1_{Ca}$ эти фракции объединяются соответственно в один пул. В H_{Ca} и $A1_{Ca}$ кальций включается в состав органо-минеральных комплексов, образуя фульваты (растворимые) и гуматы (слаборастворимые) кальция. Большая часть этих соединений представлена фульватами.

Существует еще несколько «внегоризонтных» пулов.

Sm – пул вторичных минералов кальция – веделитов и ведделитов – оксалатов кальция. Эти минералы растворимы и образуются в подстилке при недостатке влаги или поступают с опадом, образуясь в клетках растений. Вследствие

малого количества материалов по динамике этих минералов, мы предполагаем следующее, основываясь на известных нам данных (Stomask, 1978). В процессе разложения опада и подстилки часть кальция осаждается в виде оксалатов в размере 1/3 от высвободившегося кальция. Остальная часть поступает в доступный пул. В течение года этот кальций накапливается в пуле Sm . Весной, при достижении почвой положительных температур, что можно считать началом снеготаяния, происходит растворение части вторичных минералов и растворенный кальций из Sm поступает в Av . Далее кальций опять накапливается в Sm .

$Amin$ – 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 растениями. Соответствует необходимому количеству кальция для годового прироста растений и определяется по биомассе прироста и концентрации кальция в отдельных органах доминирующих растений. Изъятие производится один раз в год из пула доступного кальция в тот же месяц, когда происходит

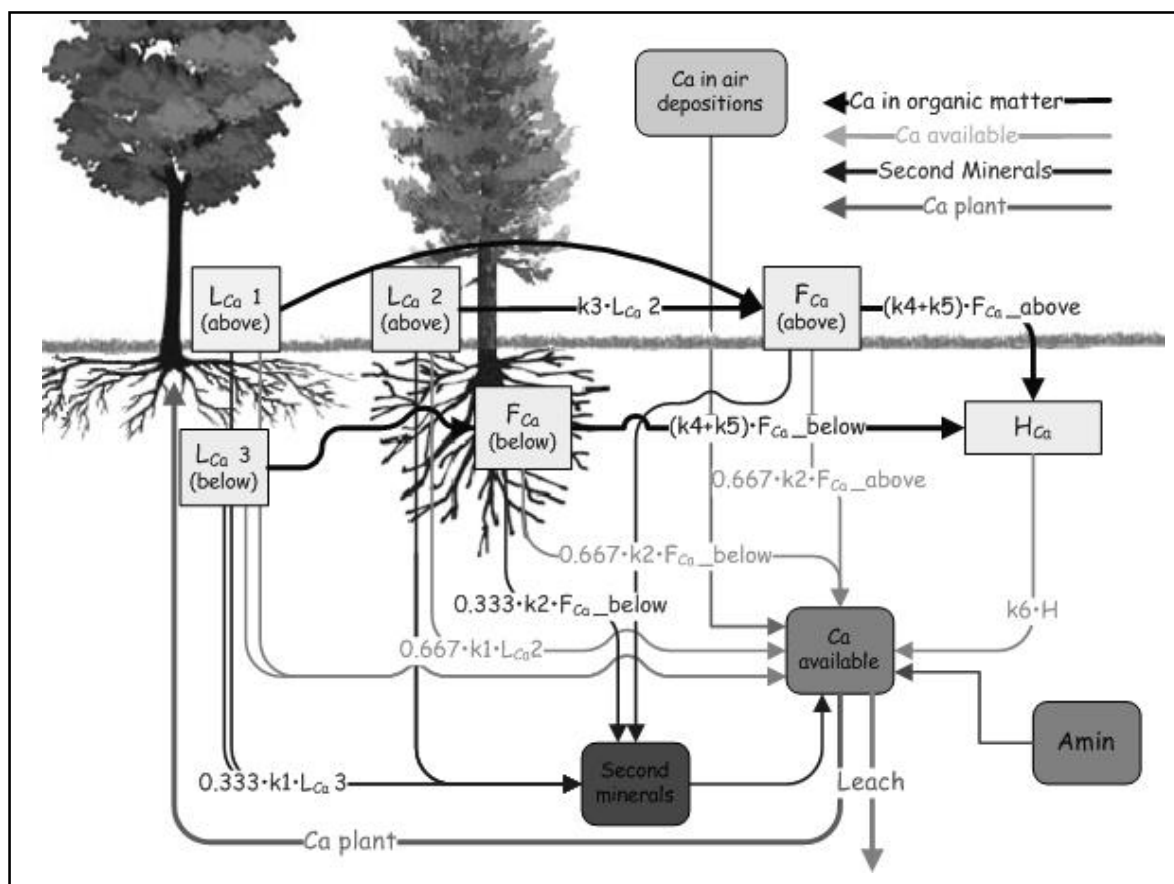


Рис. 1. Схема модели круговорота кальция.

поступление туда кальция вторичных минералов.

Dep – 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 из почвенного профиля.

Между описанными выше горизонтами происходит трансформация органического вещества и его минерализация и, соответственно, переход кальция из одного пула в другой. Эти процессы описываются в виде следующих уравнений для одной фракции опада:

$$\begin{aligned} dL_{Ca}/dt &= -R_1 * L_{Ca} - R_3 * L_{Ca} \\ dF_{Ca}/dt &= R_3 * L_{Ca} - R_2 * F_{Ca} - R_4 * F_{Ca} - R_5 * F_{Ca} \\ dH_{Ca}/dt &= R_4 * F_{Ca} - R_6 * H_{Ca} \\ dA1_{Ca}/dt &= R_5 * F_{Ca} - R_7 * H_{Ca} \\ dA_v/dt &= A_{min} + Dep - Plant - Leach + 2/3 * (R_1 * L_{Ca} + R_2 * F_{Ca} + R_6 * H_{Ca} + R_7 * H_{Ca}) + Sm(1) \\ Sm &= 1/3 * (R_1 * L_{Ca} + R_2 * F_{Ca} + R_6 * H_{Ca} + R_7 * H_{Ca}) \end{aligned}$$

Коэффициенты в уравнениях системы (1) так же, как и в модели ROMUL, зависят от температурно-влажностных условий и содержания азота и зольности соответствующей фракции опада. R_1 – скорость минерализации пула L_{Ca} . R_3 – скорость трансформации L_{Ca} в F_{Ca} . R_2 и R_4 – соответствующие скорости минерализации и трансформации горизонта F_{Ca} в H_{Ca} . R_5 – скорость трансформации F_{Ca} в $A1_{Ca}$. R_6 – скорость минерализации H_{Ca} . R_7 – скорость минерализации $A1_{Ca}$. k_4, k_5, k_2, k_1, k_6 в модели ROMUL зависят от pH.

В качестве начальных значений коэффициентов мы принимаем значения, вычисленные для динамики пулов органического вещества в модели ROMUL. Это позволит в дальнейшем найти условия стационарного состояния для динамики пулов органического вещества, а затем определить поправки к соответствующим коэффициентам для пулов кальция, также обеспечивающим стационарную динамику этих пулов.

Рассмотрим некоторые особенности модели ROMUL. В ней различаются три типа пулов органического вещества: опад, подстилка и гумус. При этом опад и подстилка могут быть наземными и подземными (происходящими из корне-

вого опада), различаясь при этом температурно-влажностными условиями. При этом модель описывает динамику произвольного количества фракций наземного/подземного опада и соответствующей подстилки, и пула гумуса.

Все фракции и пулы различаются скоростями разложения, зависящими от содержания азота и зольности фракции (Моделирование динамики..., 2007). На каждом шаге по времени каждая фракция (надземная или подземная) опадом разлагается, при этом часть переходит в соответствующий пул подстилки, а другая минерализуется и уходит в виде CO_2 . Соответственно разложившиеся части подземных (корневых) опадом переходят в пул, который в модели ROMUL называется лабильным гумусом (подземной подстилкой). Затем подстилка преобразуется частично в стабильный (более медленно разлагающийся) гумус, частично минерализуется с выделением CO_2 . Модель работает с месячным шагом, при этом на каждом шаге меняются климатические условия, от которых зависят коэффициенты разложения фракций (Моделирование динамики..., 2007).

Для верификации и калибровки модели ROMUL было проведено моделирование динамики пулов органического вещества на примере ельника-зеленомошно-кустарничкового, произрастающего на Al-Fe-гумусовых подзолах в автономных позициях ландшафта и являющегося наиболее распространенным на Кольском Севере типом еловых биогеоценозов (Лукина, Никонов, 1996). Данный тип леса представляет собой разреженный разновозрастный северотаежный ельник примерно 200-летнего возраста.

Использовался сценарий с 7 фракциями опада (хвоя, ветви, корни, ствол ели, кустарнички и травы, зеленые мхи и корни напочвенного покрова) (Табл. 1). Фракции отличались по содержанию азота, кальция и зольных элементов, а также распределением опада в течение года. Межгодовых колебаний количества опада и содержания в нем элементов питания не производилось. Моделирование проводилось на 200 лет при стационарном климате.

Таблица 1. Характеристика фракций опада

Фракция опада	Хвоя ели	Ветви ели	Корни ели	Ствол ели	Кустарнички и травы	Мхи	Корни напочвенного покрова
Концентрация азота, %	0.78	0.675	0.37	0.2	1.2	1.78	0.47
Концентрация зольных веществ, %	2.8	1.65	0.9	0.29	2.45	2.4	0.99
Концентрация кальция, %	1.3	0.5	0.37	0.12	0.62	0.5	0.13

Таблица 2. Начальные значения пулов, кг/м²

	Кальций	Азот	Органическое вещество
F	0.025	0.04	4.58
H	0.0004	0.025	0.3
Доступный кальций	0.0118		
Ежегодное потребление кальция	0.001841		

При этих входных данных (Табл. 2) и сценариях органическое вещество почвы и соответствующие пулы азота находятся в стационарном состоянии (Рис. 2). Отметим, что для коэффициентов в ROMUL учтены поправки на рН (Динамическое моделирование..., 2007).

Атмосферные выпадения, выветривание и выщелачивание принимались равными нулю. Поступление кальция с опадом за год принималось равным потреблению растениями кальция за год. Дальнейшая калибровка модели для описания динамики пулов Са состояла в поиске поправочных коэффициентов для скоростей разложения k_1 - k_6 модели (1). Мы предполагаем, что общая схема преобразования органического вещества описывается моделью ROMUL, а дина-

мика кальция либо опережает (тогда поправка к соответствующему коэффициенту будет больше 1, либо запаздывает по сравнению с динамикой органического вещества (тогда поправка меньше 1). При этом мы опирались на следующие соображения. Часть кальция из F_{Ca} со скоростями R_4 и R_5 переходит в гумус вместе с органическим веществом почвы и закрепляется в нем (пул H_{Ca}). Наличие коэффициента R_5 определяется участием или не участием в разложении червей. В современных бореальных лесах червей мало и можно оставить только коэффициент R_4 , когда идет грибное разложение без участия червей. Таким образом, поправочный коэффициент для k_5 равен 0. При синтезе гумусовых веществ в бореальных лесах образуется очень мало гуматов и фульватов кальция (фракции гумуса, связанные с кальцием, определяются как 2 фракция по методу Плотникова). Слаборастворимыми соединениями являются в основном гуматы кальция, фульваты более растворимы и в них кальций задерживается на меньшее время и в меньших количествах. Исходя из того, что в северных лесах 2-й фракции гуминовых кислот очень мало, мы считаем, что кальций в горизонт H переходит в малых количествах и в основном в виде фульватов. Поэтому мы вводим поправку для уменьшения k_4 (и скорости связывания Са с

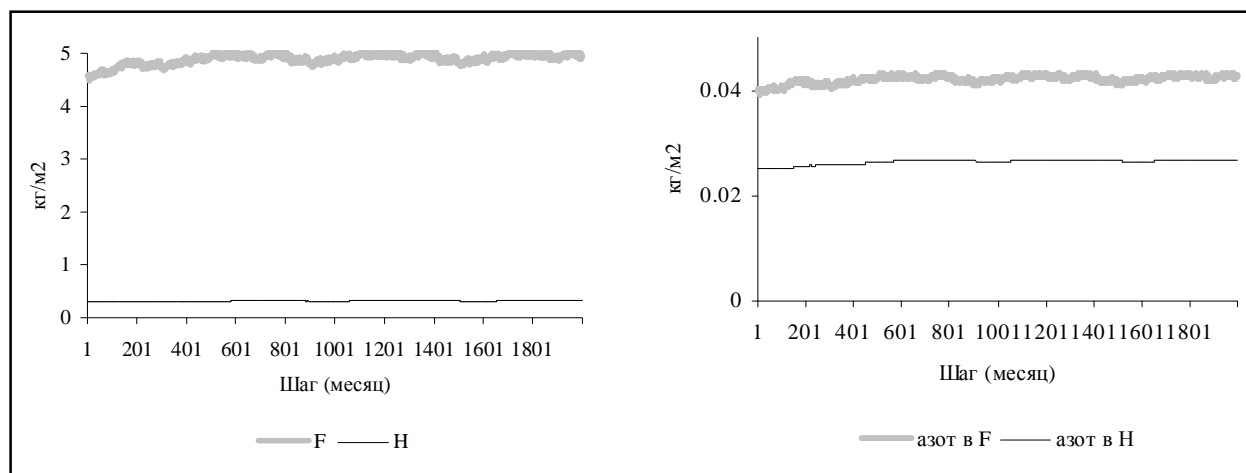


Рис. 2. Динамика пулов органического вещества (слева) и азота (справа) в ельнике зеленомошно-кустарничковом.

гумусовыми веществами), а k_6 имеет значительно большее значение, чем для углерода благодаря относительно лучшей растворимости фульватов кальция.

В результате численных экспериментов были получены следующие соотношения между коэффициентами R_i системы (1) и коэффициентами k_i модели ROMUL, зависящими от перечисленных

выше почвенных характеристик: $R_1 = k_1$; $R_2 = k_2$; $R_3 = k_3$; $R_4 = 0.4k_4$; $R_5 = 0.0$. При этих поправках в результате модельного эксперимента на 200 лет мы получили стационарное состояние для динамики пулов кальция в ельнике кустарничково-зеленомошном (Рис. 3). Этот сценарий был принят за контроль для данного типа сообщества при данном климате.

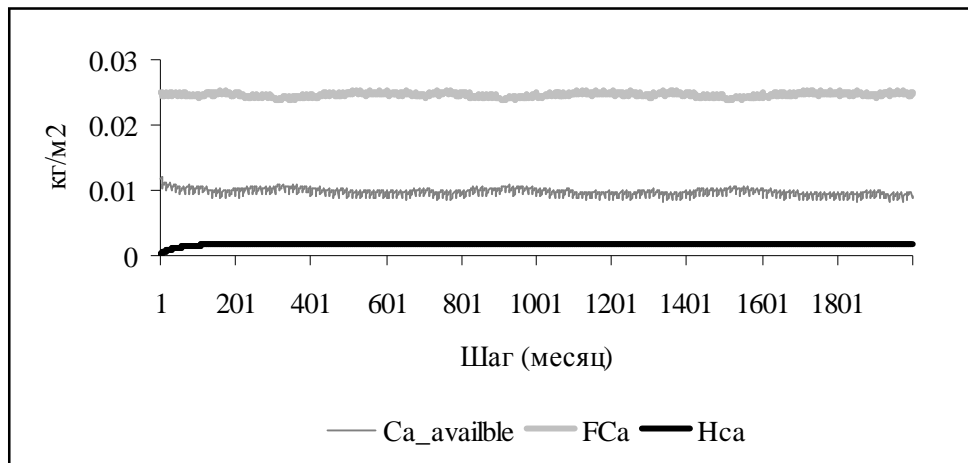


Рис. 3. Динамика пулов кальция в ельнике зеленомошно-кустарничковом.

Таким образом, полученные результаты показывают, что динамика пулов кальция в рамках принятых определений и предположений о возможных основных путях трансформации этих пулов может быть в первом приближении описана системой уравнений (1).

Мы рассмотрели самую простую модель динамики кальция в органических горизонтах почвы в простом случае, когда предположение о стационарности процессов позволило упростить процедуру нахождения коэффициентов в системе (1). Отметим, что подобное предположение является общепринятой процедурой (Foster et al., 2003; Komarov, 2008). Перечислим основные предположения, принятые при проведении численных экспериментов с этой моделью. Мы предполагаем, что 1) в стационарном состоянии во вторичные минералы уходит одна треть кальция, освободившегося при минерализации органического вещества; 2) все вторичные минералы растворяются при весеннем таянии снега и уходят в пул обменного кальция; 3) выщелачивание кальция из почвенного профиля равно его поступлению с осадками; 4) изменения пулов кальция не приводят к изменению pH.

При нестационарной динамике (при таких внешних воздействиях, как сплошные рубки, лесные пожары, выпадение загрязнений из атмосферы) эти предположения могут оказаться недостаточными, что требует дальнейшего развития модели.

Работа поддержана Программой 16 Президиума РАН «Изменения природной среды и климата: природные катастрофы» и грантом РФФИ № 09-04-01209.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башкин В.Н., Касимов Н.С. Биогеохимия. М.: Научный мир, 2004. 647 с.

2. Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях антропогенного загрязнения. В 2-х ч. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1996. ч.1 213 с., ч.2 192 с.

3. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / отв. ред. В.Н. Кудряков. М.: Наука, 2007. 380 с.

4. Likens G.E., Driscoll C.T., Buso D.C., Siccama T.G., Johnson C.E., Lovett G.M., Fahey T.J., Reiners W.A., Ryan D.F., Martin C.W., Bailey S.W. The biogeochemistry of calcium at Hubbard Brook // Biogeochemistry. 1998. Vol. 41. pp. 89-173.

5. Johnson D.W., Sogn T., Kvindesland Sh. The nutrient cycling model: lessons learned// Forest ecology and management. 2000. Vol. 138. pp. 91-106.

6. Dauer J.M., Chorover J., Chadwick O.A., Oleksyn J., Tjoelker M.G., Hobbie S.E., Reich P.B., Eissenstat D.M. Controls over leaf and litter calcium concentrations among temperate trees // Biogeochemistry. 2007. Vol. 86. pp. 175-187.

7. Sverdrup H. Geochemistry, the key to understanding environmental chemistry // The science of the total environment. 1996. Vol. 96. pp. 67-87.

8. Walse C. Element cycling in forest soils: modelling the effects of a changing environment. Doctoral thesis. Lund University, Lund, Sweden, 1998. 62 p.

9. Cromack K.JR, Sollins Ph., Graustein W.C., Speidel K., Todd A.W., Spycher G., Li Ch.Y., Todd R.L. Calcium oxalate accumulation and soil weathering in mats of the hypogeous fungus *Hysterangium crassum*// Soil Biol. Biochem. 1979. Vol. 11. pp. 463-468.

10. Foster D., Swanson F., Aber J., Burke I., Brokaw N., Tilman D., Knapp A. The importance of land-use legacies to ecology and conservation // Bioscience. 2003. Vol. 53, 77-88.

11. Komarov A.S. Use of mathematical models for assessing the pool and dynamics of carbon in forest soils // Eurasian Soil Science. 2008. Vol. 41 (13). pp. 1387-1397.

MODELING OF CALCIUM DYNAMICS IN NORTHERN TAJGA FOREST SOILS

© 2009 **Y.S. Khoraskina¹, A.S. Komarov¹, M.G. Bezrukova¹, N.V. Lukina², M.A. Orlova²**

¹Institute of physico-chemical and biological problems in soil science of the Russian academy of sciences;
e-mail: yulia_hor@rambler.ru; ² as_komarov@rambler.ru; ³work.message.system@gmail.com

²Center of forest ecology and productivity problems of the Russian academy of sciences;
e-mail: lukina@cepl.rssi.ru

Model of soil calcium dynamics in northern tajga forest ecosystem is developed. It describes calcium flows between pools of soil organic matter. Inputs are air deposition and weathering from minerals. Outputs are plant nutrition, leaching, synthesis of secondary minerals. The model describes transformation and mineralization of forest floor in detail. Experimental data for calibration model are used from north taiga forests in Kola Peninsula.

Key words: *calcium circulation, mathematical modeling of ecosystems, secondary minerals, influence pH.*

УДК 51:502.4 (671.621)

ИНДИВИДУАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ДРЕВЕСНЫХ СООБЩЕСТВ

© 2009 А.Н. Колобов

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, г. Биробиджан;
e-mail: alex_0201@mail.ru

Рассмотрены результаты построения и исследования математической модели, описывающей пространственно-временную динамику древесных сообществ. Проведены вычислительные эксперименты с различными наборами исходных данных. В качестве результатов моделирования исследователь получает различные прогнозные сценарии развития леса.

Ключевые слова: *индивидуально-ориентированная модель, межвидовая конкуренция, пространственная структура.*

ВВЕДЕНИЕ

Центральным звеном в структуре практически любого биоценоза являются сообщества растений. Они не только служат основными источниками органического вещества, но оказываются теми структурными компонентами, которые целиком определяют облик и структуру биоценозов. В то же самое время лесные древесные растения широко используются в различных сферах промышленности, подвергаются различным видам антропогенного воздействия.

Рациональное ведение лесного хозяйства требует предварительной разработки эффективных стратегий управления, обеспечивающих оптимальные сценарии восстановления и развития леса. Основная проблема, с которой сталкиваются исследователи при изучении этих процессов, связана с их большой продолжительностью во времени. Для исследования динамики лесных ценозов и успешного управления ими широко применяются средства математического и компьютерного моделирования. Модель развития многовидового разновозрастного лесного ценоза характеризуется большим количеством параметров, включает различные математические зависимости, требующие проверки многочисленных условий и ограничений. Поэтому для решения поставленной задачи был выбран метод численного имитационного компьютерного моделирования. Для реализации модели на ЭВМ разработано соответствующее программное обеспечение.

В данной работе приводятся результаты построения и исследования математической модели динамики древостоев. В качестве результатов моделирования исследователь получает различные прогнозные сценарии развития леса. Изучая полученные сценарии при различных модельных стратегиях управления, можно выбрать наиболее

эффективную стратегию в зависимости от поставленной цели хозяйствования. Кроме этого модель имеет теоретическую ценность, поскольку позволяет изучать и выявлять закономерности роста и взаимодействия различных видов деревьев в сообществе.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Модель, рассматриваемая в данной работе, основывается на индивидуально-ориентированном имитационном подходе, который возник в последние десятилетия и широко применяется в современных моделях древостоя [6, 7, 8, 10, 11]. Данный подход позволяет рассматривать динамику моделируемой системы как результат взаимодействия множества дискретных объектов, из которых она состоит, расположенных в пространстве и изменяющих согласно тем или иным правилам свои характеристики с течением времени. Таким образом, в основу построения модели легли следующие положения:

1. Моделируемое пространство древостоя разбивается на ячейки по горизонтальной плоскости и уровни по вертикали.
2. Элементарной структурной единицей лесного сообщества является дерево.
3. Моделирование древостоя складывается из моделирования динамики отдельных деревьев.
4. При моделировании динамики отдельного дерева учитывается влияние со стороны других деревьев.

Моделирование динамики древостоя складывается из моделирования роста каждого дерева входящего в его состав, посредством дифференциальных уравнений и функций, которые позволяют рассчитать основные таксационные характеристики. Деревья размещены в пространстве и оказывают взаимное влияние друг на друга

через изменение, в результате конкуренции, доли внешних ресурсов, приходящихся на данное растение.

Перечисленный набор положений вполне достаточен для получения непрерывно меняющейся во времени мозаики локальных неоднородностей пространства. На рис. 1. показана пространственная структура моделируемого участка леса.

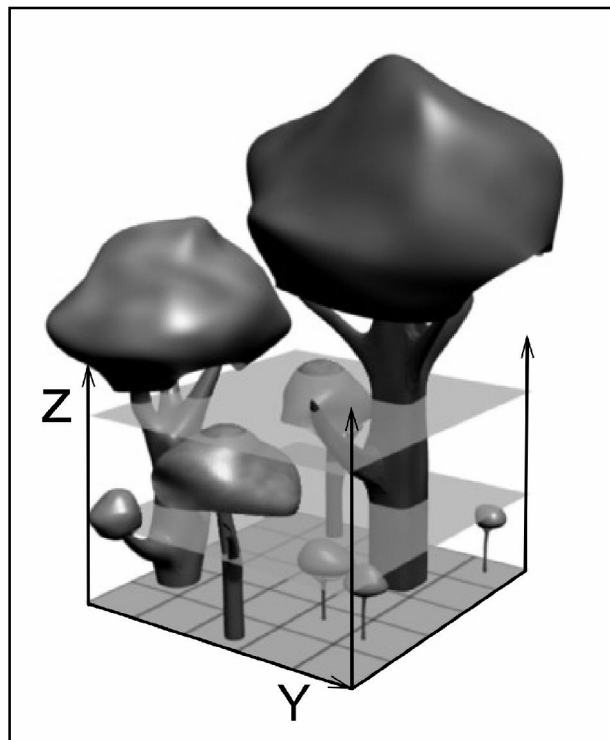


Рис. 1. Пространственная структура моделируемого леса. Моделируемое пространство делится на ячейки по горизонтальной плоскости и слои по вертикали

Моделируемое пространство разбивается на ячейки по горизонтальной плоскости и слои по вертикали. В каждой ячейке одновременно может находиться только одно дерево, размер ячейки составляет 40 x 40 см. В результате, каждое дерево прикрепляется к какой-либо ячейке, имеет свои координаты, что решает вопрос о пространственном расположении. Разбиение на ячейки такого размера позволяет существенно упростить алгоритм модели, например поиск ближайших соседей при расчете индексов конкуренции, и сократить время работы программы. Деление пространства на уровни по вертикали позволяет учитывать взаиморасположение деревьев и соответственно их влияние друг на друга при расчете светового довольствия.

Модель динамики древостоя включает в себя несколько подмоделей, отражающих процессы жизнедеятельности и взаимодействия деревьев. На рис. 2 показана схема подмоделей и их взаимодействий.

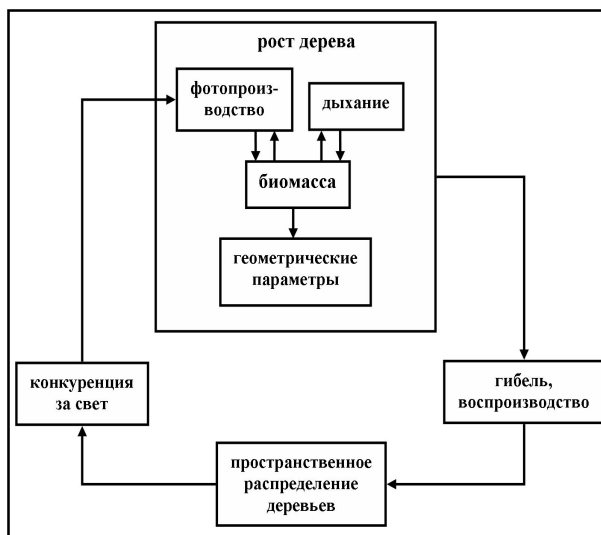


Рис. 2. Структурная схема модели динамики древостоя

В первом блоке «рост дерева», просчитывается прирост биомассы и некоторых геометрических параметров: объема, высоты, диаметра ствола, диаметра кроны. Прирост биомассы определяется интенсивностью фотосинтеза, который зависит от количества падающего света. Количество света, приходящегося на данное дерево, рассчитывается в подмодели «конкуренция за свет», определяется степенью затенения со стороны окружающего древостоя.

Блок «гибель и воспроизводство» отвечает за семенное размножение и отмирание деревьев в сообществе. На каждом шаге моделирования, который равен одному году, осуществляется процедура рассеивания семян, которая задается соответствующими вероятностными процессами. Просчитывается вероятность прорастания семени того или иного вида в данной точке пространства, которая определяется количеством особей данного вида способных к плодоношению, а также расстоянием от этих особей до рассматриваемой точки. Помимо этого задается вероятность прорастания семени в случае неблагоприятно сложившихся условий (высокая трава, грызуны и т.д.).

Отмирание деревьев происходит в результате естественного старения и конкуренции за ресурсы жизнедеятельности. Для каждого вида дерева задается некоторая средняя продолжительность жизни, начиная с которой вычисляется вероятность гибели растения, которая тем выше, чем больше отклонение от этой средней величины. Конкуренция между деревьями вызывает нехватку света, в результате чего скорость роста замедляется и с некоторого момента времени может начаться отрицательный прирост биомассы, т.е. опад ветвей и зеленой части. Ког-

да отрицательный прирост биомассы превышает определенное значение, дерево погибает. Кроме этого учитывается так называемая дискриминационная компонента смертности, обнаруженная на натурном материале и описанная в работе [1], которая проявляется в виде интенсивной гибели деревьев, отставших в своем развитии от среднего по популяции дерева. Происходит отмирание тех деревьев, которые сильно отстают в росте диаметра, когда он становится ниже заданной критической величины для данного возраста

Каждое дерево в древостое имеет свои пространственные координаты. Размещение деревьев на некоторой моделируемой территории и, соответственно, вычисление пространственных координат осуществляется в блоке «пространственное распределение деревьев».

Все блоки модели взаимосвязаны между собой и образуют замкнутую, циклическую систему. Пространственная структура древостоя определяет распределение световых ресурсов и вызывает напряженность конкурентных отношений между отдельными особями. Конкурентные процессы влияют на рост деревьев, что в конечном итоге приводит к их ослаблению и отпаду. Это в свою очередь изменяет пространственную структуру, формируя новые конкурентные отношения. Таким образом, осуществляется двусторонняя связь между пространственной структурой и динамикой роста отдельных деревьев, что в совокупности определяет общую динамику древостоя.

В результате взаимного затенения количество падающей солнечной радиации в древесном сообществе постоянно меняется. Поэтому на каждом шаге моделирования необходимо рассчитывать световой режим во всех точках моделируемого пространства. Для описания светового режима древостой разбивается на слои. Кроны деревьев аппроксимируются плоскими светопоглощающими экранами, которые отображаются в соответствующий слой в зависимости от высоты дерева, как показано на рис. 3.

Способность данного экрана поглощать свет зависит от возраста и видовой принадлежности дерева. При расчете светового довольствия в произвольной точке происходит наложение вышележащих слоев, таким образом, получаем суммарный коэффициент пропускания света. Для устранения влияния краевого эффекта осуществлялось замыкание границ участка, применяя топологию тора.

Для описания роста дерева в качестве исходного пункта использовали модель свободного роста дерева, предложенную в работе И.А. По-

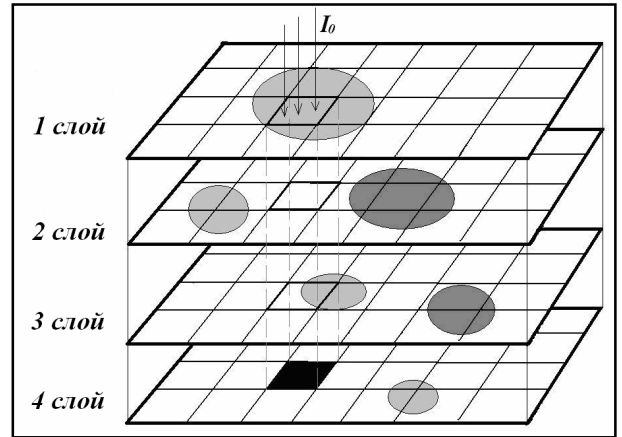


Рис. 3. Вертикальная структура моделируемого участка леса. Для расчета светового режима, древостой разбивается на слои, в которые проецируются кроны деревьев

летаева [4]. Она построена на основе балансового принципа и записана в форме закона сохранения энергии. Согласно этой модели, дерево получает энергию только путем фотосинтеза, свободная энергия расходуется на нужды фотосинтеза, на построение живой ткани и на подъем раствора из почвы.

Окончательно полученная система уравнений роста дерева с учетом влияния конкуренции со стороны окружающего древостоя записывается в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{\alpha \cdot (1 - \exp(-k \cdot V)) \cdot P_m \cdot Q}{\alpha \cdot (1 - \exp(-k \cdot V)) \cdot Q + P_m \cdot (k \cdot V)} \cdot bV - cVH \\ \frac{dH}{dt} = \alpha H \cdot (H_{\max} - H) \\ D = \sqrt{\frac{4V}{\pi \cdot H \cdot f}} \end{cases},$$

где V - объем дерева, H - высота, D - диаметр, E - интенсивность фотосинтеза единицы листовой поверхности, Q - доля солнечной радиации при затенении окружающим древостоем, f - видовое число, показывающее отклонение от идеального цилиндра.

Величина Q является нормированной, изменяется в пределах $0 \leq Q \leq 1$, выражается моделью Монси и Саеки [9]. Согласно этой модели коэффициент пропускания света зависит от плотности растительного покрова и толщины слоя. Зависимость ослабления радиации растительным покровом записывается в виде: $Q_z = \exp(-kL_z)$ где: Q_z - доля солнечной радиации внутри растительного покрова на высоте z , L_z - суммарная листовая поверхность древостоя выше уровня z , k - коэффициент экстинкции.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования показали, что виды, имеющие примерно одинаковую скорость роста и размеры, но разную степень пропуска 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. При этом если изменять скорость роста угнетенного вида, то можно добиться того, что виды будут успешно сосуществовать. Таким образом, конкурентные взаимодействия зависят не только от степени

взаимного затенения, но в значительной мере определяются характером кривой роста дерева.

Исследования модели также показало, что в результате внутривидовой конкуренции за свет возникают неоднородные пространственные распределения растительных сообществ. Наблюдаемые в процессе моделирования скопления и пустоты, взаимно сменяющие друг друга, вполне соответствуют ярусно-мозаичной концепции [3, 5], которая рассматривает лесной ценоз как систему пространственных мозаик, состоящих из асинхронно развивающихся пятен, находящихся на разных стадиях развития.

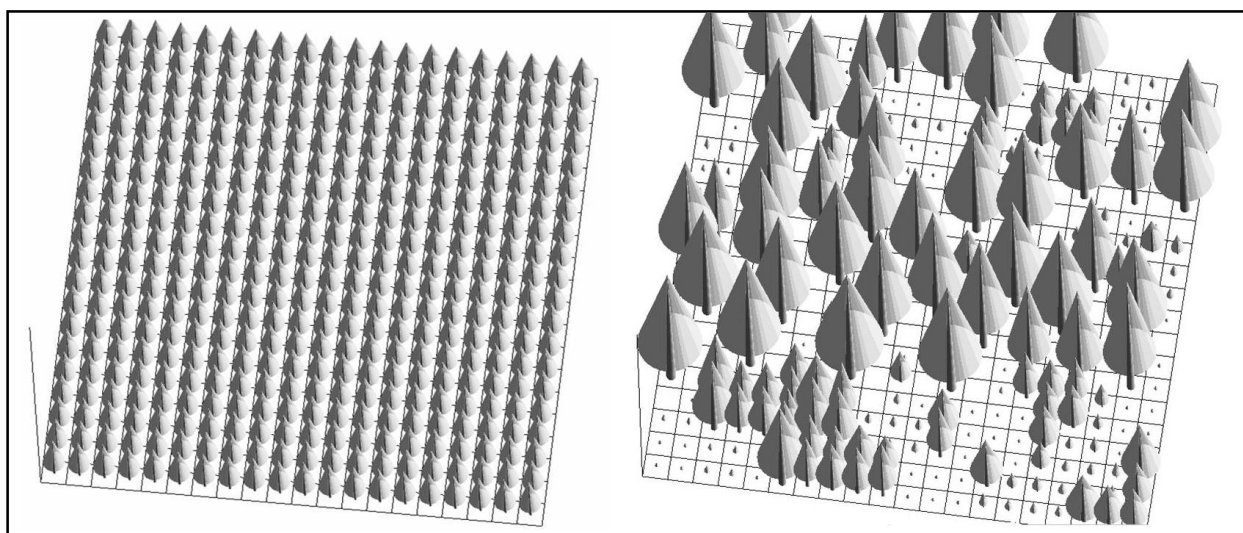


Рис. 4. Пример образования пространственно неоднородного распределения деревьев в результате внутренних взаимодействий

Для изучения динамики многовидовых древесных насаждений проведены вычислительные эксперименты с некоторым набором основных лесообразующих пород Дальнего Востока. В ка-

честве исследуемых видов, были рассмотрены: Ель, Пихта, Кедр и Береза. На рис. 2. приведены модельные сценарии динамики трехвидового древесного сообщества (Ель, Пихта, Кедр).

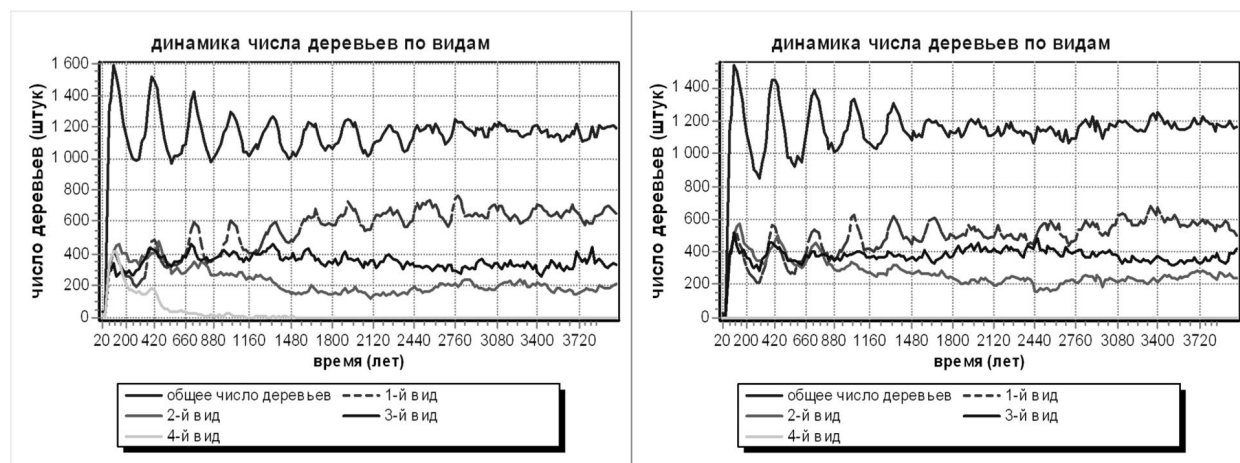


Рис. 5. Модельные сценарии динамики древесных сообществ

Как видно из графиков, виды Ель, Пихта, Кедр устойчиво сосуществуют на одной территории. Причем Ель по количеству деревьев на данной территории занимает первое место. Такая динамика вполне соответствует действительности, сочетание этих видов деревьев характерно для пихтово-еловых лесов Дальнего Востока. В следующей серии модельных экспериментов к данному сообществу добавляли особи Березы, которая является светолюбивым видом. Как видно из левого графика на рис. 5. (самая нижняя кривая), Береза постепенно начинает вымирать и уже к концу второго поколения, практически полностью исчезает, не выдерживая конкуренции со стороны более теневыносливых видов.

Во всех этих экспериментах структура древостоя формировалась таким образом, что доминирующее положение занимали теневыносливые виды. Это можно объяснить тем, что под пологом светолюбивого вида, в данном случае Березы, постепенно формируется ярус из более теневыносливых видов: Ели, Пихты, Кедра. Благодаря своей теневыносливости молодые деревья этих видов свободно растут под пологом верхних ярусов, образуя следующие поколения, не позволяя при этом нормально развиваться особям светолюбивого вида.

Таким образом, построенные модельные сценарии динамики древостоя продемонстрировали, что в данных климатических условиях Ель оказывается самым сильным конкурентом, Береза самым слабым видом. При этом Пихта, Ель и Кедр сосуществуют на одной территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная имитационная модель динамики древостоя позволяет проводить вычислительные эксперименты с различными наборами исходных данных (всевозможные комбинации видовой и возрастной структуры древостоя). В качестве результатов моделирования исследователь может получить различные статистические данные, например общий запас биомассы, суммарное количество особей того или иного вида, представленные в виде графиков. Предусмотренная в программе визуализация деревьев на координатной плоскости, наглядно демонстрирует пространственно-временную динамику леса.

Модель позволяет строить прогнозные сценарии развития древостоев, в том числе сценарии восстановления после различных видов наруше-

ний. Несет в себе теоретическую ценность, помогая исследователю изучать и выявлять закономерности роста и взаимодействия различных видов деревьев в сообществе. Помимо этого, ее можно успешно применять в практических целях, при разработке различных стратегий лесопользования.

Исследования проведены при финансовой поддержке ДВО РАН (в рамках Программы Президиума РАН № 23 «Биоразнообразию»), проект № 09-И-П23-12 и РФФИ (проект № 09-04-00146-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузыкин А.И., Гавриков В.Л., Секретенко О.П., Хлебопрос Р.Г. Анализ структуры древесных ценозов. Новосибирск: Наука, 1985.
2. Корзухин М.Д., Тер-Микаэлян М.Т. Модель многовидового фитоценоза при конкуренции особей за свет // Исследования по математической популяционной экологии. Владивосток, 1983. С. 100-115.
3. Коротков В.Н. Новая парадигма в лесной экологии // Биол. науки. 1991. Т. 8. С. 7-20.
4. Полетаев И.А. Проблемы кибернетики. 1966. Т. 16. С. 171-190.
5. Смирнова О.В., Чистякова А.А., Попадюк Р.В. и др. Популяционная организация растительного покрова лесных территорий (на примере широколиственных лесов европейской части СССР). Пушино: НЦБИ, 1990. 92 с.
6. Чумаченко С.И. Базовая модель динамики многовидового разновозрастного лесного ценоза // Вопросы экологии и моделирования лесных экосистем. М.: МЛТИ, 1993. С. 147-180.
7. Chave J. Study of structural, successional and spatial patterns in tropical rain forests using TROLL, a spatially explicit forest model // Ecological Model. 1999. V. 124. P. 233-254.
8. Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L. et al. EFIMOD 2 - A model of growth and elements cycling of boreal forest ecosystems // Ecological Modelling. 2003. V. 170. P. 373-392.
9. Monsi M., Saeki T. Uber den Lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung fur die Stoffproduktion. // Jap. J. Bot. 1953. V. 14, № 1. P. 22-52.
10. Huth A., Ditzer T. Long-term impact of logging in a tropical rain forest – a simulation study // Forest Ecology and Management. 2001. V. 142. P. 33-51.
11. Huth A., Ditzer T. Simulation of the growth of a lowland Dipterocarp rain forest with FORMIX3 // Ecol. Model. 2000. V. 134. P. 1-25.

INDIVIDUAL-BASED MODEL OF WOOD COMMUNITIES DYNAMICS

© 2009 A.N. Kolobov

Institute of the complex analysis of regional problems Far Eastern Branch
Russian Academy of Sciences, Birobidzhan;
e-mail: alex_0201@mail.ru

The results of study and construction of a simulation model describing the spatial-temporal dynamics of plant communities are considered. The computative experiments with different sets of input data are carried out. As the simulation results the researcher receives a different projection scenarios for the development of forest.

Key words: *individual-based model, inter-species competition, spatial distribution.*

УДК 581.52+581.524.3+574.9

ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗНЫЕ МОДЕЛИ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ПРИ ГЛОБАЛЬНОМ ПОТЕПЛЕНИИ

© 2009 Э.Г. Коломыц, Л.С. Шарая

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти; e-mail: egk2000@mail.ru

Изложен опыт использования методов ландшафтной экологии в оценках биотической регуляции углеродного цикла при глобальных изменениях климата. Созданы аналитические и картографические эмпирико-статистические модели, позволяющие вскрыть локальные механизмы биотической регуляции. Даются прогнозные оценки углеродного баланса в лесных экосистемах по сценарию HadCM3-2000 (версия A2) предстоящего глобального потепления.

Ключевые слова: *биогеоценоз, изменения климата, эмпирико-статистическое моделирование, картографирование, экологическое прогнозирование, экосистема.*

ВВЕДЕНИЕ

Познание локальных (топологических) и региональных механизмов устойчивости континентальной биосферы может внести существенный вклад в оценку экологических последствий глобального воздействия человека на климат. Речь идет об изучении процессов биотической регуляции углеродного цикла в системе почва–растительность–атмосфера [2, 3, 11 и др.]. Этой проблеме посвящена весьма обширная литература как в нашей стране, так и за рубежом [3, 4, 7, 16, 18 и др.]. Однако основное внимание уделяется методикам определения углеродных пулов в различных компонентах фитобиоты и в почве, а также изучению «работы» углеродного цикла и современного содержания углерода в лесных, болотных и других экосистемах. Гораздо слабее освещены вопросы количественной оценки реакции различных биотических компонентов углеродного цикла на глобальные климатические изменения.

Дальнейшее развитие концепции биотической регуляции видится в изучении локальных механизмов биологического круговорота, обеспечивающего устойчивость природной среды в соответствии с принципом Ле Шателье [2]. Топоэко-системы как элементарные биохорологические единицы биосферы представляет собой наиболее комплексную и активную часть природной среды, ее функциональное «ядро» [9, 10], поэтому истоки механизмов, регулирующих влаго- и газообмен земной поверхности с атмосферой, следует искать в метаболических режимах локальной размерности. Пространственное разнообразие биологического круговорота обусловлено в первую очередь структурной неоднородностью биогеоценозов (ландшафтных фаций). В та-

ком аспекте концепция биотической регуляции углеродного цикла в биосфере, насколько нам известно, до сих пор еще не разрабатывалась.

ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ

Вопросы прогнозной динамики лесных экосистем в условиях меняющегося климата разработаны еще весьма слабо. Зарубежные прогнозные разработки носят преимущественно обзорный (мелкомасштабный) характер [13] и поэтому не могут вскрыть причинных механизмов пространственного разнообразия реакций лесных сообществ на одни и те же климатические сигналы, а также их обратного влияния на климат. Известные имитационные модели реакции лесов на климатические воздействия [7, 14, 16, 18 и др.], при всей их эффективности, ограничены узкими заданными рамками условий местообитания, поэтому получаемые результаты расчетов недостаточны для прогноза состояний всего спектра лесных сообществ в экорегионе или в природной зоне. Даже на локальном уровне они не охватывают пространственного многообразия сукцессионных смен при одном и том же фоновом воздействии.

В настоящем сообщении представлен опыт применения ландшафтно-экологического подхода к изучению феномена биотической регуляции углеродного цикла. Этот подход основан на построении дискретных эмпирико-статистических моделей природных экосистем, по определению [8]. Он позволяет вскрыть причинные механизмы 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. При ландшафтно-экологическом моделировании, описывающем поведение гео(эко-)систем как целостных образований, удастся оперировать сравнительно небольшим числом наиболее информативных признаков и получать результаты с гораздо более высокой степенью пространственного разрешения по сравнению с тем, что дают, например, имитационные модели. Это находит отражение на картах прогнозируемых параметров биологического круговорота и углеродного баланса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования послужили лесные экосистемы основного водосбора Волжского бассейна. Использованы материалы крупномасштабных ландшафтно-экологических съемок, проведенных нами ранее на экспериментальных полигонах по специально разработанной методике [5] на экспериментальных полигонах Среднего и Верхнего Поволжья. Полигоны охватывают широкий спектр зональных систем – от южной лесостепи до смешанных лесов южнотаежного облика [5]. Каждый полигон характеризует определенный экорегион.

В пределах полигона на основе 45-65 пробных площадей выделялись шесть биогеоценологических (фациальных) групп, расположенных по вектору локального ландшафтного сопряжения (микроратены), согласно [1], – от элювиальных и трансэлювиальных типов местоположений через транзитные и трансаккумулятивные типы до аккумулятивных и супераккумулятивных. На региональном уровне система мезоместоположений имела аналогичный характер. Среди биогеоценозов выделялась плакорная группа как локальный зональный представитель данного экорегиона. Остальные биогеоценозы рассматривались как экстразональные, отображающие фоновые условия других регионов, нередко весьма удаленных. Для данного сообщения использованы следующие дискретные параметры малого биологического круговорота: 1) скелетная древесно-кустарниковая фитомасса – *BS*; 2) масса корней – *BR*; 3) общая зеленая масса – *BV*; 4) масса лесной подстилки – *ML*; 4) мертвая скелетная фитомасса (валеж и сухостой) – *WD*; 6) масса гумуса в органно-минеральных горизонтах почвы – *HU*.

Локальные механизмы биотической регуляции изучались на основе прогнозируемых изменений биологического круговорота в лесных биогеоценозах при заданных сценариях климатического прогноза до 2100 г. (по глобальной модели HadCM3, версия A2 [15]). Как и большинство

известных моделей семейства AOGCMs, данная модель предсказывает термоаридный климатический тренд по всей Средней полосе Русской равнины. Для прогнозирования дискретных параметров биологического круговорота предварительно проводилась гидротермическая ординация этих параметров в пространстве локальных ландшафтных сопряжений по каждому экорегиону. Было установлено, что основным каналом связи метаболических параметров с климатическими сигналами служит легнее влагосодержание почвы [5], динамика которого и 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 [11]. Изменение массы потока углерода $\Delta C(Fa)$ над растительным покровом, т.е. углеродный баланс почвенно-растительного комплекса, на данный прогнозный срок рассчитывали по формуле

$$\Delta C(Fa) = \Delta C(WD) + \Delta C(ML) + \Delta C(HU) - \Delta C(BS) - \Delta C(BV) - \Delta C(BR).$$

Параметр $\Delta C(Fa)$ определялся для каждой группы биогеоценозов данного экорегиона. При положительных величинах первые три слагаемые правой части уравнения дают прибавку эмиссии CO_2 из почвенно-растительного покрова в атмосферу, а вторые – убыль этого потока. При отрицательных же значениях указанных параметров картина обратная. Таким образом, по прогнозируемому параметру $\Delta C(Fa)$ можно оценить, будет ли поглощать данное лесное сообщество дополнительное количество CO_2 из атмосферы в результате сдвигов в биологическом круговороте или, наоборот, станет источником его дополнительных выбросов.

Для построения крупномасштабных растровых карт дискретных параметров биологического круговорота (как для базового периода, так и для прогнозных сроков) применены новые методы геоморфометрии, разработанные П.А. Шарым [12], и программа «GIS Eco» [17]. 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. Каж-

дый тип растительной формации, выделенный на геоботанической карте, идентифицируется определенной плакорно-экстразональной группой биогеоценозов, образующих региональную микрокатенарную систему локальной зональности, адекватную вектору прогнозируемых изменений климата. Затем каждый ареал данной формации, представленный как своего рода мезокатена, дробится на региональные типы местоположений, для чего используются новые методы геоморфометрической статистики. Создается промежуточная карта типов мезоместоположений на всю лесопокрытую площадь региона (с учетом терморезима склонов). Последняя рассчитывается по рельефу региона на основе выявленной статистически тесной связи типов местоположений с характеристиками рельефа. Принимая, согласно концепции [6], мезокатену в качестве гомоморфного образа микрокатены, разносим имеющиеся биогеоценозы каждой выделенной группы по мезогеотопам соответствующего геоботанического ареала. Полученная таким образом региональная фито-катенарная мозаика насыщается далее базовыми или прогнозными метаболическими параметрами биогеоценозов, взятых уже в качестве локальных представителей тех или иных природных зон и регионов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Прогнозные расчеты показали, что при развитии термоаридного климатического тренда в бореальных и суббореальных лесах наибольшие по абсолютному значению изменения должен испытать автотрофный биогенез, дающий BS , BV и BR фитомассы. Приоритетный вклад в изме-

нения углеродного баланса будет вносить динамика прироста древесины. К 2100 г. в своих экстремальных значениях $\Delta C(BS)$ составит от (-)37–40 т/га в плакорных и трансаккумулятивных липняках Жигулевского массива до (+)95–100 т/га в трансэлювиальных хвойно-широколиственных лесах Нижегородского Предволжья. Величины же экстремальных $\Delta C(F_a)$ будут равны соответственно -(78–83) и +(115–120) т/га. Таков возможный размах изменений потока углерода, вызванных неоднозначной реакцией бореальных и неморальных лесов.

Экорегions не только существенно различаются в обобщенных величинах углеродного баланса (табл. 1), но имеют также весьма пеструю картину его распределения по микрокатенам. Зонально-региональные контрасты биотической регуляции углеродного цикла можно проследить по значениям $\Delta C(F_a)$ для плакорных топозкосистем экспериментальных полигонов. Перечислим эти значения (в т/га) на прогнозные сроки 2030, 2050 и 2100 гг.

1. Жигулевский массив, липняки и сосняки южной лесостепи → (-)69,91; (-)77,29; (-)83,11.
2. Присурье, дубо-липняки и хвойные леса типичной лесостепи → (-)37,34; (-)34,42; (-)23,33.
3. Возвышенное Нижегородское Предволжье, смешанные и темнохвойные леса неморальнолесной подзоны (урочище Зеленый Город) → (+)30,00; (+)43,91; (+)70,90.
4. Там же, массив Щелоковский Хутор (липовые дубравы) → (-)78,62, (-)78,66, (-)89,86;
5. Низменное Среднее Приочье (Приокско-Террасный заповедник), южная границы подтаежной зоны: а) сосново-широколиственные леса → (-)30,77; (-)29,73; -27,91; б) березняки и осин-

Таблица 1. Средневзвешенное по площади базовое содержание органического углерода в почвенно-растительном покрове (т/га) и его прогнозируемые изменения на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) Среднего и Верхнего Поволжья

ООПТ	Базовый период	Прогнозные сроки, гг.				
		2010	2030	2050	2075	2100
А. Национальный природный парк «Самарская Лука», Жигули (подзона южной лесостепи, у южной границы)	218.59	-44.01 (20.1)	-52.85 (21.2)	-58.40 (26.7)	-62.82 (28.7)	-66.03 (30.2)
Б. Национальный природный парк «Чаваш Вармане», правобережное Присурье (неморальнолесная подзона)	174.57	14.03 (8.0)	16.78 (9.6)	19.57 (11.2)	24.90 (14.3)	29.56 (16.9)
В. Приокско-Террасный биосферный заповедник, Среднее Приочье (смешаннолесная зона, у южной границы)	209.06	1.28 (0.6)	4.65 (2.2)	4.78 (2.3)	7.88 (3.8)	6.34 (3.0)

Примечание. В скобках указаны отклонения от базовой величины, %.

ники с липой → (+)19,13; (+)20,37; (+)22,32.

6. Низменный зандр Нижнего Приочья, елово-сосновые полесья → (-)50,84; (-)51,37; (-)53,34.

7. Нижегородское Заволжье (Керженский заповедник), ельники и сосняки южной подтайги → (-)29,09; (-)33,24; (-)31,32.

До конца XXI в. содержание углерода, законсервированного в фитомассе лесов Среднего и Верхнего Поволжья, может измениться на ±(25–50)% от базовой величины, что указывает на их существенную роль в грядущей биотической регуляции углеродного цикла [5]. Наиболее сильно сократится продуктивность маргинальных лесных сообществ на зональных экотонах леса и степи (см. табл. 1, А), 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 неморальной подзоне (см. выше, урочище Зеленый Город) и в южной полосе подтаежной зоны. Второстепенную роль сыграют трансаккумулятивные и супераккумулятивные сосняки низменно-зандровых полесий, где $\Delta C(Fa) = 15–25$ т/га. Это, пожалуй, единственная группа формаций бореальных лесов, которая окажет существенную поддержку устойчивости континентальной биосферы в условиях глобального потепления.

Рассмотрим картографические модели углеродного баланса лесов на срок до 2050 г., когда ожидается удвоение концентрации CO_2 в атмосфере. Для локального уровня дан пример карт $C_{\text{баз}}$ и $\Delta C(Fa)$ лесного массива Приокско-Террасного биосферного заповедника (рис. 1). Карты построены на основе связей указанных параметров с наиболее значимыми факторами среды (r_s – коэффициент корреляции Спирмана, P – уровень значимости Пирсона):

$$C_{\text{баз}} = 243,69 - 92,82 \cdot MCA - 41,62 \cdot kh + 22,31 \cdot Z; (r_s = 0,49; P < 0,01);$$

$$\Delta C(Fa) = -5,25 + 10,18 \cdot MCA + 8,07 \cdot Q - 3,21 \cdot kA; (r_s = 0,50; P < 10^{-3}).$$

Здесь Z - абс. высота, MCA - площадь водосбора, kh - горизонтальная кривизна, выявляющая области конвергенции потоков, с ростом депозита углерода, kA - аккумуляционная кривизна, различающая зоны сноса, транзита и накопления потоков (максимум $\Delta C(Fa)$ - в зонах транзита); Q - освещенность склонов при положении Солнца в южном азимуте.

Как видно, в базовый период наибольшие суммарные запасы углерода свойственны слабоклонным приводораздельным областям, с наименьшей площадью водосбора. В прогнозируемый срок эти местоположения, а также относительно крутые склоны, особенно хорошо прогреваемые при южном азимуте солнца, будут отличаться максимальной эмиссией CO_2 . Лесные же массивы, расположенные в оврагах и притальеговых областях, окажутся пулами с наибольшим

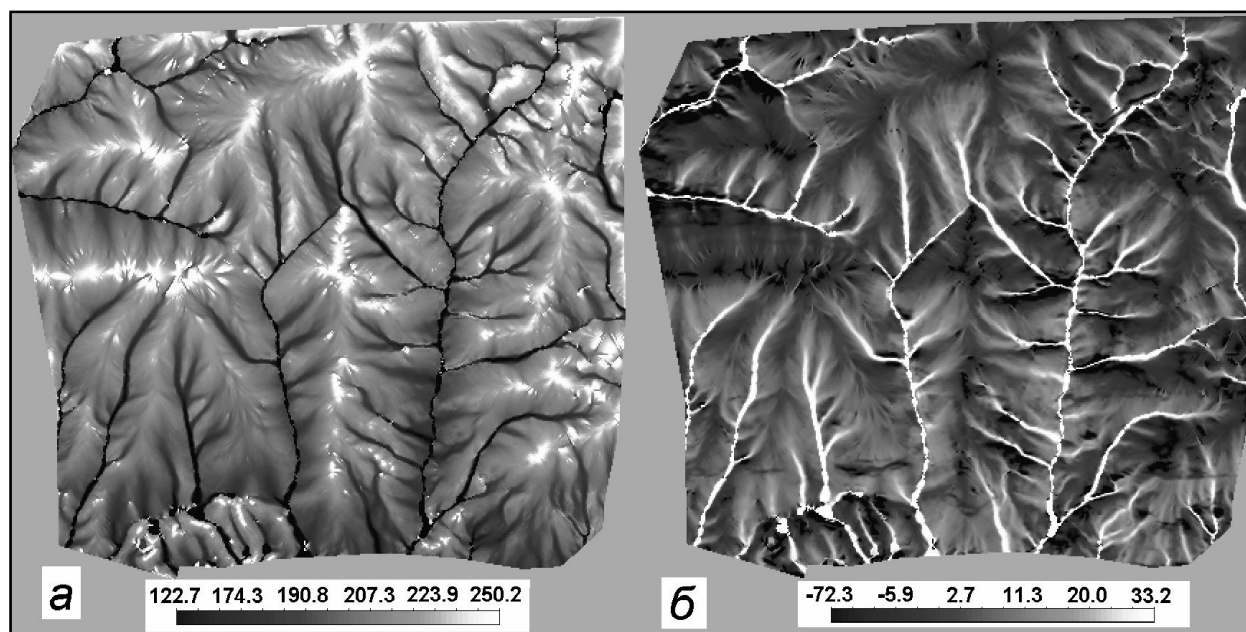


Рис. 1. Приокско-Террасный биосферный заповедник. Карты содержания суммарного углерода (т/га) в лесных биогеоценозах для базового периода (а) и его изменений (т/га) к 2050 г. (б): Шаг решетки - 20 м; ведущие предикторы см. в тексте; среднее базовое содержание углерода по матрице - 205,2 т/га; среднее изменение запасов углерода к 2050 г. - 8,72 т/га.

Таблица 2. Прогнозируемые к 2050 г. изменения суммарных запасов углерода (в млн. т.) в растительных формациях Окского бассейна, согласно климатической модели HadCM3 (версия A2)

Леса (группы растительных формаций)	Площадь, кв. км	Базовый суммарный углерод	Изменение содержания углерода			
			депозит	эмиссия	общий итог	
					млн. т.	%
1. Еловые и широколиственно-еловые смешанные	2034	37.14	3.02	-1.8	1.22	3.28
2. Сосновые и широколиственно-сосновые смешанные	26230	481.76	45.77	-23.17	22.6	4.69
3. Широколиственные	4770	84.68	6.76	-4.96	1.8	2.13
4. Вторичные на месте еловых и смешанных	17770	293.26	40.77	-14.79	25.98	8.86
5. Вторичные на месте сосновых и смешанных	16670	318.70	40.97	-51	-10.03	-3.15
6. Вторичные на месте широколиственных	4911	76.83	0.42	-1.18	-0.76	-0.99
7. Болотные	2343	35.18	1.01	-0.17	0.84	2.39
8. Пойменные	9219	149.28	6.62	-4.45	2.17	1.45
Все группы лесных формаций	83947	1476.83	145.34	-101.52	43.82	2.97

депонированием углерода.

Региональный уровень представлен Окским бассейном (рис. 2). Формирование карты путем насыщения мезокатен каждой растительной формации рассчитанными данными о депозите и эмиссии углерода позволило определить ведущие предикторы, связанные с изменением углеродного баланса для разных типов леса. Ниже приводим уравнения множественной регрессии для связи параметра $X = \Delta C(Fa)$ с наиболее значимыми факторами среды:

а) еловые и широколиственно-еловые леса:

$$X = 76,7 \cdot Z + 46,7 \cdot T + 24,0 \cdot Q - 63,8;$$

б) сосновые и широколиственно-сосновые леса: $X = -24,0 \cdot Z + 21,0 \cdot MCA - 7,1 \cdot Q + 12,1;$

в) широколиственные леса: $X = -76,2 \cdot T + 42,9 \cdot MCA + 12,1 \cdot GA + 15,1;$

г) вторичные леса на месте сосновых: $X = 83,1 \cdot k_{\max} + 76,6 \cdot MCA + 9,7 \cdot T - 61,6;$

д) все вторичные леса бассейна: $X = 37,5 \cdot MCA - 18,4 \cdot GA - 10,9 \cdot T + 12,7.$

Здесь: GA - крутизна склонов; k_{\max} - максимальная кривизна, определяющая гребневые формы рельефа; T - средняя температура июля (остальные обозначения см. выше).

Современный лесной покров Окского бассейна, составляющий немногим более 1% площади лесов России, должен осуществлять при глобальном потеплении в целом позитивную регуляцию углеродного цикла. Однако сама ее величина не будет сколько-нибудь значительной ввиду сравнительно малых изменений содержания углерода в большинстве пулов, в том числе в скелет-

ной фитомассе. Прогнозная карта вскрывает также резко выраженную контрастность и мелкоконтурную пятнистость положительных и отрицательных величин углеродного баланса: $\Delta C(Fa)$ меняется от (-)115–80 до (+)65–100 т/га.

В целом в темнохвойных лесах бассейна депозит углерода почти на 70% превысит его эмиссию, однако из-за незначительной площади этих формаций их общий вклад в изменение углеродного баланса региона не превысит 6% (табл. 2). Сосновые и широколиственно-сосновые формации будут так же положительно влиять на углеродный цикл, но гораздо слабее, чем темнохвойные леса. Несмотря на то, что сосняки занимают наибольшие площади в бассейне, их позитивный вклад в регуляцию углеродного цикла окажется сравнительно небольшим. К 2050 г. они смогут содержать менее 25% массы углерода, депонированной во всех лесах региона. Широколиственные леса окажут преимущественно отрицательное влияние на углеродный цикл, однако это влияние будет незначительным ввиду весьма ограниченного распространения этих лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1964.
2. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ, 1995.
3. Заварзин Г.А. Углеродный баланс России // Возможные предотвращенные изменения климата и его последствий. М.: Наука, 2007.

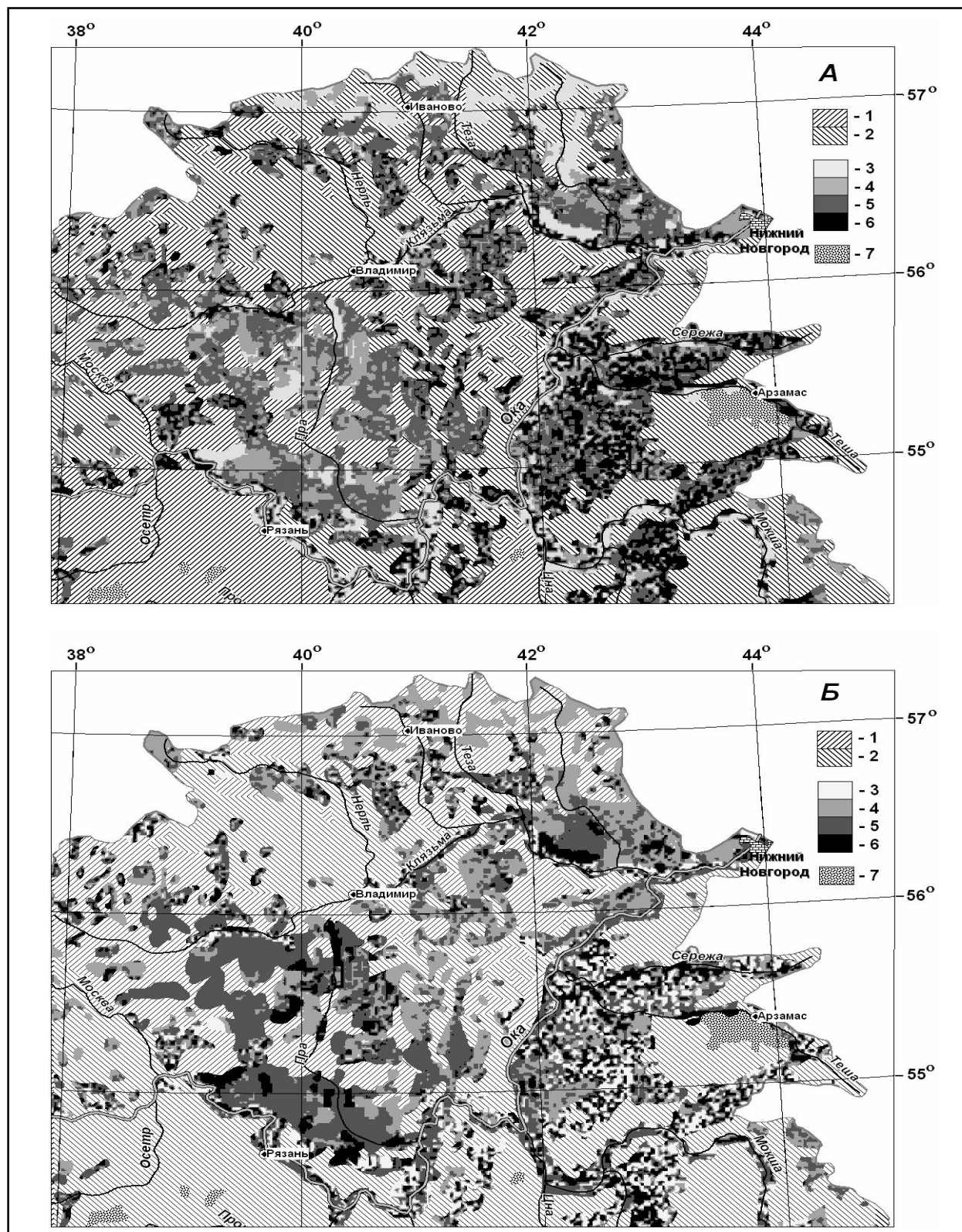


Рис. 2. Фрагменты карт суммарного содержания углерода и его прогнозируемых изменений на территории Окского бассейна:

А. Распределение содержания углерода на конец базового периода (1985 г.); запасы углерода (т/га): 1 – 10,2-15,0; 2 – 15,0-19,3; 3 – 43-130; 4 – 130-160; 5 – 160-200; 6 – 200-423.

Б. Распределения углеродного баланса на прогнозный срок 2050 г.; изменение суммарных запасов углерода по отношению к базовому периоду (т/га):

1 – (-_{1,3}÷0; 2 – 0÷5,5; 3 – (-)136÷(-)25; 4 – (-)25÷0; 5 – 0÷25; 6 – 25÷115;

1-2 – фрагментарные лесные массивы на территории сельскохозяйственных полей;
3-6 – лесные территории; 7 – острова распаханых степей

4. *Исаев А.С., Коровин Г.Н.* Углерод в лесах Северной Евразии // *Круговорот углерода на территории России*. М.: Мин-во науки и технологий РФ, 1999.
5. *Коломыц Э.Г.* Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008.
6. *Полынов Б.Б.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1956.
7. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Отв. ред. Г.А. Заварзин. М. Наука, 2007.
8. *Розенберг Г.С.* Модели в фитоценологии. М.: Наука, 1984.
9. *Сочава В.Б.* Геотопология как раздел учения о геосистемах // *Топологические аспекты учения о геосистемах*. Новосибирск: Наука, 1974.
10. *Тимофеев-Ресовский Н.В.* Структурные уровни биологических систем // *Системные исследования*. Ежегодник. 1970. М.: Наука, 1970.
11. *Цельникер Ю.Л.* Газообмен CO₂ в лесных биогеоценозах / *Идеи биогеоценологии в лесоведении и лесоразведении*. М.: Наука, 2006.
12. *Шарая Л.С.* Количественный анализ пространственной изменчивости некоторых параметров состояния экосистемы Жигули // *Самарская Лука. Бюл.* 2007. Т. 16. № 4 (22).
13. *Aber J, Nelson R.P., McNulty St. et al.* Forest Processes and Global Environmental Change: Predicting the Effects of Individual and Multiple Stressors // *BioScience*. 2001. V. 51, N 9.
14. Impacts of climatic change on natural ecosystems (with emphasis on boreal and arctic/alpine areas) / Ed. Holten J.I., Paulsen G., Oechel W.C. Trondheim: NINA and DN, 1993.
15. *Pope V.D., Gallani M.L., Rowntree P.R., Stratton R.A.* The impact of new physical parametrizations in Hadley Centre climate model – HadCM3 // *Climate Dynamics*. 2000. V. 16.
16. *Schimal D.S., House J.L., Hibbard K.A., et al.* Resent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems // *Nature*. 2001. V. 414.
17. *Shary P.A.* Personal research website on geomorphometry and applications. 2006. Website: <http://www.giseco.info/>. На рус. яз. веб-сайт <http://www.esti-map.ru/>.
18. *Smith T.M., Leemance R., Shugart H.H.* Sensitivity of terrestrial carbon storage to CO₂-induced climate change: comparison of four scenarios based on general circulation models // *Climatic Change*. 1992. V. 21.

LANDSCAPE-ECOLOGICAL PREDICTIVE MODELS OF CARBON BALANCE IN FOREST ECOSYSTEMS UNDER GLOBAL WARMING

© 2009 E.G. Kolomyts, L.S. Sharaya

Institute of Ecology of the Volga River Basin Russian Academy of Sciences, Togliatti;
e-mail: egk2000@mail.ru

The experience of application of landscape-ecological methods for evaluations of carbon cycle biotic regulation in forest ecosystems is presented. Methods are described for constructing analytical and cartographic empirical-statistical models that make it possible to reveal the zonal/regional types of forest formations capable of stabilizing the continental biosphere in the changing climate. The prognosis of changes of biological cycle and biotic regulation of the carbon cycle according to the scenarios HadCM3 model (version 2) of forthcoming greenhouse warming is presented.

Key words: *biogeocenosis, climate changes, empiriko-statistical modeling, cartographic, ecological prognosis, ecosystems.*

УДК 550.4(26)+550.42

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ В ГИДРОСФЕРЕ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ СТАНДАРТ

© 2009 В.Д. Корж

Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, г. Москва; e-mail: okean41@mail.ru

Современные проблемы нахождения допустимых пределов воздействия техносферы на биосферу, оптимизации взаимодействия техносферы и биосферы, прогнозирования экологических последствий инцидентов в техносфере 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». Стабильность этих процессов – главное условие стабильности экосистемы гидросферы. Биогеохимическим критерием наиболее адекватно отражающим экологическое состояние гидросферы и ее отдельных частей может служить мера близости макрокинетических констант названных процессов, происходящих в реальных условиях, соответствующим константам определенным в «нормальных условиях».

Ключевые слова: *биосфера, техносфера, гидросфера, геохимическая система элементов, биогеохимические процессы, химические элементы.*

Современные проблемы нахождения допустимых пределов воздействия техносферы на биосферу, оптимизации взаимодействия техносферы и биосферы, прогнозирования экологических последствий инцидентов в техносфере 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. Громадная инерционность океана, сложность его системообразующих связей делают проблему реабилитации гидросферы, в случае глобального нарушения экологического равновесия, практически неосуществимой. Следовательно, стратегия использования и преобразования гидросферы должна учитывать необходимость экологической профилактики, упреждения возникновения глобальных химико-экологических проблем. Это возможно лишь при условии создания геохимических систем растворенных форм химических элементов, обладающих достаточной прогностической способностью [1].

Количественные исследования элементного состава океанской воды имеют длительную историю, связанную, в частности, с именами таких выдающихся ученых, как Бойль, Лавуазье, Гей-Люссак, Ленц [2]. Обзоры данных и обобщения делались Кларком, Ваттенбергом, Свердрупом с коллегами, Гольдшмидтом, Бруевичем, Виног-

радовым, Хорном, Бревером, Бруландом [1, 3].

Фундаментальное значение имеет постоянство элементного состава океанской воды. В.И. Вернадский называл его геохимической константой нашей планеты [4]. Детальные исследования выявили постоянство характера распределения концентрации отдельных химических элементов в океане. Определены три основных типа распределения концентраций элементов (рис. 1) [1, 3]:

1) консервативный - элементы имеют одинаковую и неизменную во времени и пространстве концентрацию, отнесенную к общей солёности;

2) биогенный - содержание элементов в поверхностных водах уменьшается вплоть до полного исчезновения в результате процессов потребления и удаления растительными организмами;

3) литогенный - сложный характер распределения концентраций элементов, которые, попадая в океан с речным стоком и эоловым материалом, выводятся практически полностью в осадок.

Поиск методологических основ геохимического изучения океана приводит к проблеме определения принципиального различия причин, обусловивших постоянство элементного состава океанской воды и геологических захоронений. Постоянство состава захоронений обусловлено завершенностью в них химических, биохимических и физико-химических процессов. Такие системы могут быть достаточно полно изучены с использованием аппарата термодинамики.

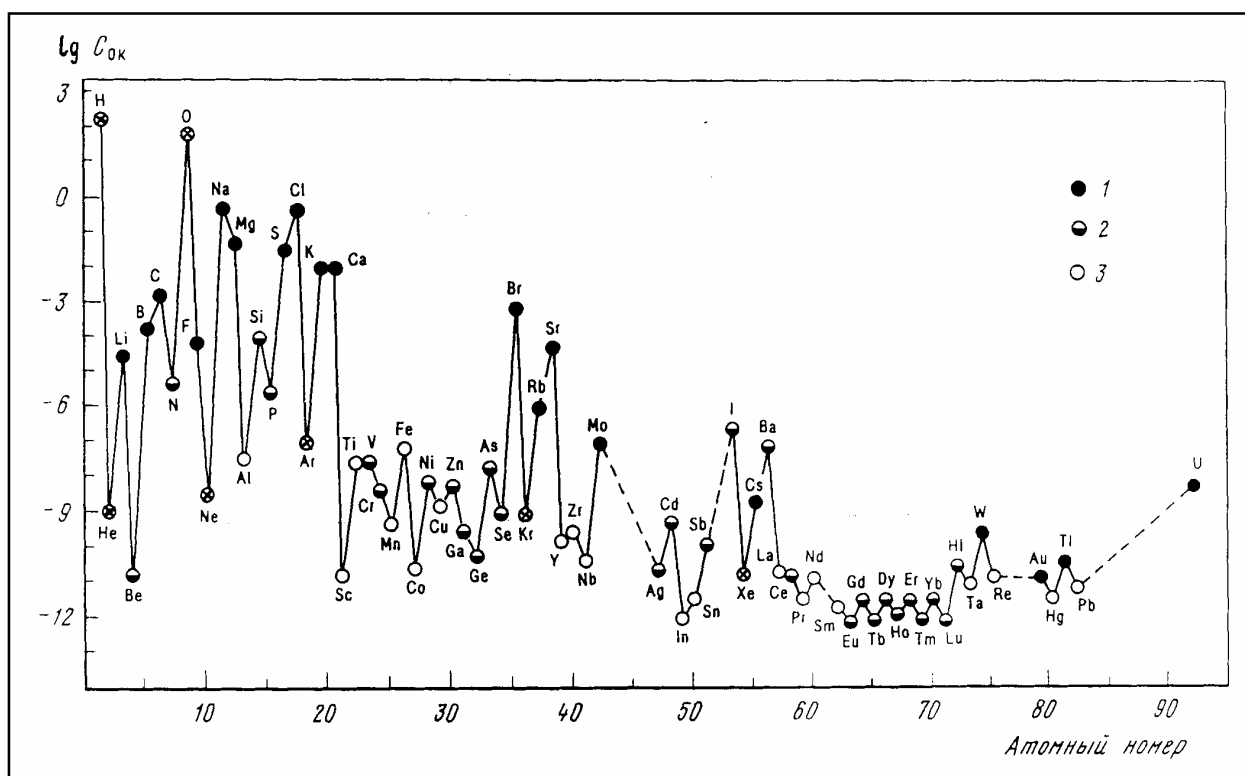


Рис. 1. Средние концентрации элементов в океане и типы их распределения: 1 - консервативный, 2 - биогенный, 3 - литогенный

Ключевым моментом исследования специфики формирования элементного состава биосферы является определение закономерностей перераспределения средних концентраций элементов между различными фазами: твердой - жидкой - газообразной (литосфера - гидросфера - атмосфера), происходящего в результате глобального непрерывного процесса переработки косной материи живым веществом [8]. Наша задача - исследовать такой процесс в системе литосфера - гидросфера с учетом интегрального участия в нём живого вещества («живых пленок и сгущений»).

Удалось доказать, что процесс формирования элементного состава океанской воды практически полностью определяется соотношением скоростей трансформации и массопереноса растворенного вещества [1, 6, 9]. Химический состав морей и океанов является результатом процессов миграции и трансформации вещества на биогеохимических барьерах река-море и океан-атмосфера, т.е. в местах «сгущения жизни». Стабильность этих процессов – главное условие стабильности экосистемной гидросферы. Практическая необозримость процессов трансформации веществ в морской воде требует генерализации геохимического знания, использования интегральных характеристик, нахождения общих закономерностей формирования элементного состава океанской воды. В этой связи целесообра-

зен отказ от детального описания и моделирования концентрационных полей, процессов массопереноса и трансформации веществ.

Нами разработана методология кибернетического подхода к изучению закономерностей формирования элементного состава морской воды [1]. 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. Результатом этих процессов является 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 [1, 6, 9].

Для выявления общих закономерностей таких процессов необходимо включить в рассмотрение все исследованные химические элементы. Графическая форма представления эмпирического материала здесь наиболее удобна и продуктивна. Значения концентраций различных элементов в гидросфере находятся в пределах двенадцати порядков. Поэтому при графическом сопоставлении концентраций их следует выражать в логарифмической форме. Таким способом впервые удалось обнаружить, что характер распределения растворенных форм элементов в океане рас-

крывается через отношение их средних концентраций в океанской и речной воде [1, 6], а именно (см. Рис. 2):

- консервативный тип распределения в океане - $C_{A(ок)} > C_{A(реки)}$
- биогенный тип распределения в океане - $C_{A(ок)} \sim C_{A(реки)}$
- литогенный тип распределения в океане - $C_{A(ок)} \ll C_{A(реки)}$

Использование новой методологии начнем с исследования системы литосфера – океан. Коэффициент корреляции для 67 изученных элементов равен 0,68. Зависимость между содержанием элементов в океане и в литосфере в общем случае не линейна. Рассмотрение зависимости между средним содержанием растворенных форм

элементов в речном стоке и литосфере приводит к следующим результатам. При количестве изученных элементов, равном 64, коэффициент корреляции равен 0,79. График зависимости среднего элементного состава речной (вход) и океанской (выход) воды представлен на рис. 3.

При количестве изученных элементов, равном 64, коэффициент корреляции равен 0,94. Линия, соответствующая уравнению, полученному методом линейной регрессии, составляет с осью абсцисс угол 34° , $\text{tg } \alpha = 0,67$. Обращает на себя внимание тот факт, что все элементы расположены по одну сторону от линии (или на самой линии), образующей с осью абсцисс угол, тангенс которого равен 0,70. Установлено, что линия (рис. 3), проходящая через Cl, Na, B, Br, Sr, Li, Rb, Cs, Mo, U, W, Tl, Re и Au, объединяет эле-

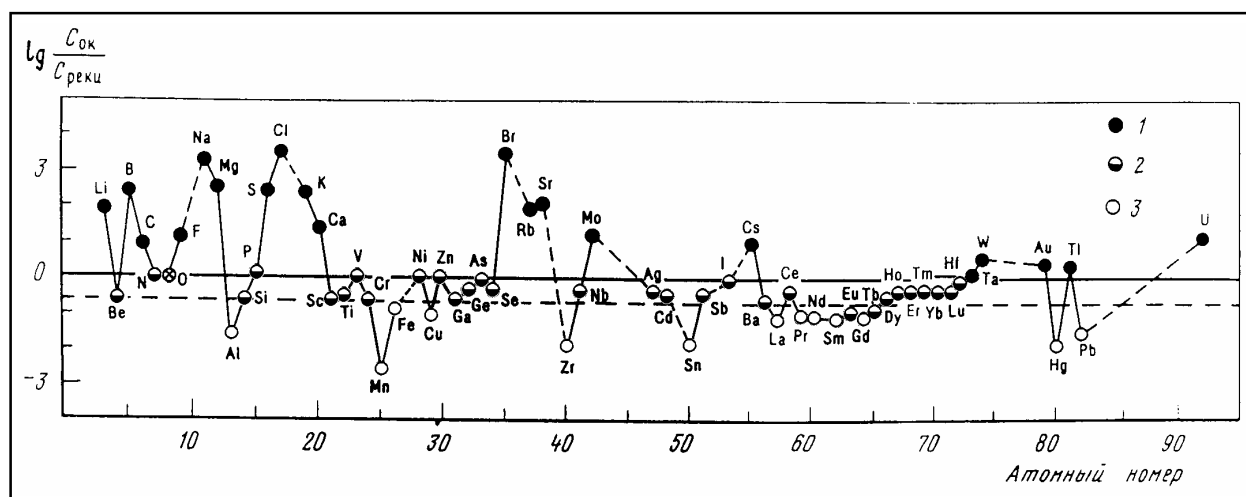


Рис. 2. Отношение средних концентраций растворенных форм химических элементов в океанской и речной воде: 1 - консервативный, 2 - биогенный, 3 - литогенный

менты с большими различиями их химических и физических свойств общим законом трансформации и миграции вещества на геохимическом барьере океан-атмосфера [1, 6, 9]. Характерной особенностью элементов, находящихся на этой линии, является преимущественная цикличность их потоков в системе океан - атмосфера - континент - океан [1, 6, 9]. Равенство тангенса угла наклона линии, полученной методом линейной регрессии, и линии, отражающей закономерность трансформации и миграции вещества на барьере океан-атмосфера (рис. 3) свидетельствует о практическом равенстве кинетических характеристик процессов перераспределения элементных составов между растворенной и твердой фазами на абсолютно разных геохимических барьерах океан-атмосфера и река-море. Принципиальная общность геохимических барьеров состоит в том, что они являются местами «сгущения жизни». Таким образом, регрессионный анализ позволил выявить общую тенденцию относитель-

ного увеличения концентраций «микроэлементов» в твердой фазе (и соответствующего уменьшения в растворе) в результате переработки косной материи живым веществом на геохимических барьерах океан-атмосфера и река-море. Выявленный нами нелинейный характер зависимости интенсивности процессов перераспределения элементных составов между растворенной и твердой фракциями в веществе, проходящем через барьеры литосфера-гидросфера, река-море, океан-атмосфера от их исходных концентраций приводит к принципиально важному выводу. Геохимическое поведение тяжелых металлов и радионуклидов, находящихся в природе в микроконцентрациях, не аналогично поведению их химических аналогов, содержащихся в литосфере и гидросфере в макроконцентрациях. Иначе говоря, перераспределение элементов в биосфере между растворимыми и не растворимыми формами зависит не только от их свойств, но в большой мере от их распространенности.

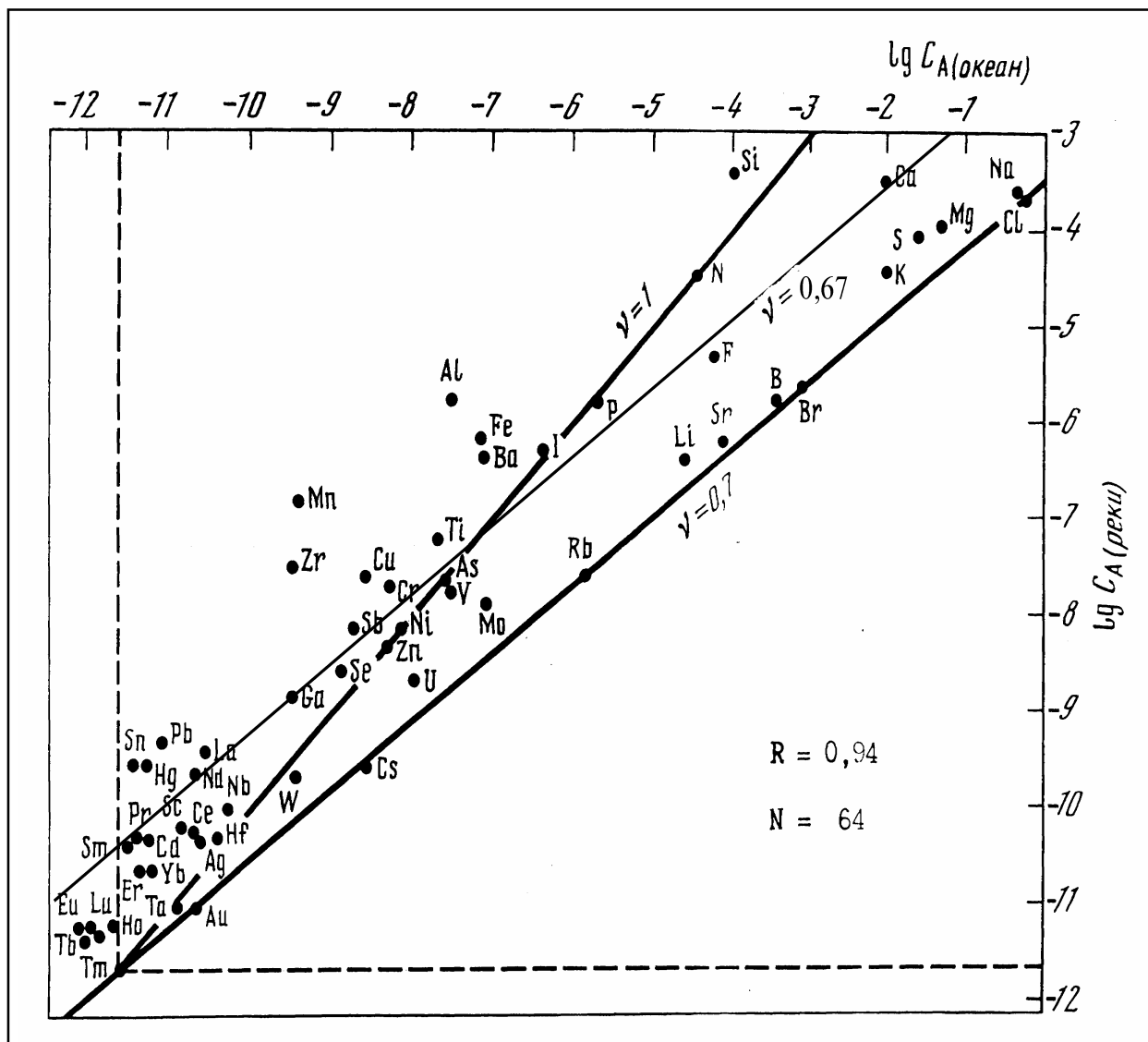


Рис. 3. Соотношение между средними концентрациями растворенных форм элементов в океанской и речной воде.

Новая системная методология приводит к постулату, который можно выразить в общем виде: биогеохимическая особенность каждого элемента определяет своеобразие зависимости между его содержанием (средней концентрацией) в океане и интенсивностью процессов его миграции через барьерные зоны гидросферы [1, 6, 9]. Графический способ представления нашего постулата обладает наибольшей информативностью в случае, когда сопоставление интенсивности глобальных процессов переноса элементов в барьерных зонах гидросферы с их средними концентрациями в океане осуществляется на плоскости $\lg C_{ок} - \lg \tau_{ок}$ (рис. 4), 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 и являются геометрическим местом точек, для которых отношение концентрации элементов в океане к их средним концентрациям в речном стоке - величина постоянная. Линии, проходящие под углом 45° к осям абсцисс и ординат, выявляют средние концентрации элементов в речном стоке (моль/л) в растворенной форме.

Элементы на этом системном графике (рис. 4) образуют группировки, отражающие общность их геохимических свойств. Линия, проходящая параллельно оси абсцисс через $\tau = 40\ 000$ лет (время пребывания воды в океане), разделяет

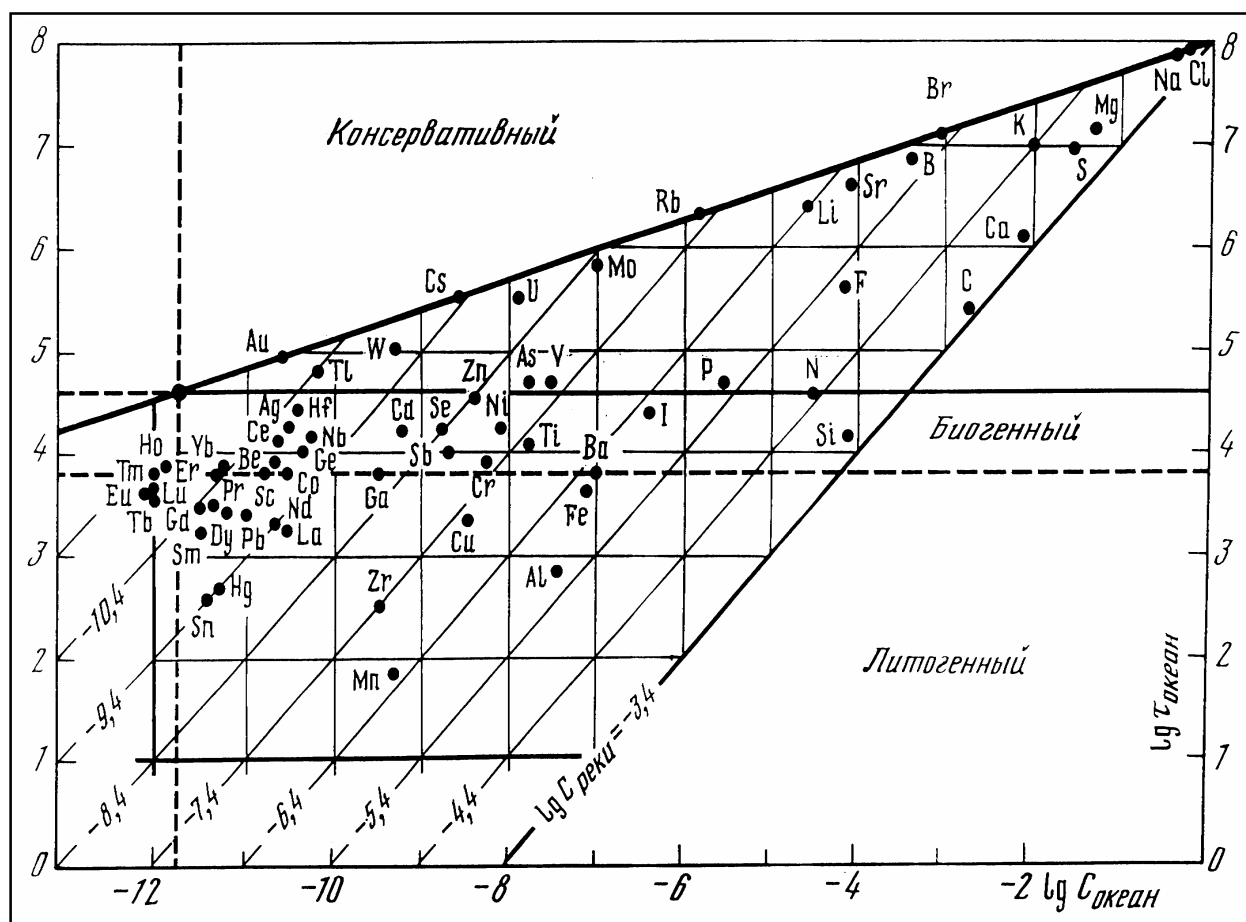


Рис. 4. Геохимическая система элементов в океане.

консервативно и не консервативно распределенные в океане элементы. К этой линии примыкают элементы, имеющие в океане биогенный тип распределения, что выявляет характерную особенность таких элементов - приблизительно равенство их средних концентраций в океанской и речной воде. Геохимическая система элементов выявила также группу элементов, условно названных литогенными, характерной особенностью которых является потеря большей части их речного стока на барьере река-море. Прямая, объединяющая Cl, Na, Br, B, Sr, Li, Rb, Mo, U, Cs, W, Tl, Re и Au, выявляет элементы, главную роль в геохимической судьбе которых играют процессы их циклического переноса в системе океан-атмосфера-континент-океан. 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

Рассмотрим прогностические свойства системы на примере следующих элементов: Be, Tl,

Au, P, V, I и Zn. Содержание Be и Tl в океанской воде достаточно изучено. Однако до недавнего времени отсутствовали данные о среднем содержании этих элементов в речном стоке. Бериллий отнесен к группе элементов биогенного типа распределения концентраций в океане. Следовательно, в геохимической системе бериллий должен находиться среди элементов такого типа распределения, что приводит к выявлению величины его средней концентрации в речном стоке в интервале $(2-14) \cdot 10^{-11}$ моль/л. Таллий имеет консервативный характер распределения в океане. Средняя величина его концентрации в речном стоке, согласно геохимической системе, должна находиться в интервале концентраций $(1-6) \cdot 10^{-11}$ моль/л. Содержание золота в океанской и речной воде изучено, и такие данные опубликованы. Однако вопрос о характере распределения его концентраций в океане оставался нерешенным. Геохимическая система позволила определить, что золото в океане имеет консервативный характер распределения [1, 6]. Последующие исследования подтвердили наши предсказания.

Явное несоответствие расположения в геохимической системе цинка среди литогенных элементов и его биогенным типом распределения в океане позволило нам определить, что оценка

средней концентрации цинка в речном стоке, по [11] в 100 раз превышает ее истинную величину. В работе [12] мы нашли хорошо обоснованное подтверждение правильности сделанного нами вывода о том, что естественная природная средняя концентрация цинка в речном стоке на два порядка ниже, чем величина, приведенная в работах указанных авторов. Таким же образом, используя геохимическую систему элементов, удалось доказать, что превышение современной оценки средних концентраций в речном стоке фосфора, ванадия и йода соответственно в 5, 12 и 40 раз по сравнению с более ранней оценкой не является результатом антропогенного влияния, а обусловлено в основном несовершенством прежних способов отбора и подготовки проб к анализу, а также нерегулярностью исследования и недостаточной представительностью прежних данных по содержанию фосфора, ванадия и йода в речных водах.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Д. Корж, Геохимия элементного состава гидросферы. М.: Наука, 1991. 243 с.
2. Э. Х. Ленц. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1950, 521 с.
3. K.W. Bruland. Trace elements in sea-water, Chemical Oceanography. London: Academic Press. 1983. V.8. Chapter 45. P. 157 - 220.
4. В. И. Вернадский. Очерки геохимии. М.: Наука, 1983. 422 с.
5. В.Л.Лебедев, Т.А.Айзатулин, К.М.Хайлов. Океан как динамическая система. Л.Гидрометеоиздат, 1974. 200 с.
6. В.Д. Корж. Биогеохимические аспекты формирования элементного состава вод Мирового океана //Проблемы биогеохимии и геохимической экологии./ Тр. Биогеохимической лаборатории. Т. 23. М.: Наука, 1999. С. 6-37.
7. С.А.Остроумов. О биогическом самоочищении водных экосистем. Элементы теории.// ДАН. 2004, Т. 396. № 1, С. 136-141.
8. В. И. Вернадский. Живое вещество и биосфера. М.: Наука.1994. 672 с.
9. В. Д. Корж. Закономерность фракционирования химических элементов в процессе их выноса из океана в атмосферу, Докл. АН СССР. 1987. Т. 292. N. 4. С. 822-827.
10. В. Д. Корж. Геохимическая система элементов в океане, Океанология. 1990. Т.30. вып.3.- С.406 - 416.
11. Martin J.M., Meybeck M. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers // Mar. Chem. 1979. V.7. N.2. P. 173-206.
12. A. M. Schiller, E. Boyle. Dissolved zinc in rivers, Nature. 1985. V. 317. P. 49-52.

GEOCHEMICAL SYSTEM OF ELEMENTS IN HYDROSPHERE AS THE ECOLOGICAL STANDARD

© 2009 V.D. Korzh

Institute of Oceanology it P.P.Shirshov of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow;
e-mail: okean41@mail.ru

Modern problems of a finding of admissible limits of influence of a technosphere on biosphere, optimization of interaction of a technosphere and biosphere, forecasting of ecological consequences of incidents in a technosphere and the rehabilitation organization in after the emergency the period make qualitatively new demands to knowledge. The decision of these actual problems demands working out of new methodological bases of studying of global geochemical cycles, creation of models of global processes weight an exchange and transformations of substances, constructions of geochemical systems of elements. The chemical compound of the seas and oceans grows out of processes of migration and substance transformation on biogeochemical barriers the river-sea and ocean-atmosphere, i.e. in places of "a life condensation". Stability of these processes - the main condition of stability of an ecosystem of hydrosphere. Biogeochemical criterion it is the most adequate reflecting an ecological condition of hydrosphere and its separate parts the measure of affinity of macrokinetic constants of the named processes occurring in actual practice, to corresponding constants defined in "normal conditions" can serve.

Keywords: biosphere, a technosphere, hydrosphere, geochemical system of elements, biogeochemical processes, chemical elements.

УДК 631.453+631.67.03(470.313)

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИКЛОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АГРОЛАНДШАФТАХ

© 2009 Н.Е. Кошелева

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва; e-mail: nataalk@mail.ru

Реализована модель динамического баланса Cu, Zn, Pb, Cd в агроландшафтах Мещерской низменности, описывающая функциональные связи между атмосферой, гидросферой, почвой и растениями. Определены особенности накопления металлов в компонентах ландшафта при различных сценариях полива загрязненными водами.

Ключевые слова: математическая модель, динамика, баланс, тяжелые металлы, агроландшафты, орошение

ВВЕДЕНИЕ

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 их миграции и аккумуляции в широком диапазоне условий и факторов внешней среды [5]. Эти модели описывают динамику эколого-геохимических показателей в агроландшафте, определяя связь между скоростями изменения миграционных потоков ТМ в пространстве и темпами изменения состояния компонентов ландшафта во времени.

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 агрополигоне «Мещера», в которых исследовалось воздействие загрязненных Cu, Zn, Pb, Cd поливных вод на состояние дерново-подзолистых супесчаных почв и качество сельскохозяйственных культур в севообороте [3, 6, 7]. Экологический риск в этом случае особенно велик из-за того, что находящиеся в водном растворе токсичные соединения ТМ очень подвижны и легкодоступны для растений. В ходе полевых опытов производился регулярный полив многолетних трав и корнеплодов водой, загрязненной Zn, Cd, Cu, Pb в концентрациях, превышающих ПДК в 1, 2, 4, 8 и 15 раз, удобрения не применялись.

СТРУКТУРА МОДЕЛИ

Основу модели составляют балансовые уравнения, дополненные эмпирическими зависимостями

для описания приходных и расходных составляющих [4, 5]. Основные процессы, определяющие многолетнюю динамику содержания ТМ в корнеобитаемом слое почвы, – это их поступление из атмосферы в виде жидких осадков, снега и твердых выпадений, а также с загрязненными поливными водами, аккумуляция в почве, транслокация в растения и отток в нижележащие горизонты. Процессы и факторы, определяющие баланс ТМ, отражает потоковая диаграмма модели (рис. 1).

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 (кг/м^3), t – время (годы), $Q(t)$ – поступление металла с атмосферными осадками, пылью и поливной водой ($\text{мг/м}^2 \cdot \text{год}$); $I(t)$ – выщелачивание металла из пахотного слоя; $P(t)$ – вынос с растительной продукцией. Для практических вычислений уравнение (1) аппроксимируется конечными разностями:

$$S(t+1) = S(t) + \frac{(Q - I - P) \cdot \Delta t}{m \cdot \rho}, \quad (2)$$

где Δt – временной шаг (один год). Реализация модели предполагает измерения начального содержания $S(t=0)$ металлов в почве и оценку первой части уравнения (1). Расходные составляющие баланса определяются в два этапа. В первом приближении они рассчитываются в зависимости от $S(t)$, а после вычисления $S(t+1)$ по формуле (2) уточняются: рассчитываются вновь при значении аргумента, равного $(S(t) + S(t+1))/2$.

Источниками ТМ в почвах агроландшафтов Мещерской низменности являются атмосферные выпадения техногенного происхождения и поступление с поливной водой:

$$Q(t) = (h \cdot C_1 + V \cdot C_2) \cdot 10^{-4} / \rho + Ts \cdot C_3, \quad (3)$$

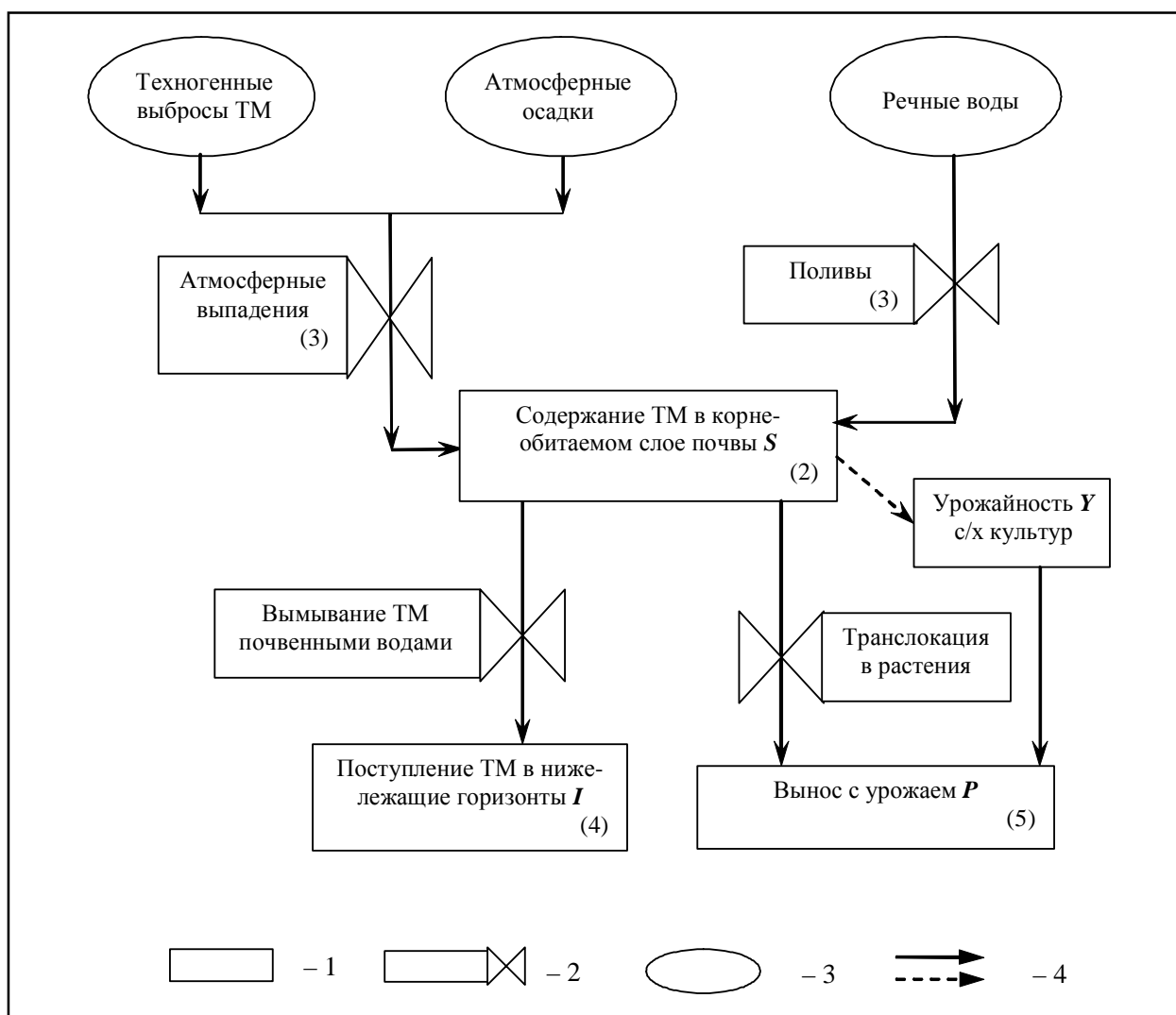


Рис. 1. Структура динамической модели баланса тяжелых металлов в агроландшафтах при использовании загрязненных поливных вод: 1 - переменные состояния; 2 - процессы; 3 - источники ТМ; 4 - потоки вещества и информации

где h и V - слой атмосферных осадков и оросительная норма (м/год); T_s - объем твердых выпадений (кг/га · год); C_1 , C_2 и C_3 - содержание ТМ в осадках, поливной воде и пыли (мг/кг).

Выщелачивание $I(t)$ вниз по почвенному профилю оценивается по данным лизиметрических опытов в зависимости от концентрации ТМ в корнеобитаемом слое почвы:

$$I(t) = f_1(S). \quad (4)$$

Вынос металлов с растительной продукцией $P(t)$ (мг/га) рассчитывается по урожайности возделываемой культуры Y (кг/га) и концентрации C_p в ней элемента (мг/кг):

$$P(t) = Y \cdot C_p. \quad (5)$$

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 выносится из почвы сорными растениями.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ И ВХОДНЫХ ФУНКЦИЙ МОДЕЛИ

Информационное обеспечение модели для агроландшафтов Мещерской низменности включает статистическое описание атмосферной составляющей баланса ТМ, эмпирические функции поступления металлов с поливными водами, их поглощения сельскохозяйственными культурами, урожайности и выноса металлов из пахотного слоя с нисходящим током почвенных вод.

Метеоданные за 1993-2005 гг. позволяют установить техногенную геохимическую специализацию района, преобладающие формы отдельных

металлов в составе аэротехногенного потока и их межгодовую изменчивость (табл. 1). Интенсивность атмосферных выпадений указывает на то, что район испытывает значительную техногенную нагрузку от предприятий электроэнергетики, нефтеперерабатывающей промышленности, производства строительных материалов, а также от автотранспорта [8]. Ежегодный привнос ТМ с поливными водами зависит от концентрации в них ТМ (фон, 1, 2, 4, 8, 15 ПДК) и оросительной нормы. Его межгодовая изменчивость определяется 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 (рис. 2). Влияние загрязнения почв ТМ на урожайность оценивается по величине суммарного показателя Zc [2]. Построенные по экспериментальным данным функции урожайности равны константе Y_0 при невысоких концентрациях ТМ

(фоновые условия) и убывающей (полиномиальной или логарифмической) функции второго порядка при превышении пороговых значений Zc (табл. 2). Вынос ТМ сорными растениями принят равным 10,6 % от количества ТМ, поглощенных культурными растениями [3].

Интенсивность вымывания ТМ из пахотного слоя почвы $I(t)$ задается по данным лизиметрических опытов [3, 7], которые обобщены в виде статистических зависимостей выноса ТМ с почвенными водами от их содержания S в пахотном слое почвы (табл. 3). Они характеризуются нелинейностью, которая проявляется в усилении выноса ТМ с ростом их содержания в почве при ослаблении связей ТМ с тонкодисперсными компонентами почвы.

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

Независимые определения всех составляющих баланса в уравнении (1), а также содержания ТМ в начале и в конце каждого вегетационного периода позволили оценить точность экспериментальных данных в каждой повторности для

Таблица 1. Статистические параметры атмосферной составляющей баланса тяжелых металлов

Статья баланса	Поступление металлов с атмосферными осадками		Поступление металлов с сухими выпадениями	
	среднее, мг/м ² -год	дисперсия	среднее, мг/м ² -год	дисперсия
Cd	0,0419	0,0005	0,2931	0,0102
Cu	0,7782	0,3594	14,8668	149,6497
Pb	0,5002	0,0300	4,0335	1,5994
Zn	1,7735	0,5759	18,0615	123,5859

Таблица 2. Эмпирические зависимости для оценки урожайности сельскохозяйственных культур по суммарному показателю загрязнения почвы тяжелыми металлами

Культура	Фоновые условия		Условия загрязнения	Коэффициент регрессии R
	Zc	Y_0	Уравнение связи $Y = f(S)$	
Горохо-овсяная смесь	$Zc \geq 0$	$Y_0 = 0$	$Y = 0,882 S^2 - 2,83 S + 2,96$	0,912
Вико-овсяная смесь	$Zc \geq 0$	$Y_0 = 0$	$Y = -0,131 S^2 - 0,227 S + 1,20$	0,643
Многолетние травы	$Zc \geq 1,1$	$Y_0 = 0,9$	$Y = -1,49 S^2 + 2,39 S + 0,037$	0,787
Морковь	$Zc \geq 1,1$	$Y_0 = 2,8$	$Y = -4,71 S^2 + 7,18 S + 0,663$	0,750
Редис	$Zc \geq 0$	$Y_0 = 0$	$Y = -1,80 \ln(S) + 2,45$	0,733

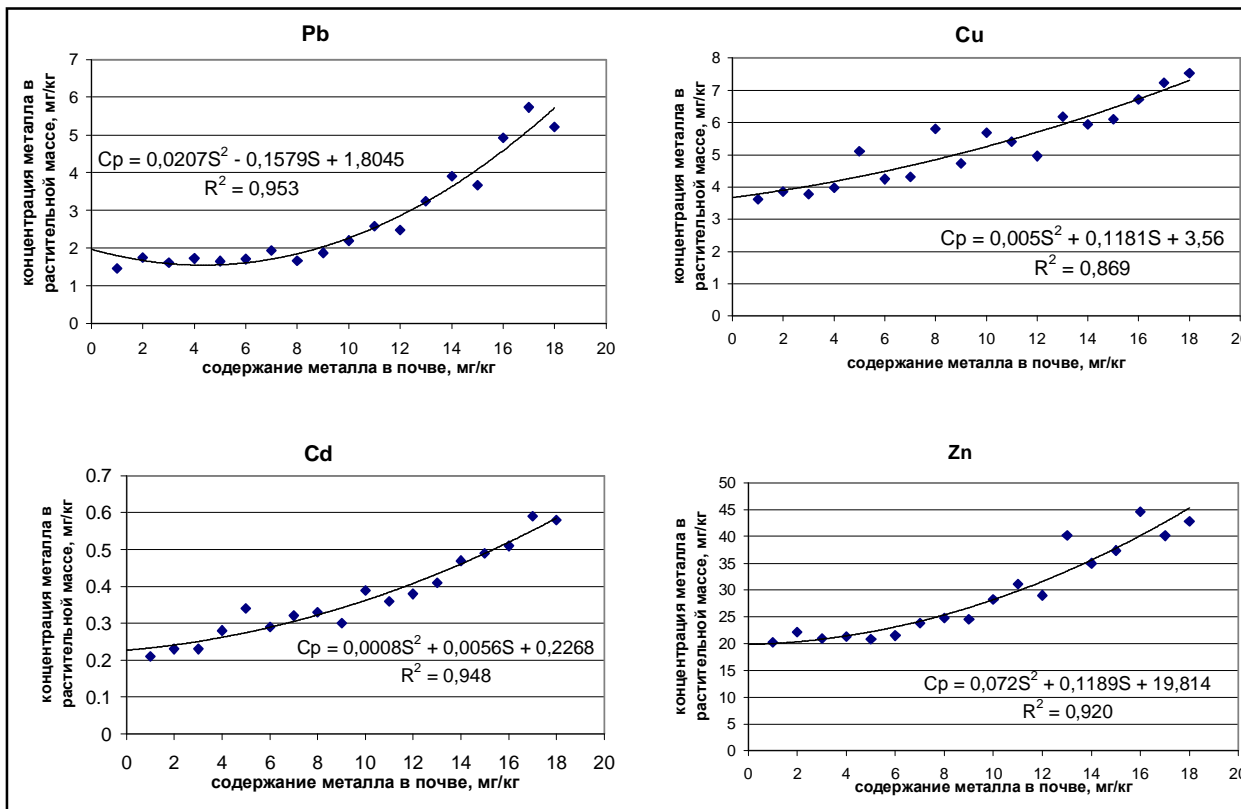


Рис. 2. Статистические связи между содержанием Т.М. в корнеплодах моркови (Ср) и в почве (S)

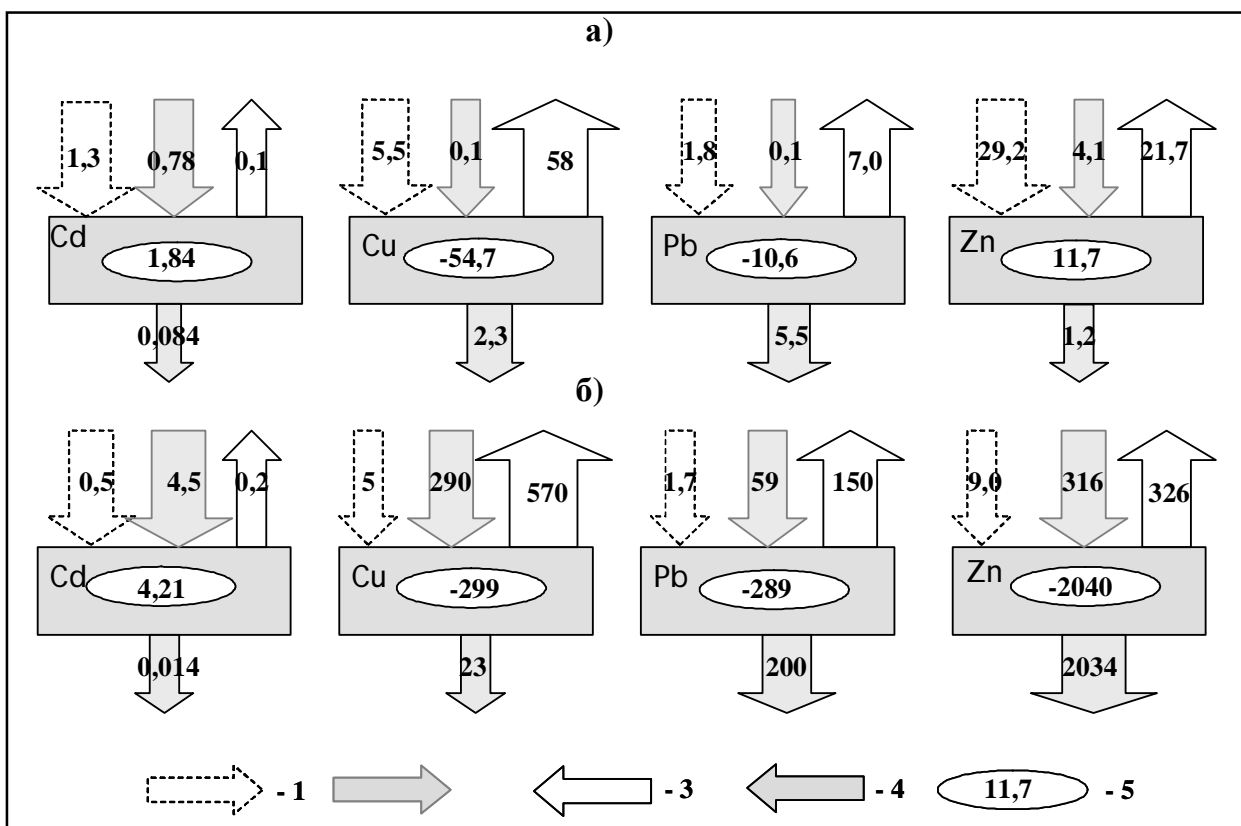


Рис. 3. Структура баланса Т.М. в почве, засеянной многолетними травами, в фоновых условиях (а) и при поливе загрязненными водами с содержанием Т.М., равным 4 ПДК (б): 1 - атмосферная составляющая; 2 - приход с поливными водами; 3 - поглощение растениями; 4 - отток в нижний горизонт; 5 - аккумуляция в почве

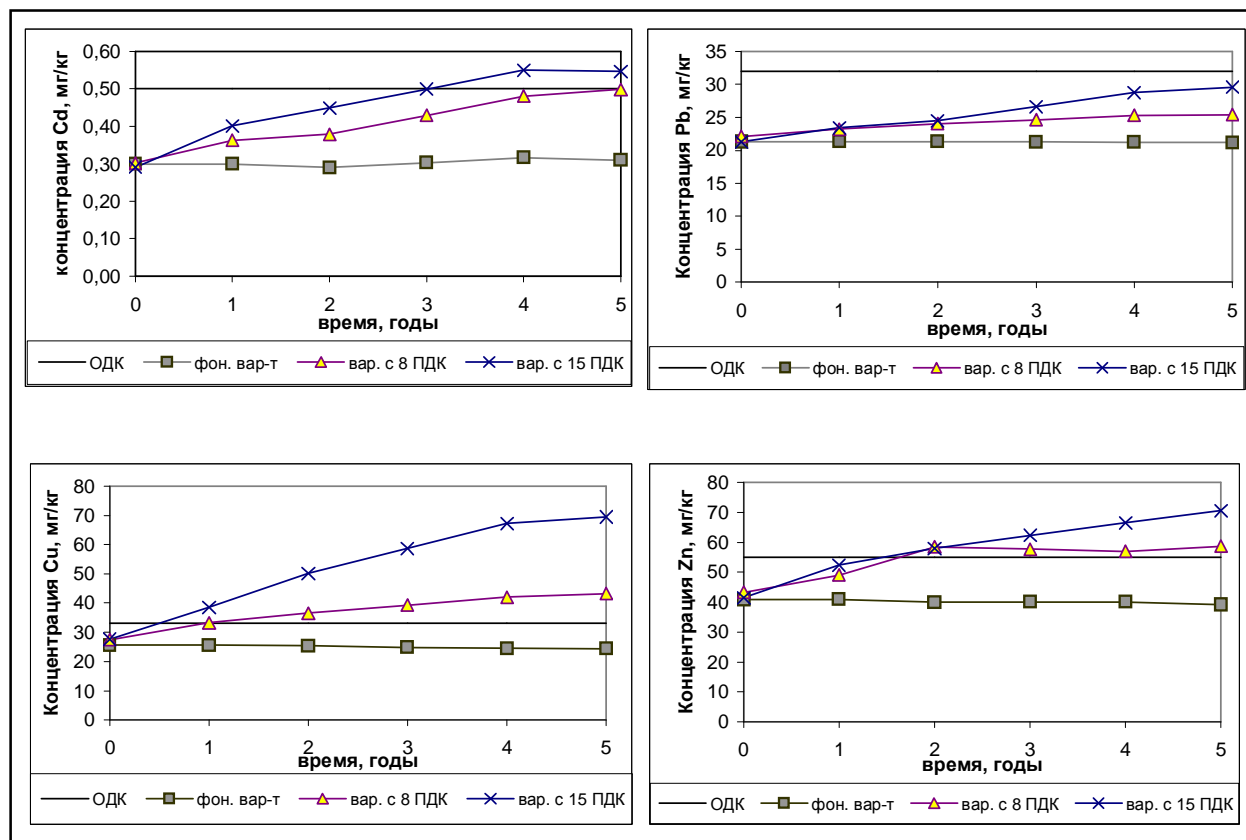


Рис. 4. Динамика концентраций ТМ в верхнем (0-20 см) слое дерново-подзолистых почв в фоновых условиях и при поливе загрязненными водами

Таблица 3. Статистические связи для оценки среднего выноса тяжелых металлов с внутрипочвенным стоком (мг/м² в год) по их содержанию в корнеобитаемом слое почвы

Металл	Уравнение связи $I=f(S)$	R
Cd	$I = 0,0721 \cdot e^{0,0122 \cdot S}$	0,988
Cu	$I = 0,152 \cdot e^{9 \cdot 10^{-5} \cdot S}$	0,979
Pb	$I = 0,890 \cdot e^{0,0003 \cdot S}$	0,980
Zn	$I = 0,752 \cdot e^{0,0002 \cdot S}$	0,986

всех вариантов опыта и провести верификацию модели (табл. 4). Величины невязок баланса 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 данных, использованных для оценки параметров и входных функций.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представление о структуре баланса ТМ в агроландшафтах в фоновых условиях и при использовании загрязненных поливных вод с концентрациями ТМ, равными 4 ПДК, дает рис. 3, на котором приводятся величины привноса, аккумуляции и выноса ТМ для многолетних трав.

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 в поливных водах 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

Таблица 4. Результирующий баланс Pb в корнеобитаемом (0-20 см) слое дерново-подзолистой почвы, осредненный по вариантам опыта

Сельскохозяйственная культура	Вариант опыта	Концентрация Pb в почве, мг/кг		Общее поступление Pb, мг/кг	Суммарный вынос Pb, мг/кг	Невязка баланса, мг/кг
		на начало вегетационного периода $S(t)$	на конец вегетационного периода $S(t+1)$			
Горохо-овсяная смесь	фон	6,2767	6,2967	0,0171	0,0156	0,0184
	1 ПДК	20,0367	20,1967	0,1595	0,0291	0,0296
	2ПДК	28,0767	28,3767	0,3023	0,0560	0,0536
	4 ПДК	33,6100	34,2000	0,5881	0,0782	0,0802
	8 ПДК	41,7633	42,9233	1,1595	0,1111	0,1116
	15 ПДК	48,1233	50,2833	2,1595	0,2206	0,2211
Вико-овсяная смесь	фон	6,2967	6,3100	0,0217	0,0188	0,0104
	1 ПДК	20,1967	18,6567	0,1546	0,0388	-1,6558
	2ПДК	28,3767	31,3267	0,2879	0,0694	2,7315
	4 ПДК	34,2000	34,1033	0,5546	0,0992	-0,5521
	8 ПДК	42,9233	43,6833	1,0879	0,1317	-0,1962
	15 ПДК	50,2833	51,3433	2,0213	0,26097	-0,7003
Многолетние травы	фон	6,3100	6,2367	0,0133	0,0127	-0,0739
	1 ПДК	18,6567	19,4133	0,1272	0,0306	0,6601
	2ПДК	31,3267	31,9467	0,2415	0,0625	0,4410
	4 ПДК	34,1033	31,8667	0,4701	0,0678	-2,6389
	8 ПДК	43,6833	44,3200	0,9272	0,1186	-0,1719
	15 ПДК	51,3433	53,4367	1,7272	0,1956	0,5617
Морковь	фон	6,3100	6,2367	0,0133	0,0300	-0,0567
	1 ПДК	18,6567	19,4133	0,1272	0,0401	0,6696
	2ПДК	31,3267	31,9467	0,2415	0,0686	0,447
	4 ПДК	34,1033	31,8667	0,4701	0,0785	-2,6283
	8 ПДК	43,6833	44,3200	0,9272	0,1393	-0,1512
	15 ПДК	51,3433	53,4367	1,7272	0,2264	0,5925
Редис	фон	6,2367	6,1967	0,0220	0,0358	-0,0262
	1 ПДК	19,4133	19,2633	0,0979	0,0530	-0,1950
	2ПДК	31,9467	31,9067	0,1741	0,0800	-0,1342
	4 ПДК	31,8667	31,9467	0,3265	0,0806	-0,1659
	8 ПДК	44,3200	560,2830	0,6313	1,4518	-0,3950
	15 ПДК	53,4367	54,2800	1,1646	0,2802	-0,0411

сорняками для них равен 92,6% и 98,7% соответственно, то при концентрациях ТМ в поливных водах 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 в поливных водах, 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 высоких концентрациях ТМ в поливных водах, равных 8 и 15 ПДК. Относительная подвижность металлов, которая сопровождается уменьшением их аккумуляции в почвах, характеризуется рядом: $Zn > Cd > Pb > Cu$.

Транслокацию в растения при низких концен-

трациях ТМ в почве отражает последовательность $Cu > Zn > Pb > Cd$; при максимальных концентрациях в поливной воде металлы расположены в обратном порядке. Это обусловлено фитотоксичностью высоких концентраций Cd и Pb, которые подавляют поглощение корнями необходимых растениям микроэлементов – Zn, Cu и др. [1]. Сравнение уровней накопления ТМ различными сельскохозяйственными культурами показало, что наибольшей транслокационной способностью по отношению ко всем ТМ обладали корнеплоды – редис и морковь, а наименьшей – горохо-овсяная смесь.

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 ориентировочно допустимым концентрациям (ОДК) (рис. 4). Следствием этого является ухудшение качества растени-

еводческой 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 указывают на повышенную опасность загрязнения почв Cu и Cd, которые активно аккумулируются в почве, урожай - Cd и Pb и грунтовых вод - Zn и Pb, мигрирующих с внутрипочвенным стоком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты моделирования свидетельствуют о том, что динамические модели биогеохимических циклов ТМ являются эффективным инструментом оптимального управления агроландшафтами. Они дают количественную оценку экологического риска загрязнения почв и растений при различных уровнях и видах техногенной нагрузки. Многовариантные расчеты по модели позволяют выбрать и обосновать наиболее эффективные направления борьбы с загрязнением, которые включают: уменьшение поступления ТМ в агроландшафты за счет более полной очистки сточных вод и техногенных выбросов в атмосферу; снижение подвижности ТМ в почве путем их перевода в труднорастворимые соединения и прочносвязанные формы; подбор сельскохозяйственных и технических культур, активно накапливающих ТМ [4].

Разработанная модель обеспечивает теоретическую основу для обобщения и использования многочисленных опытных данных об отдельных взаимосвязях в системе «атмосфера–при-

родные воды–почва–растение». Для этого целесообразно создать региональные базы данных, в которых бы накапливалась экспериментальная информация, получаемая в полевых, микрополевых и вегетационных опытах с различными почвами и сельскохозяйственными культурами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Битюцкий Н.П.* Необходимые микроэлементы растений. СПб: Изд-во ДЕАН. 2005.
2. Геохимия окружающей среды *Саен Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др.* М.: Недра, 1990.
3. *Жигулина Е.В.* Агрэкологическое обоснование способов реабилитации дерново-подзолистых почв, загрязненных тяжелыми металлами (на примере Рязанской обл.). Автореф. дис. канд. с.-х. наук. Рязань, 2006.
4. *Коселева Н.Е.* Моделирование биогеохимических циклов тяжелых металлов в агроландшафтах на основе балансового подхода // Геохимия ландшафтов и география почв / Под ред. Н.С. Касимова и М.И. Герасимовой. Смоленск: Ойкумена, 2002.
5. *Коселева Н.Е.* Математическое моделирование ландшафтно-геохимических процессов // География, общество, окружающая среда. Т. II: Функционирование и современное состояние ландшафтов. М.: Изд. дом Городец, 2004.
6. *Мажайский Ю.А., Коселева Н.Е., Дорохина О.Е.* Баланс тяжелых металлов в агроэкосистемах Мещерской низменности при использовании загрязненных поливных вод // Агрохимия, 2008, № 12.
7. *Матюхин Р.И.* Экологическое обоснование комплексных приемов реабилитации дерново-подзолистых почв, загрязненных тяжелыми металлами (на примере левобережья р. Оки). Автореф. дис. канд. биол. наук. Рязань, 2005.
8. Сохранение и повышение продуктивности мелиорируемых земель центра Нечерноземной зоны России и Беларуси / Под ред. *Мажайского Ю.А., Лихацевича А.П.* Рязань; Ряз. гос. сельхоз. акад., 2005.

EXPERIENCE OF MODELING OF HEAVY METALS CYCLING IN THE AGROLANDSCAPES

© 2009 N.E. Kosheleva

Moscow State University, Moscow; e-mail: natak@mail.ru

The dynamic model of Cu, Zn, Pb, Cd budget in the agricultural landscapes of the Meshchera lowland has been developed. It describes the functional relationships between atmosphere, hydrosphere, soil and vegetation. The patterns of metal accumulation in the landscape compartments under the different scenarios of irrigation by contaminated waters were determined.

Key words: *mathematical model, dynamics, budget, heavy metals, agriculture, irrigation*

УДК: 551.51

РОЛЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ФОРМИРОВАНИИ ПОТОКОВ CO₂ НА ВЕРХОВОМ БОЛОТЕ

© 2009 Ю.А. Курбатова¹, Н.В. Шалухина¹, А.В. Варлагин¹, Ч. Ли²

¹Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, г. Москва; e-mail:kurbatova.j@gmail.com

²Институт исследования Земли, океанов и космоса университета Нью Хемпшира, США, Нью Хемпшир

Модель денитрификации – декомпозиции (Forest-DNDC) была применена для оценки потоков CO₂ на верховом болоте южной тайги в европейской части РФ (Тверская обл.). Исследование было проведено в два этапа. На первом этапе результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными за потоками CO₂, которые были получены с помощью техники пульсационных наблюдений. На втором этапе были выполнены прогнозные оценки потоков CO₂ между экосистемами и атмосферой при возможных изменениях уровня грунтовых вод и температуры воздуха. Установлено, что рост температуры воздуха и увеличение глубины уровня грунтовых вод может привести к существенному росту потоков CO₂ в атмосферу в экосистемах южной тайги Европейской части РФ.

Ключевые слова: потоки CO₂, южная тайга, верховое болото, модель Forest-DNDC.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в контексте проблемы глобального изменения климата исследования роли природных экосистем в формировании баланса парниковых газов сохраняют особую актуальность. Болота и заболоченные земли с наличием торфа являются важными элементами ландшафта, способными к аккумуляции углерода в геологическом масштабе времени. В северном полушарии в зоне бореальных лесов Евразии и Северной Америки площадь торфяных болот составляет около 3.5×10^6 км² [16]. По различным оценкам запасы углерода в заболоченных землях бореального пояса равны $114-882 \times 10^9$ т С [5, 12, 17]. Россия обладает одним из самых больших в мире запасов торфяных болот. Болота и заболоченные земли занимают не менее 20% территории и представляют около 2/5 площади всех торфяных болот мира [1]. Запасы углерода в болотах РФ оцениваются от $113,5 \times 10^9$ т [20] до 200×10^9 т [8], что составляет от 20% до 50% запасов углерода в торфяных болотах в целом. Несмотря на то, что болота и заболоченные земли занимают около 3% земной поверхности, они, как правило, не входят в глобальные климатические модели и не рассматриваются в климатических сценариях. Исследования в основном сосредоточены на влиянии глобальных климатических изменений на лесные и морских экосистемы [11]. Болота и заболоченные земли традиционно оцениваются как источник водяного пара для атмосферы и как экосистемы, depo-

нирующие углерод. Однако экспериментальные исследования, выполненные в последнее время, подтвердили значительную изменчивость неттопотока углерода между болотными экосистемами и атмосферой, которая определяется комплексом факторов [4, 6]. Математические модели, позволяющие рассчитывать основные составляющие углеродного баланса на основе связей углеродного цикла с температурой, влажностью, уровнем грунтовых вод, интенсивностью солнечной радиации и характеристиками почвенного профиля являются важным инструментом экологических исследований, позволяющим расширить представления о механизме формирования баланса углерода и оценить влияние климатических изменений на потоки CO₂.

Основной целью данной работы стало исследование влияния температурных условий и глубины залегания грунтовых вод на динамику потоков углерода между поверхностью болотной экосистемы и атмосферой на основе анализа результатов математического моделирования.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Математическое моделирование. Модель Forest-DNDC (денитрификации - декомпозиции), используемая в данном исследовании, является математической моделью, описывающей потоки воды, углерода, азота и метана в лесных и болотных экосистемах [19]. Модель оценивает гидрологические и биохимические процессы в экосистеме, что позволяет описывать как анаэ-

робные, так и аэробные процессы. Модель Forest - DNDC состоит из двух основных блоков. Первый блок включает три подмодели, описывающие: температурно-влажностный режим почвы, растительный покров, процессы декомпозиции почвенного углерода. Подмодели оценивают зависимости между климатическими факторами, структурой почвы, растительным покровом, антропогенной активностью и характеристиками почвенного профиля. Второй блок состоит из подмоделей: нитрификации, денитрификации и ферментации и описывает трансформацию углерода и азота под воздействием факторов окружающей среды. Результаты моделирования позволяют оценивать суточные и годовые потоки CO_2 , N_2O , NO , N_2 , CH_4 . Расчетные значения нетто-экосистемного обмена CO_2 (NEE) равны разнице между нетто-первичной продукцией (GPP) и дыханием автотрофов (Ra) и гетеротрофов (Rh). Динамика почвенного увлажнения оценивается на основе данных о суточных суммах осадков и испарения, структуры почвы, потерь влаги из-за процессов вымывания. Для моделирования потоков газов в болотных экосистемах необходимы ежедневные данные об уровне грунтовых вод (WT) с целью определения степени увлажнения торфяной залежи. В качестве данных о WT могут быть использованы результаты полевых наблюдений, данные эмпирических зависимостей, результаты расчетов гидрологических моделей, описывающих динамику воды в болотных экосистемах. Модель Forest-DNDC была протестирована на основе данных наблюдений за потоками CO_2 в лесных экосистемах РФ и Европы [9, 10, 14, 15]. В данном исследовании модель Forest-DNDC была использована с целью оценки потоков CO_2 между поверхностью верхового болота и атмосферой при возможных климатических изменениях.

Исследование было выполнено в два этапа. На первом этапе результаты численного моделирования были сопоставлены с экспериментальными значениями потоков CO_2 , которые были получены на верховом болоте. В качестве гидрометеорологических данных (минимальная и минимальная температура воздуха, суточные суммы осадков, потоки солнечной радиации) были использованы наблюдения ближайшей к болотному массиву метеорологической станции, расположенной в 5 км от болотного массива данные измерительного комплекса, установленного на верховом болоте. Для расчета были использованы следующие характеристики почвенной залежи: глубина торфяного горизонта – 1,5 м; плотность торфа – 0,1 г см³; пористость - 0,8; общее содержание углерода в торфяной залежи мощностью 1,5 м - 313 300 кг С га⁻¹. При расчетах растительный покров был охарактеризован как моховой (3000 кг С га⁻¹) и состоящий из сосудистых растений (3000 кг С га⁻¹). Основные физиологические параметры растительного покрова приведены в таблице 1. После уточнения параметров модели, на втором этапе нашего исследования Forest - DNDC была использована с целью оценки влияния роста температуры воздуха и изменения уровня грунтовых вод на NEE верхового болота. Пять альтернативных сценариев изменения температуры воздуха и уровня грунтовых вод были использованы при оценке NEE. Потоки оценивались при последовательном росте температуры воздуха на 2,4°C и/или увеличении глубины залегания грунтовых вод на 10 или 20 см. Выбор данных сценариев был обусловлен существующими прогнозами роста летних температур воздуха и увеличение частоты экстремальных погодных явлений, в том числе засух, в данном регионе при прогнозируемых климатических изменениях [13].

Таблица 1. Параметры моховой и сосудистой растительности верхового болота, используемы в модели Forest-DNDC

Вид	Максимальный фотосинтез, мкмоль м ⁻² с ⁻¹	Минимальная температура фотосинтеза, °С	Максимальная температура фотосинтеза, °С	Оптимальная температура фотосинтеза, °С	Макс. LAI	Глубина корней, м
Мхи	10	5	35	20	0,1	0,5
Сосудистые растения	10,3	5	30	20	0,28	0,3

Объект исследования и экспериментальные наблюдения. В качестве объекта исследования было выбрано верховое болото, расположенное на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного запо-

ведника (ЦЛЗ) в Тверской обл. (56°N, 33°E). Территория ЦЛЗ находится в зоне умеренно-континентального климата, со среднегодовой температурой воздуха 3,8°C и годовой суммой осадков 731 мм. Продолжительность безморозного

периода в среднем составляет 111 дней [2]. Согласно классификации, принятой в Гидрометеослужбе РФ [3], выбранный для исследования болотный массив относится к выпуклым талым олиготрофным комплексным грядово-мочажинным болотам с сезонным промерзанием. Площадь болотного массива 617 га. Состав болотных формаций характеризуется значительной неоднородностью. Наибольшее распространение имеет сфагново-пушицевый тип микроландшафта.

Исследования потоков двуокиси углерода между поверхностью болотного массива и атмосферой были проведены в рамках проекта ЕС «Eurosiberian Carbonflux». В целом измерения, обработка и анализ данных были выполнены с использованием унифицированных подходов, принятых на европейской сети станций долговременного мониторинга потоков CO₂ [7]. Экспериментальные данные о NEE были получены как ковариация между пульсациями концентрации CO₂ и вертикальной составляющей скорости ветра на высоте 6 м над поверхностью болота. Для измерения пульсаций температуры и составляющих скорости ветра использовался ультразвуковой анемометр (Solent R3, Gill Instruments, Lunington, UK). Наблюдения за пульсациями CO₂ были выполнены с помощью инфракрасного газоанализатора (IRGA, Li-Cor 6262, Lincoln, USA). Потоки CO₂ в процессе обработки и анализа усреднялись за 30 минут. Для оценки пространственного осреднения была использована модель Shuepp [18]. Согласно расчетам по этой модели, при установке датчиков на высоте 6 м в среднем за

сутки 90% значений измеряемого потока соответствует взвешенному среднему значению вдоль траектории переноса с линейными размерами 1100-1200 м. Соответственно, анализируемые данные в целом характеризуют потоки CO₂ на экосистемном уровне осреднения. Дополнительно измерялись температура и влажность воздуха, температура почвы на глубинах 5, 15, 50 и 100 см, давление, основные составляющие радиационного баланса. Подробности измерений описаны в работе [6]. Наблюдения за потоками проводились в течение трех вегетационных сезонов 1998-2000 гг. В данной работе анализировались данные только 1999 г., что было обусловлено двумя основными причинами: (1) 1999 г характеризовался наиболее длительным и полным рядом наблюдений; (2) в 1999 г болотный массив функционировал как источник CO₂ для атмосферы (т.е. кумулятивный поток экосистемного дыхания был выше общей первичной продукции), что может служить прототипом функционирования верхового болота в условиях роста температуры воздуха и опускания уровня грунтовых вод, а также во время длительных засух.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основной характеристикой модели, по которой проводилось сопоставление экспериментальных и расчетных величин являлся нетто-экосистемный обмен CO₂ (C). Именно эта характеристика носит комплексный характер, т.к. именно на NEE влияет вся совокупность параметров, вхо-

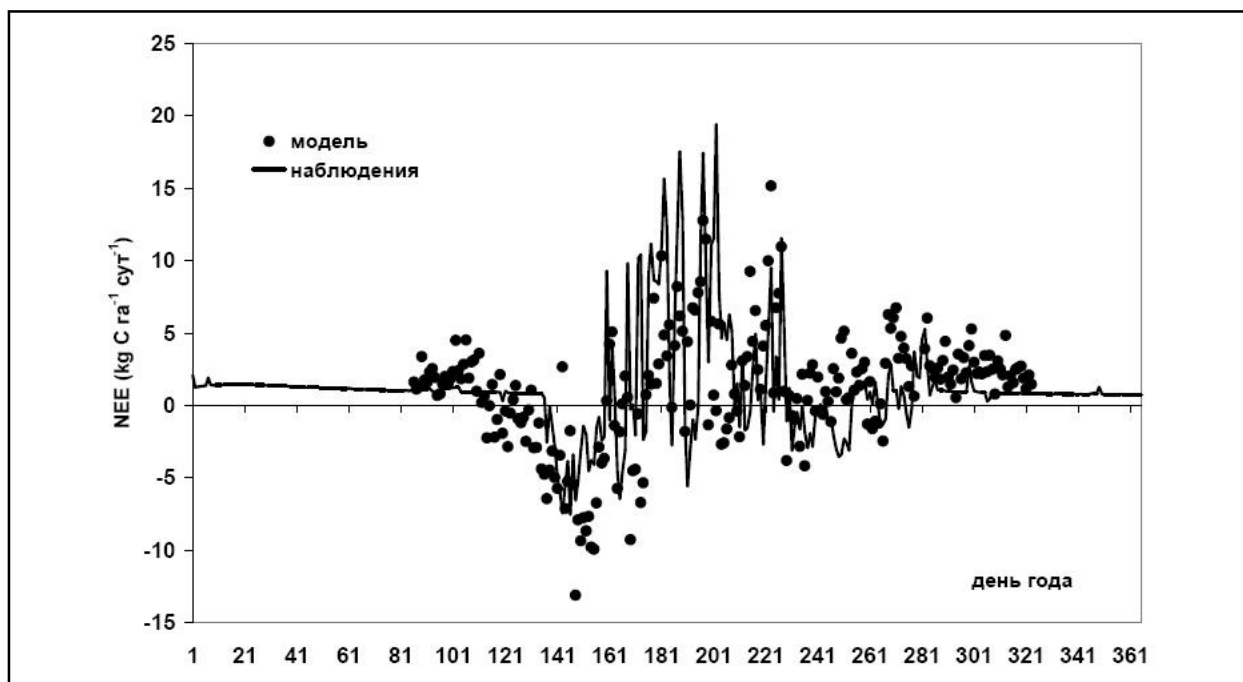


Рис. Экспериментальные и расчетные значения NEE для 1999 г.

дящих в модель. NEE (или за более длительные периоды времени – нетто-экосистемная продукция (NEP) является важнейшей характеристикой экосистемы, т.к. на основании этой величины можно определить характер функционирования экосистемы (доминируют ли в ней процессы синтеза или деструкции). На рисунке приведено сопоставление результатов измерения и расчетов суточных сумм NEE для 1999 г.

Полученные результаты подтвердили, что модель Forest-DNDC адекватно описывает потоки CO₂ на верховом болоте. Результаты моделирования позволяют лучше интерпретировать полученные экспериментальные данные и объяснять механизмы формирования углеродного баланса болотной экосистемы. Выполненные прогнозные оценки показали, что в условиях изменения климата, которые могут сопровождаться ростом температуры воздуха и увеличением глубины уровня грунтовых вод верховые болота могут стать значительным источником CO₂ для атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сирин А.А., Минаева Т.Ю.* Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации. М.: Геос. 2001. 190 с.
2. *Минаева Т.Ю., Шапошников Е.С.* Характеристика региона и природные условия территории заповедника // Сукцессионные процессы в заповедниках России и проблемы сохранения биологического разнообразия. Спб. 1999. С. 296-299.
3. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 8. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 295 с.
4. *Alm J., Talanov A., Saarnio S et al.* Reconstruction of the carbon balance for mire sites in a boreal oligotrophic pine fen // Finland – Oecologia. 1997. V. 110. P. 423 - 431.
5. *Armentano T., Menges E.* Patterns of change in the carbon balance of organic soil wetlands of the temperate zone // J. Ecol. 1986. V. 74. P. 755-774.
6. *Arnth A., Kurbatova J., Kolle O. et al.* Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian bog II. Interseasonal and interannual variability of CO₂ fluxes // Tellus. 2002. V. 54B. P. 514-530.
7. *Aubinet M., Grelle A., Ibrom A. et al.* Estimates of annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology // Adv. Ecol. Res. 2000. V. 30. P. 113-175.
8. *Botch M.S., Kobak K., Vinson T.S.* Carbon pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union // Global Biogeochem Cycles. 1995. V. 9. P. 37-46.
9. *Butterbach-Bahl K., Kesik M., Miehle P., Papen H., Li C.* Quantifying the regional source strength of N trace gases across agricultural and forest ecosystems with process based models // Plant and Soil. 2004. V. 260. P. 311 - 329.
10. *Cui J., Li C., Sun G., Trettin C.* Linkage of MIKE SHE to Wetland-DNDC for carbon budgeting and anaerobic biogeochemistry simulation // Biogeochemistry. 2005 V. 72. P. 147-167.
11. *Fan S., Gloor M., Mahlman J. et al.* A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and model // Science. 1998. V. 282. P. 442 – 447.
12. *Gorham E.* Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climate warming // Ecol. Appl. 1991. V. 1. P. 182-195.
13. *IPCC 2007 Climate Change: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press: 2007. 960 p.
14. *Kurbatova J., Li C., Varlagin A., Xiao X., Vygodskaya N.* Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia // Biogeosciences. 2008. V. 5. P. 969-980.
15. *Miehle P., Livesley S. J., Feikema P. M., Li C., Arndt S. K.* Assessing productivity and carbon sequestration capacity of Eucalyptus globulus plantations using the process model Forest-DNDC: Calibration and validation // Ecological Modelling. 2006. V. 192. P. 83-94.
16. *Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.* Eurasian Mires of the Southern Taiga Belt: Modern Features and Response to Holocene Paleoclimate // Wetlands and Natural Resource Management. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Ecological studies. 2006. V. 190. P. 315-341.
17. *Post W., Emanuel W., Zinker P.* Soil carbon pools and word life zones // Nature. 1982. V. 298. P. 156-159.
18. *Shuepp P.H., Leclers M.Y., Pherson J.I., Desjardings R.L.* Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of diffusion equation // Bound. Layer Meteorol. 1990. V. 50. P. 335-374.
19. URL: <http://www.dnnc.sr.unh.edu>
20. *Vompersky S., Tsyganova O., Valyeva N.* Peat covered wetlands of Russia and carbon pool of their peat // Peatland use – present, past and future / Proc. Intern. Peat. Congr. 1996. V. 10. P. 381 – 390.

MODELING IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON CARBON DIOXIDE FLUXES FROM A OMBROTROPHIC BOG

© 2009 Ju.A. Kurbatova ¹, N.V. Shalukhina ¹, A.V. Varlagin ¹, C. Li ²

¹A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of RAS, Moscow, Russia;
e-mail:kurbatova.j@gmail.com

²Institute for the Study of Earth, Oceans and Space University of New Hampshire, USA;

A process-based model (Forest-DNDC) was applied for modeling impacts of climate change on carbon dioxide fluxes from a peat bog in European Russia. At first, Forest-DNDC was tested against carbon dioxide (CO₂) fluxes measured by the eddy covariance method on an ombrotrophic bog in region of southern taiga (56°N 33°E). The results from the tests showed that Forest-DNDC was capable of quantifying CO₂ fluxes from the bog ecosystem. The validated model was then utilized to estimate how climate changes could affect the C dynamics in the bogs under several assumed temperature-hydrology scenarios. The modeling study reported in this paper implicated that the bog ecosystems could become a significant source of atmospheric CO₂ under certain temperature and water table changes in future.

Keywords: *CO₂ fluxes, Forest-DNDC model, bog ecosystem, southern taiga.*

УДК: 519.6

ЧИСТАЯ ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ И НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ (КАК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОСНОВА ДЛЯ ГЛОБАЛЬНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

© 2009 А.А. Ларько¹, А.П. Шевырнов¹, М.Ю. Чернецкий¹,
Н.Ф. Овчинникова², Ю.Д. Иванова²

¹ Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия
e-mail: lantar@inbox.ru; ap@ibp.ru; maxcher@rambler.ru

² Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Россия;
e-mail: nf_2004@mail.ru; lulja@yandex.ru

Одним из параметров, характеризующих глобальный углеродный цикл, является чистая первичная продукция (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, получаемых с помощью модели с пространственным разрешением 500 x 500 м², и оценка на основе морфометрических измерений. А также проводится сравнение поведения значений ЧПП рассчитанных на участках, со значениями по всему югу Красноярского края.

Ключевые слова: модель Glo-PEM, чистая первичная продукция.

ВВЕДЕНИЕ

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. Одними из параметров, характеризующих глобальный углеродный цикл являются концентрация в атмосфере CO₂, многолетние наблюдения за которой отразили увеличение этого парникового газа в атмосфере за счет антропогенного сжигания минеральных топлив, рост глобальной приземной температуры и следующим из важнейших параметров является чпп. ЧПП показывает количество углерода, ассимилированного зелеными растениями из атмосферы благодаря процессу фотосинтеза. Ассимилированный углерод используется для наращивания растениями биомассы, а также служит основой остальных цепей питания на планете.

Основной трудностью при рассмотрении ЧПП является значительная трудоемкость при определении его текущего значения для различных экосистем. Величину ЧПП возможно только оценить, и для этого разработано большое количество методов. Поэтому на сегодняшний день достаточно актуально понять, чем отличаются различные методы оценки ЧПП, насколько со-

падают получаемые значения, а если нет, то сравнение параметров, по которым производится оценка ЧПП, позволяют приблизиться к пониманию, на каком этапе возможны недочеты и ошибки, недо- и переоценки рассматриваемой величины.

В данной работе сравниваются две модели оценки ЧПП. Это оценка на основе космических данных и оценка, основанная на расчете биомассы нескольких наземных лесных экосистем. Оценки ЧПП, полученные по различным моделям, даны для одних и тех же территориальных участков. Это позволяет выделить специфические, присущие каждой модели важнейшие параметры, от которых зависит получаемая оценка

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования была взята территория на юге Красноярского края, предгорье Западного Саяна - места постоянных пробных площадей ИЛ СО РАН где наблюдения проводятся с 1968г. Эта территория характеризуется четко выраженной поясностью наблюдаемых лесных экосистем. Здесь на небольшой по площади территории с ростом высоты над уровнем моря мы можем наблюдать три различные экосистемы:

- черневой пояс, высота над уровнем моря 500 м - тип леса: кедровник крупнотравно-папоротниковый. В этом поясе корневые черновые кедровые леса (возраст порядка 260 лет) сохранились только лишь в отдельных урочищах. Ин-

тенсивные вырубки последних 50-ти лет привели к формированию на местах вырубок гетерогенных по составу насаждений - пихтовых, березовых, осиновых.

- горнотаежный, 1000м, - кедровник черничный
- субальпийский, 1500м - кедровник чернично-зеленомошный

Экосистемы последних двух поясов более стабильны, здесь произрастают хвойные: кедр и пихта, однако имеет место доминирование кедра (возраст порядка 220 лет). Наблюдения на пробных площадях проводятся в среднем с интервалом 10 лет.

В таблице 1 показано количество пробных площадей, их координаты и тип лесной экосистемы. Каждый участок является репрезентативным для своего типа леса. При наблюдении подсчитывается количество деревьев каждого вида на участке, упавшие мертвые деревья, измеряются их морфометрические показатели (диаметр ствола, высота, объем кроны и т.д.), эти данные являются основой расчета фитомассы, а затем и ЧПП. В начале определяется запас стволовой древесины в коре лесообразователей на рассматриваемой площади, а затем, используя известную плотность древесины, коры и переходные коэффициенты для коры, кроны и корней этой породы рассчитывается фитомасса древостоя. Переходные коэффициенты представляют собой отношение масс фракций дерева (кора, крона, корни) к массе ствола. Эти коэффициенты были взяты из статистического справочника согласно видовому составу древостоя, возрасту, климатическим и региональным условиям произрастания (1). Запас углерода рассчитывался как 0,5 значения фитомассы (2, 3).

Величина ЧПП определяет количество углерода, связанного растениями, отражая степень использования растениями потоков биосферного углерода. В данной работе для оценки ЧПП используются следующие два пути:

- **методы расчета ЧПП по наземным измерениям**, среди них – 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 рассчитывается ЧПП.

$$NPP = \Delta W + \Delta d, \quad (1)$$

где ΔW – изменение биомассы за год; Δd – потери биомассы (отмирание, поедание животными, корневые выделения и др.).

- **по данным дистанционного спутникового зондирования**, когда 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 /4/. Поэтому для расчета NPP была разработана информационная система, основанная на модели GLO-PEM созданной для сканера нового поколения - MODIS/TERRA. Новый сканер имеет значительные преимущества по сравнению с предыдущим, это и большее количество спектральных каналов и более приемлемое для локальных исследований спектральное разрешение 500 м против 1 км у NOAA/AVHRR.

В данной работе использовались 8-ми дневные композитные снимки сканера MODIS спутника Terra, а именно продукты MOD09A1 и MOD11A2, с пространственным разрешением 500 м и 1 км соответственно, полученные с портала EOS Data Gateway. А также данные со спутника TOMS, пространственным разрешением 1 градус.

Расчет глобальной чистой первичной продукции проводится на основе двух моделей:

- VPM (Vegetation Photosynthesis Model) – модель разработанная Xiangming Xiao в 2003 году, используется для расчета валовой первичной продукции (GPP, Gross Primary Production)/4/;
- GLO-PEM (Global Production Efficiency Model) – модель разработанная С. Prince и С. Goward, в связи с недостаточным описанием из нее используется подход для расчета доли фотосинтетической активной радиации которую поглощает растительность и дыхания автотрофов (R_a)/5/.

Модель расчета GPP состоит из связанных компонентов, которые описывают процессы поглощения растительностью радиации, использование радиации, дыхание автотрофов и регулирование этих процессов факторами окружающей среды:

$$GPP = PAR FPAR E_g, \quad (2)$$

где PAR – фотосинтетическая активная радиация в интервале длин волн от 0,4 до 0,7 мкм; FPAR - доля фотосинтетической активной радиации которую поглощает растительность; E_g – эффективность использования радиации растительностью.

Чистая первичная продукция представляет собой GPP уменьшенное за счет дыхания растений. Фотосинтетическая активная радиация (PAR, Photosynthetically active radiation, 0,4-0,7 мкм) рассчитывается на основе данных со спут-

ника TOMS/6/.

Каждый лесной надел из таблицы 1 содержался в пикселе $500 \times 500 \text{ м}^2$, величина ЧПП рассчитывалась как среднее из 9 пикселей размером 3×3 , где пиксель с рассматриваемой территорией являлся центральным. Значение этого центрального пикселя всегда находилось в пределах доверительного интервала получаемого среднего значения.

Для оценки ЧПП в разных моделях 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. Поэтому интересно проанализировать насколько совпадают полученные двойные оценки для одних и тех же территорий.

СРАВНЕНИЕ НАЗЕМНОЙ И ДИСТАНЦИОННОЙ МОДЕЛИ

На рисунке 1 представлена диаграмма, отражающая различные оценки ЧПП в лесных экосистемах трех высотно-климатических поясов. Оценка ЧПП по наземным данным показывает

тесную связь продуктивности лесов с продолжительностью вегетационного периода развития и роста растений в различных высотных поясах. Например, в субальпийском поясе по сравнению с черневым поясом этот период короче почти на два месяца, и соответственно здесь самая низкая величина ЧПП.

Основным отличием оценок ЧПП в горно-таежном и субальпийском поясах является более высокая продуктивность по спутниковым данным по сравнению с наземными. По нашему мнению, это объясняется использованием при расчете ЧПП вегетационного индекса NDVI, величина которого напрямую зависит от состояния листовых пластинок, хвои и наличия в них хлорофилла. В сумме, среднегодовое значение ЧПП за вегетационный период получается больше в горно-таежном и субальпийском поясах, чем при оценке ЧПП по наземным измерениям. В верхнем высотном поясе доминируют хвойные деревья, продуктивность которых не подвержена резкому уменьшению NDVI в конце лета, что приводит к завышенным значениям оценок по спутниковой информации.

ПЕРЕНОС НА РЕГИОНАЛЬНЫЙ МАСШТАБ

После корректировки спутниковых данных на 7 пробных площадях проведено сравнение их среднемесячных значений ЧПП со значениями

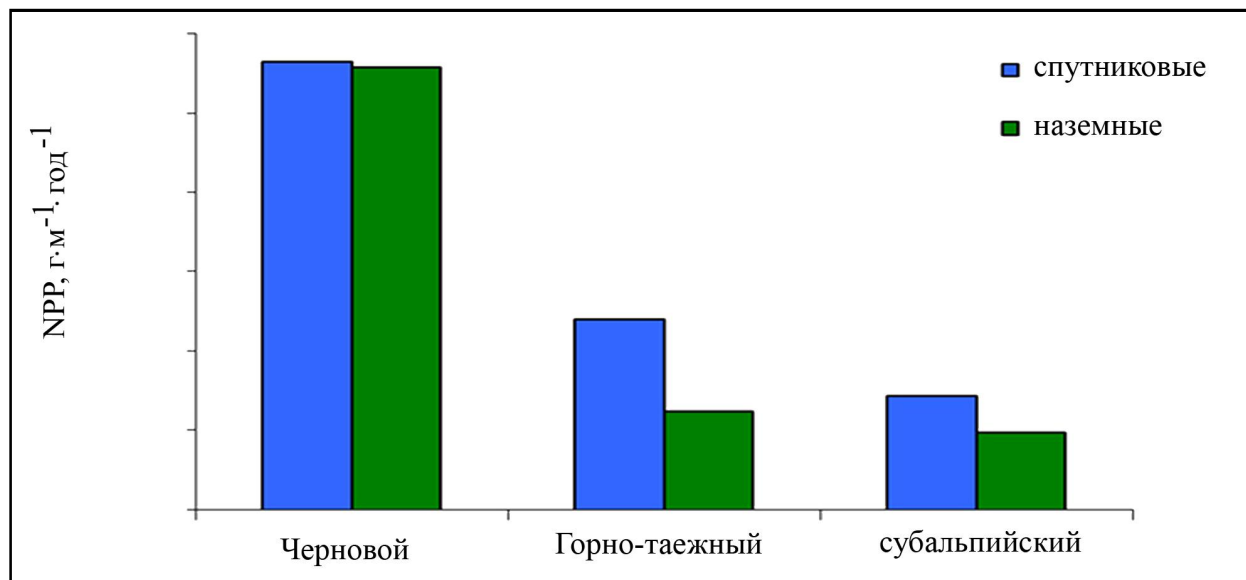


Рис.1. Сравнение значений ЧПП, по наземным и спутниковым данным.

ЧПП на всей территории юга Красноярского края. На рисунке 2 видно, что значения ЧПП рассчитанные на пробных площадях в летний пери-

од выше, чем суммарные по всей территории, в остальном графики повторяют друг друга с незначительными расхождениями.

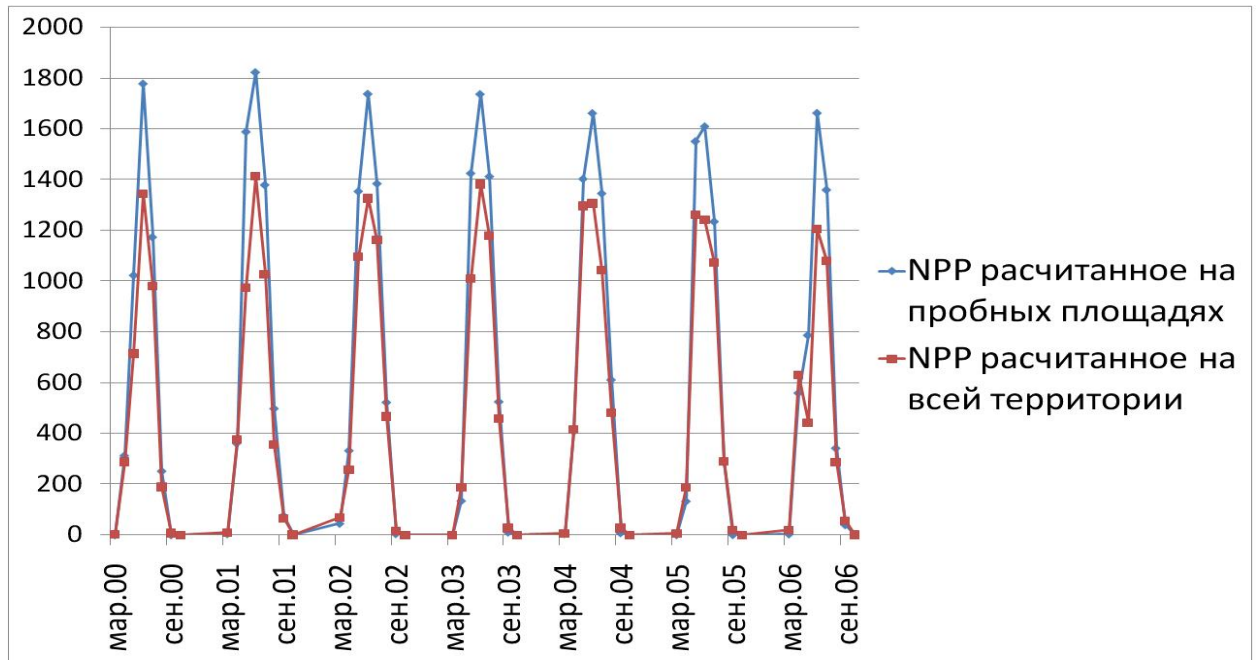


Рис.2. Графики среднемесячной динамики ЧПП.

Это вызвано тем, что пробные площади расположены в таежных районах края, тогда как в среднемесячные данные ЧПП по югу края попадают и более низкопродуктивные типы экосистем, например степи Хакасии. В связи с этим корректировку значений полученных спутниковыми методами необходимо проводить по различным типам растительности отдельно.

Таким образом:

- Модифицирована модель Glo-PEM для данных коэффициента отражения MODIS 500 метров.
- Показано что при расчете ЧПП по спутниковым модельным данным необходимо учитывать фенологические особенности разных видов лесной растительности.
- Показано соответствие ЧПП рассчитанного по спутниковым данным MODIS/Terra и подспутниковыми данными.
- Выявлено что корректировку значений полученных спутниковыми методами необходимо проводить с учетом типа растительности.

Работа поддержана интеграционным проектом СО РАН №50 и интеграционным проектом СО РАН №23.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.Д. Стаканов, В.А. Алексеев, И.А. Коротков, Б.Л. Климушин. Методика определения запа-

сов фитомассы и углерода лесных сообществ / Углерод в экосистемах Сибири (под ред. В.А. Алексеева и Р.А. Бердси). Красноярск. 1994. 170 с.

2. Birdsey R.A. Carbon Storage and Accumulation in Unated States Forest Ecosystems. USDA Forest Service. General Technical Report WO-59. 1992/ 51p.
3. Kurz W.A. Apps M.J., Webb T.M. and McNamee P.J. The carbon budget of the Canadian forest sector: Phase 1. Information Report NOR-X-326. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre. 1992. 93 p.
4. Xiangming Xiao, Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest / Xiangming Xiao, David Hollinger, John Aber, Mike Goltz, Eric A. Davidson, Qingyuan Zhang, Berrien Moore III// Remote Sensing of Environment. 2004. №89. С. 519-534.
5. Scott J. Goetz, Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach/ Scott J. Goetz, Stephen D. Prince, Samuel N. Goward, Michelle M. Thawley, Jennifer Small// Ecological Modelling. 1999. №122. С. 239-255.
6. Bernard Goldberg, A model for determining the spectral quality of daylight on a horizontal surface at any geographical location/ Bernard Goldberg and William H. Klein// Solar Energy. 1980. №24.С. 351-357.

**NET PRIMARY PRODUCTION OF KRASNOYARSK REGION,
SPACE-BASED AND GROUND DATA (AS EXPERIMENTAL BASIS FOR
THE GLOBAL ENVIRONMENT MODELING)**

© 2009 A.A. Larko¹, A.P. Shevyrnogov¹, M.Ju. Chernetsky¹,
N.F. Ovchinnikova², Ju.D. Ivanova²

¹Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia;
e-mail: lantar@inbox.ru; ap@ibp.ru; maxcher@rambler.ru

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;
e-mail: nf_2004@mail.ru; lulja@yandex.ru

One of the parameters characterizing the global carbon cycle, is the net primary production (NPP), which shows the amount of carbon assimilated by green plants from the atmosphere. In this Paper compares two methods of evaluation of NPP for the same territorial areas. This estimate based on satellite data obtained by the model with a spatial resolution of 500 x 500 m², and evaluation based on morphometric measurements. And also a comparison of behavior values calculated to NPP sites, with values around the south of the Krasnoyarsk Territory.

Keywords: *Model Glo-PEM, the net primary production.*

УДК: 581.526

DLES - ПЛАТФОРМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ© 2009 А.В. Михайлов¹, М.Г. Безрукова¹, В.Н. Шанин¹, Н.В. Михайлова²¹УРАН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Московская область, г. Пушкин; e-mail: alexey.mikh@gmail.com; shaninvn@gmail.com²УРАН Институт математических проблем биологии РАН, Московская область, г. Пушкино; e-mail: natalia.mikh@gmail.com

Разработана платформа для имитационного моделирования экологических процессов с дискретным шагом по пространству и времени. Платформа построена по модульному принципу и способна к расширению своих возможностей, позволяя легко заменять отдельные компоненты другими, объединять разные подходы в моделировании экосистем. Данное программное обеспечение может использоваться как основа для создания моделей, необходимых для прогноза развития лесов в разных климатических зонах России с учетом внешних воздействий, таких как изменения климата, лесные пожары, ветровалы и др.

Ключевые слова: *имитационное моделирование, компонентный подход, повторное использование программного кода, модульность, интеграция.*

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития моделирования применительно к исследованиям лесных экосистем требует построения сложных имитационных моделей, основанных на знаниях из разных научных дисциплин: экологии, физиологии, почвоведения, климатологии и др. При этом возникает необходимость в проектировании моделей в виде системы независимых компонентов, способных к объединению в единое целое. Поэтому общемировой тенденцией становится создание новых моделей путем объединения уже существующих [5, 9] или создание специальных платформ, позволяющих разным группам исследователей встраивать свои подмодели в общую систему [7, 8, 12, 13].

Невозможно создать модель, идеально описывающую природные процессы. Для разных целей необходимы разные модели, с разной степенью детализации моделируемых процессов. Моделирование конкуренции за свет в лесу может быть реализовано посредством индексов конкуренции, или с помощью двумерной или сложной трехмерной модели. Индексы конкуренции – это самый простой способ описать взаимодействия между деревьями, для использования некоторых из них достаточно знать лишь средние значения параметров древостоя, например плотность посадки. В литературе [11] приводится довольно большое количество разнообразных индексов конкуренции. Однако неоднородная возрастная структура и смешанный породный состав существенно осложняют применение индексов конкуренции, поскольку необходимо учитывать не только зависимость данных индексов от

возраста, но и свойства каждого вида, определяющие его конкурентоспособность. Сложные трехмерные модели [2, 4] наиболее точно описывают световой режим в лесу, но для расчета прохождения и рассеивания лучей в трехмерном пространстве требуются большие вычислительные ресурсы. Использование такого типа моделей оправдано, например, в тех случаях, когда необходимо учесть неоднородность рельефа. Для того чтобы комбинировать разные подходы в моделировании, необходима платформа, которая бы позволяла в рамках одной системы использовать разные модели. Одной из таких платформ является предлагаемая в данной статье система DLES.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Модульная система DLES (рис. 1) – это программный продукт, ориентированный на исследовательское моделирование сложных экологических процессов с дискретным шагом по пространству и времени. Система написана на языке Delphi в среде Borland Turbo Delphi 2005 с использованием интерфейсов COM (Component Object Model). COM – это технологический стандарт от компании Microsoft, предназначенный для создания программного обеспечения на основе распределённых компонентов, каждый из которых может использоваться во многих программах одновременно. Интерфейс – это совокупность средств и методов взаимодействия между элементами системы.

Суть примененного компонентно-ориентированного подхода состоит в том, что в имитируемой системе выделяются отдельные процессы,

которые имитируются разными подмоделями. В нашем случае *подмодель* – это такой компонент системы, который является источником новых данных или модифицирует уже имеющиеся. При этом в зависимости от целей исследования, гипотез и используемых экспериментальных данных, подмодели, имитирующие процессы, могут сильно отличаться. Может возникнуть необходи-

мость 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).

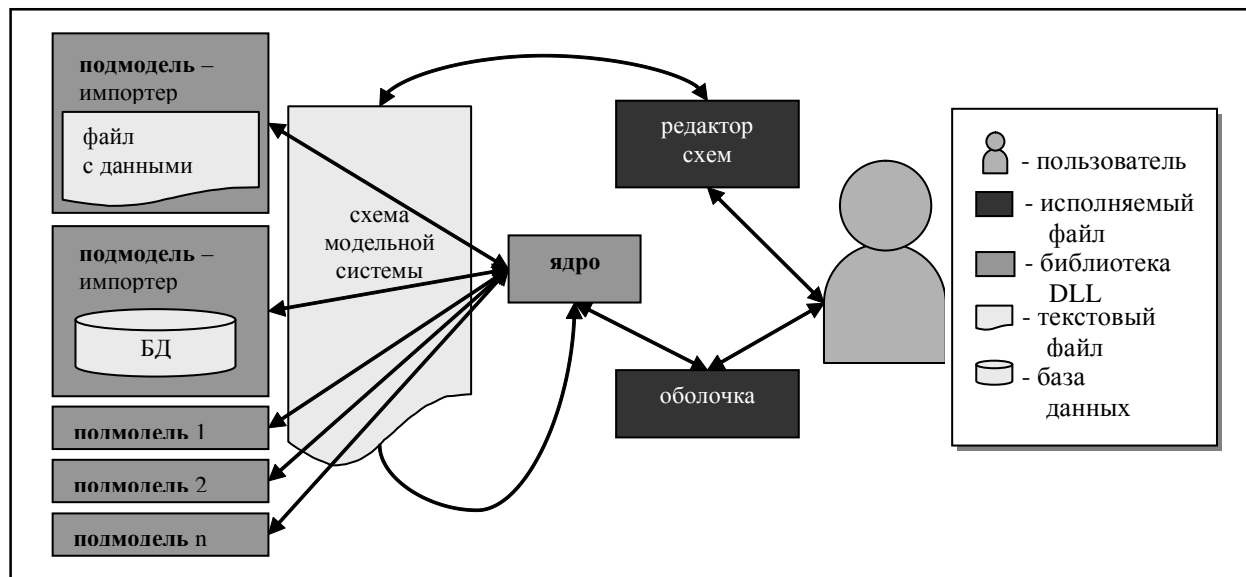


Рис. 1. Компонентная структура системы DLES

Данные могут быть получены как из расчетного блока (т.е. подмодели), так и из другого источника данных. В качестве подобного стороннего источника может выступать текстовый или бинарный файл, база данных и т.д.; информация из них транслируется с помощью специальной подмодели.

Синхронизацией, организацией обмена данными и обеспечением корректной работы системы занимается *ядро* системы. Ядро объединяет подмодели в единую систему, используя *схему* модельной системы. Схема – это текстовый файл в формате XML (текстовый формат, предназначенный для хранения структурированных данных и для обмена информацией между программами), 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 осуществляется с помощью *оболочки* системы. В зависимости от поставленных задач, возможно применение различных типов оболочек: виде консольного приложения или с графическим пользовательским интерфейсом. Оболочка является самостоятельным компонентом системы и реализуется в виде отдельного исполняемого

файла. Полное отделение логики моделирования от реализации пользовательского интерфейса существенно облегчает разработку подмоделей.

Для того чтобы учесть пространственные отношения между дискретными объектами (что очень важно при моделировании, например, древостоев), процесс имитации происходит на двумерной решетке. Размер имитационной решетки (в ячейках) и размер ячейки (в метрах) задаются пользователем. Некоторые рутинные процедуры, необходимые при учете пространственных взаимодействий между объектами на имитационной решетке (поиск ближайших соседей, определение расстояния между объектами, замыкание имитационной решетки на тор для устранения т.н. «краевого эффекта»), реализованы непосредственно в ядре системы. Таким образом, разработчики подмоделей избавлены от необходимости реализации данных операций.

По своему пространственному масштабу модели могут быть: уровня ячейки, уровня объекта и уровня участка. Отличаются они способом запуска и особенностями выделения памяти под их переменные. Модели уровня участка запускаются один раз за шаг, и соответствующие им переменные относятся ко всему модельному участку.

Модели уровня ячейки запускаются на каж-

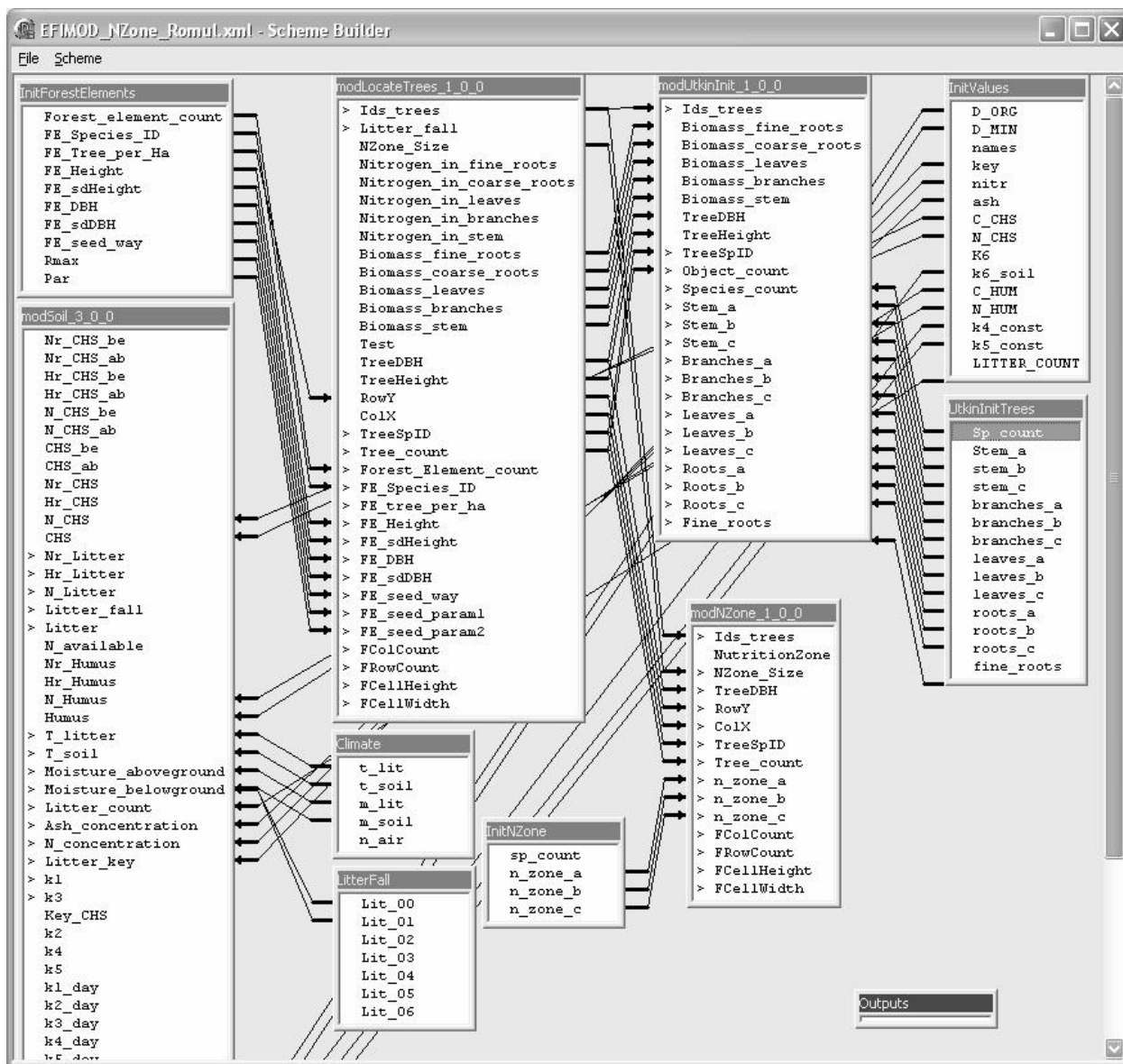


Рис. 2. Внешний вид редактора схем

дом шаге системы для каждой из ячеек имитационной решетки, а соответствующие им переменные представляют собой двумерный массив, размеры которого равны размерам имитационной решетки. Переменные моделей объектного уровня – одномерные массивы – предназначены для хранения свойств объектов, которых на моделируемом участке может быть более одного, но хранение информации о которых по ячейкам нецелесообразно в силу нерегулярного размещения этих объектов. Соответственно, на каждом шаге модель объектного уровня запускается столько раз, сколько объектов присутствует в имитируемой системе. Возможность разработки моделей с разным пространственным масштабом позволяет наиболее эффективно использовать память и вычислительные ресурсы.

Также подмодели могут различаться шагом по времени, с которым они работают. Синхрони-

зацией обмена данными между моделями, работающими с разным шагом по времени и/или на разных пространственных масштабах, занимается ядро системы.

ПРИМЕРЫ ПОДМОДЕЛЕЙ

Система DLES позволяет комбинировать как точечные, так и пространственно-зависимые подмодели.

Примером точечной модели может служить модель разложения органического вещества почвы ROMUL [6]. Органическое вещество в модели представлено тремя пулами: опад, подстилка и органическое вещество минеральных горизонтов. В дополнение к углеродному циклу, модель также учитывает динамику азота. Поскольку азот, находящийся в почве в форме, доступной растениям, является лимитирующим фак-

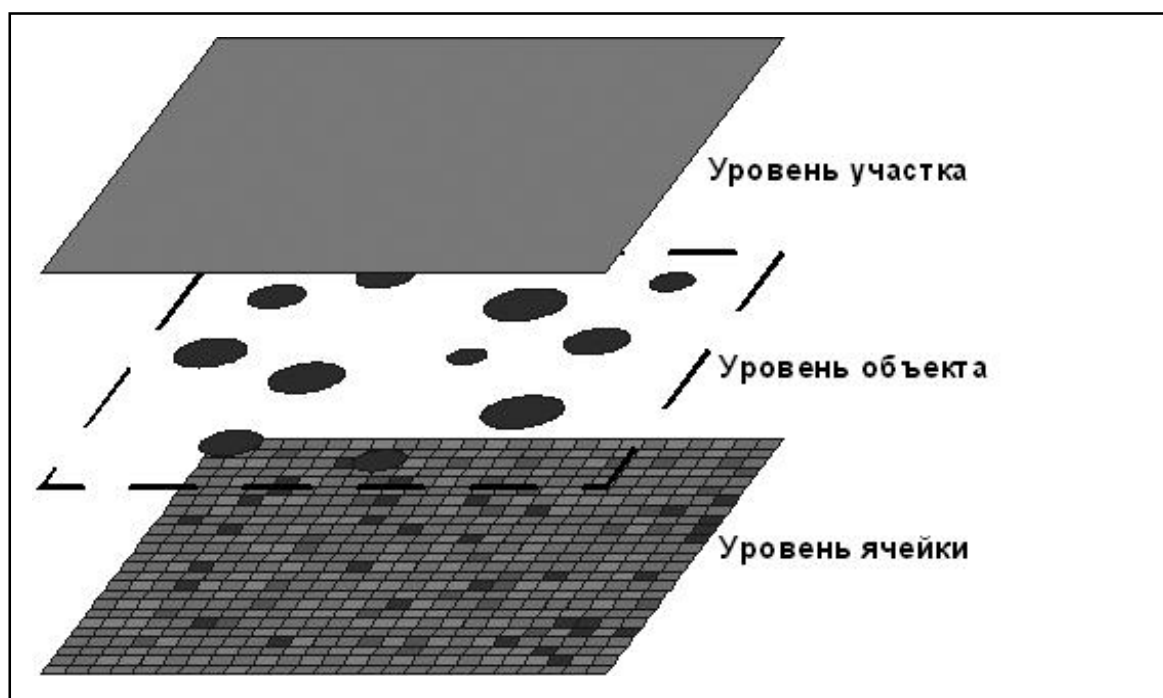


Рис. 3. Пространственные уровни, поддерживаемые платформой DLES

тором во многих типах наземных экосистем, выходные данные модели ROMUL крайне важны при имитации динамики растительности (например, объемов прироста биомассы или направления сукцессии).

В системе DLES подмодель ROMUL может функционировать на уровне ячейки, что позволяет учитывать пространственную гетерогенность почвенного покрова, вызванную неравномерным поступлением опада в разные ячейки имитационной решетки и неоднородностью микроклиматических условий в этих ячейках.

Также в системе реализована точечная подмодель динамики кальция в северотаежных лесных почвах [3].

В систему DLES легко интегрировать более сложные имитационные модели с пространственным взаимодействием объектов. Примером такой модели является модель динамики популяций травянистых растений, разрабатываемую на основе клеточно-автоматного подхода в моделировании. В этой подмодели имитационное пространство дискретно, представлено в виде квадратных ячеек, а развитие растительных популяций определяется набором специально разработанных правил развития и размножения растений имитируемых видов [1]. Правила основаны на концепции дискретного описания онтогенеза, учитывают семенное и вегетативное возобновление растений.

В настоящее время большим коллективом авторов ведется работа по созданию на базе платформы DLES компонентно-ориентированной

версии системы моделей EFIMOD [10], имитирующей круговорот основных биогенных элементов и динамику растительности в разновозрастных лесах бореального и неморального поясов. Помимо упомянутых выше моделей ROMUL и модели динамики кальция, в состав системы предполагается включить пространственно-зависимые модели древостоя, учитывающие разные аспекты конкуренции между деревьями, модели прироста биомассы отдельного дерева и распределения прироста по органам дерева, и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компонентная структура системы DLES имеет ряд преимуществ:

1. Она позволяет одновременно разрабатывать и видоизменять разные компоненты системы независимо друг от друга разными разработчиками.
2. Платформа предназначена для объединения моделей, написанных на современных языках программирования (Delphi, C++ и др.), и не содержит собственного интерпретируемого метаязыка, характерного для некоторых универсальных систем (MATLAB, PowerSim и пр.). Данные особенности позволяют использовать при разработке моделей весь арсенал средств, присутствующих в транслируемым языкам общего назначения, и не ограничивают пользователя жесткими рамками конечного набора заранее реализованных функций.
3. Благодаря тому, что на ядро возложены простран-

- ственная и временная синхронизация, конверсия физических единиц измерения и организация обмена данными, значительно упрощается разработка отдельной подмодели. Программисту нет необходимости самому синхронизировать подмодели, ему лишь надо определить временной и пространственный масштабы.
4. Модульная организация позволяет легко заменять отдельные компоненты, которые могут представлять собой как динамически подключаемые библиотеки (DLL), так и файлы с данными или базы данных.

Работа поддержана Программой 16 Президента РАН «Изменения природной среды и климата: природные катастрофы»

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлова Н.В., Богданова Н.Е., Михайлов А.В. Скорость освоения территории неморальными видами трав (модельный подход) // Бюлл. МОИП. Сер. Биол. 2006. Т. 111. Вып. 1. С. 37-44.
2. Чумаченко С.И. Базовая модель динамики многовидового разновозрастного лесного ценоза // Науч. труды МГУЛ. 1993. Вып. 248. С.147-180.
3. Хораськина Ю.С., Комаров А.С., Безрукова М.Г., Лукина Н.В., Орлова М.А. Модель динамики кальция в северотаежных лесных почвах // Известия Самар. НЦ РАН. 2009.
4. Brunner A. A light model for spatially explicit forest stand models // For. Ecol. Manage. 1998. V. 107. P.19-46.
5. Peng Ch., Liu J., Dang Q., Apps M.J., Jiang H. TRIPLEX: a generic hybrid model for predicting forest growth and carbon and nitrogen dynamics // Ecological Modelling 2002. V. 153. P. 109–130.
6. Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // Ecological Modelling. 2001. V. 138. P. 289-308.
7. de Coligny F., Ancelin Ph., Cornu G., et al. 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.
8. K. May Heather, S. Conery John. FOREST: A System for Developing and Evaluating Ecosystem Simulation Models // SCSC '03 P. 119 -127
9. Liu J., Peng Ch., Dang Q., Apps M.J., Jiang H. A component object model strategy for reusing ecosystem models // Computers and Electronics in Agriculture 2002. V. 35. P. 17–33.
10. 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. V. 170. P. 373-392.
11. Pukkala T., Kolström T. Competition indices and the prediction of radial growth in Scots pine.1987. V. 21. P. 55-76
12. Knox R.G., Kalb V.L., Levine E.R., Kendig D.J. A Problem-Solving Workbench for Interactive Simulation of Ecosystems // IEEE Computational Science & Engineering V. 4. Issue 3. 1997 P. 52 – 60
13. Wenderholm E. Eclpss: a Java-based framework for parallel ecosystem simulation and modeling // Environmental Modelling & Software. 2005. V. 20. P. 1081-1100.

DLES – FRAMEWORK FOR FOREST ECOSYSTEM MODELLING

© 2009 A.V. Mikhailov¹, M.G. Bezrukova¹, V.N. Shanin¹, N.V. Mikhailova²

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of RAS, Moscow Region, Pushchino; e-mail: alexey.mikh@gmail.com; shaninvn@gmail.com

²Institute of Mathematical Problems of Biology RAS, Moscow Region, Pushchino; e-mail: natalia.mikh@gmail.com

The paper describes basic approaches to component-based models design, problems of code reuse. New component-based framework for ecosystem modelling is suggested, which can be used, in particular, for forecast of forest ecosystems dynamics in different climatic regions taking into account various impacts (climate change, wild fires, windfalls etc.) and silvicultural practice.

Keywords: imitating modeling, components the approach, a reuse of a program code, a modularity, integration.

УДК 581.524.42.001.57

ОЦЕНКА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ДРЕВОСТОЕВ

© 2009 А.Г. Молчанов

Институт лесоведения РАН, п/о Успенское, Московская обл.;
e-mail: root@ilan.msk.ru

Предложено рассчитывать фотосинтетическую продуктивность (ФП) на основе поглощенной пологом древостоя солнечной радиации и коэффициента использования поглощенной ФАР на фотосинтез облиственным побегом. Количество ассимилированного CO_2 слоем полога древостоя при определении этим методом является произведением двух величин: количества поглощенной слоем полога радиации и коэффициента использования поглощенной солнечной радиации на фотосинтез (КПД фотосинтеза) облиственным побегом.

Ключевые слова: *фотосинтетическая продуктивность, поглощенная солнечная радиация, коэффициент использования поглощенной радиации на фотосинтез.*

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее важными параметрами, определяющими углеродный баланс лесных экосистем, а также структуру взаимодействия растительного покрова с окружающей средой служат несколько взаимозависимых показателей: первичная брутто-продуктивность, или гросс-продуктивность (Gross Primary productivity, GPP), первичная нетто-продуктивность (Net Primary productivity, NPP), нетто-продукция экосистемы (NEP), а также дыхание экосистемы (Ecosystem respiration, RE).

Первичная брутто-продуктивность - GPP или фотосинтетическая продуктивность (ФП) характеризует общее продуцирование органического вещества (поглощение CO_2) автотрофами на единице площади за определенный отрезок времени [10]. Эколого-физиологический метод, при комплексном его использовании, дает возможность определять величины гросс-продуктивности (GPP) (фотосинтетической продуктивности (ФП)), нетто-продуктивности (NPP) и продуктивности экосистемы (NEP).

Измерение газообмена ведется на отдельном листе или побеге в разных частях полога древостоя в течение короткого промежутка времени и рассчитывается по отношению к единице поверхности или массы листа. Для получения конечного результата - суммарного количества CO_2 , поглощенного древостоем за год, полученные в течение сезона данные складываются (или усредняются) и умножаются на поверхность или массу листьев в древостое (или в различных его слоях). Таким образом, количество CO_2 является суммой многих компонентов, каждый из которых измеряемый с невысокой точностью (в лучшем случае 5-10%). Однако метод имеет то пре-

имущество, что позволяет оценить вклад отдельных компонентов экосистемы в общий круговорот CO_2 за короткие промежутки времени, его динамику, а также оценить влияние отдельных показателей структуры и функции растений, в частности, вклад фотосинтеза и дыхания разных органов (листьев, стволов, ветвей и корней) в суммарный газообмен CO_2 древостоя.

В настоящее время оценка ФП определяется по той или иной степени улучшенной методике Монси и Саеки [15], которая основана на световых кривых фотосинтеза, обычно получаемых в первой половине дня, на разных вертикальных уровнях, и на пропускании солнечной радиации на каждом из уровней. В последнее время зависимость фотосинтеза от окружающих факторов определяется на основе биохимической модели Фаркухара [12], в сочетании с той или иной моделью устьичной проводимости [1].

При оценке ФП древостоев экофизиологическим методом наиболее сложной задачей является переход от листа или охвоенного побега, на котором определяли интенсивность фотосинтеза, к определению ФП всего древостоя. Для решения этой проблемы обычно решаются следующие задачи: 1. Определяется масса или площадь листьев по слоям полога древостоя. 2. Определяется поступление и распределение солнечной радиации к каждому слою в пологе древостоя. 3. Изучается зависимость интенсивности фотосинтеза от освещенности у листьев, выросших в разных условиях светового довольствия (световые и теневые листья). 4. Определяется изменчивость интенсивности фотосинтеза в течение дня, в разных условиях окружающей среды.

Такая методика исследования является очень трудоемкой. Кроме того, отдельные ее слагае-

мые не могут быть определены с достаточной точностью, и поэтому суммарная ошибка метода оказывается очень большой. В связи с этим нам представляется целесообразным использовать для определения ФП принципиально другой метод, основанный на расчете фотосинтеза не по падающей, а по поглощенной радиации. Мы предлагаем рассчитывать ФП на основе поглощенной пологом древостоя солнечной радиации и коэффициента использования поглощенной ФАР на фотосинтез облиственным побегом. Тем самым метод позволяет избежать основной сложности, которая встречается при таких исследованиях – он позволяет перейти от уровня листа к уровню древостоя. При определении ФП по поглощению солнечной радиации пологом древостоя не требуется определение площади листы в насаждении, так как поглощенная радиация непосредственно зависит от индекса листовой поверхности.

Количество ассимилированного CO_2 пологом древостоя, при определении этим методом, является произведением двух величин: количества поглощенной слоем полога радиации и коэффициента использования поглощенной солнечной радиации на фотосинтез (КПД фотосинтеза).

Точность определения ФП по предлагаемому нами методу в большой степени зависит от того, в какой степени зависимость КПД фотосинтеза от окружающих факторов, полученная на отдельном облиственном (охвоенном) побеге соответствует зависимости КПД фотосинтеза слоя полога древостоя.

Настоящая статья посвящена исследованию зависимости КПД фотосинтеза от внешних условий, функционального состояния листа в двух древостоях – дубраве, растущей в зоне недостаточного увлажнения, и в сосняке, растущем в зоне южной тайги. Мы также попытаемся показать в какой степени КПД фотосинтеза, полученный на отдельном охвоенном побеге, соответствует КПД фотосинтеза слоя полога древостоя.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили в дубравах юго-восточной лесостепи в Воронежской области и в сосняке южной тайги в Ярославской области.

В лесостепной зоне исследования проводились в 60-летней осоко-снытевой дубраве II бонитета на темно-серой лесной, глинистой почве с уровнем грунтовых вод около 13 м и в 220-летней полево-кленовой дубраве IV бонитета на южном склоне с уровнем грунтовых вод около 8-9 м [5]. В южной тайге в 50-летнем сосняке кислотно-черничном Ia бонитета на дерново-подзолистой

песчаной почве с уровнем грунтовых вод около 1,5-2 м [2].

Для учета взаимозатенения листьев на облиственных побегах, угла наклона листовой пластинки в естественных условиях измерение фотосинтеза проводили на облиственных побегах, и кроме поверхности листьев, также определяли площадь проекции облиственного побега на горизонтальную поверхность.

Газообмен CO_2 в дубовом древостое определяли на интактных облиственных побегах с площадью листьев 7-12 дм^2 и площадью горизонтальной проекции побега 3-6 дм^2 , а в сосновом древостое у охвоенных побегах с хвоей 2-5 г с площадью горизонтальной проекции охвоенного побега 15-30 см^2 . Концентрацию CO_2 измеряли инфракрасным газоанализатором типа ГИП-10МБ с точностью 0,002 $\text{мг CO}_2 \text{ л}^{-1}$ или 1 ppm. Более подробная методика определения фотосинтеза опубликована в предыдущих работах [2, 4, 5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

КПД фотосинтеза, как и фотосинтез не является постоянным. Он меняется в зависимости от времени дня и окружающих факторов (водообеспеченности, температуры воздуха, от интенсивности падающего света, а также от функционального состояния листа (у световых и теневых листьев) [2, 4, 5, 13, 14]. На рис. 1 мы приводим данные о зависимости КПД фотосинтеза листьев дуба от интенсивности падающей радиации в разных условиях водообеспеченности.

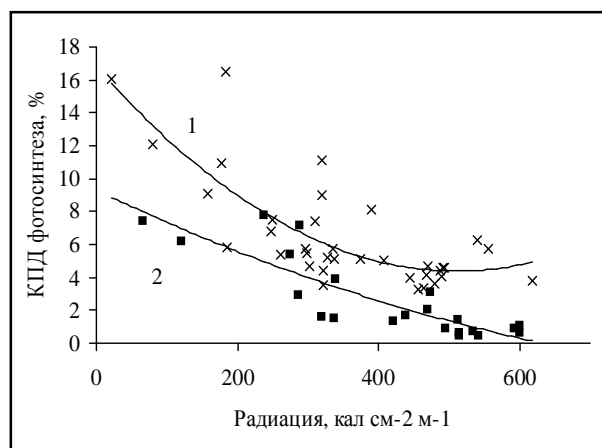


Рис. 1. Зависимость коэффициента использования поглощенной солнечной радиации на фотосинтез от падающей радиации у листьев дуба светового типа при предрасветном водном потенциале листа (ПВПЛ) равном от -0,2 до -0,9 (1) и при ПВПЛ равном от -1,0 до -1,6 МПа (2)

Чтобы учесть изменение КПД фотосинтеза в течение дня мы использовали в расчетах интенсивность фотосинтеза за весь световой день.

ФП слоя полога насаждения за световой день рассчитывали по формуле:

$$GPP_{\text{слой}} = h_{\text{слой}} \cdot Q_{\text{слой}} \cdot b_{\text{слой}} / 2.54 \quad (1)$$

где $GPP_{\text{слой}}$ - количество CO_2 , поглощенное одним слоем или всем пологом древостоя, в $kg\ CO_2\ га^{-1}\ день^{-1}$; $h_{\text{слой}}$ - КПД фотосинтеза в зависимости от суммы прихода ФАР к слою полога и других факторов окружающей среды; $Q_{\text{слой}}$ - сумма прихода ФАР к насаждению или к слою полога в исследуемый день, в $кал\ га^{-1}\ день^{-1}$ ($Дж\ га^{-1}\ день^{-1}$); $b_{\text{слой}}$ - коэффициент поглощения ФАР слоем полога или всем пологом насаждения; 2.54 (10.63) – энергетический эквивалент поглощенной $mg\ CO_2$ к кал или ($mg\ CO_2$ к J).

КПД фотосинтеза рассчитывали по общеизвестной формуле [9]

$$h = P \cdot 2.55 / Q \cdot b \cdot S, \quad (2)$$

где: P - интенсивность фотосинтеза облиственного побега за световой день, $mg\ CO_2\ см^{-2}\ листы\ день$; 2.54 (10.63) – энергетический эквивалент поглощенной CO_2 ; Q - падающая ФАР на исследуемый побег, $кал\ см^{-2}\ день$; b – коэффициент поглощения ФАР побегом; S - площадь проекции облиственного побега на единицу площади листы.

Интенсивность фотосинтеза листьев или облиственных побегов в пологе древостоя значительно различается. Это обусловлено тем, что в естественных условиях в течение дня на фотосинтез влияют изменяющиеся факторы окружающей среды (свет, температура и влажность воздуха и в результате обеспеченность водой листа) [3]. Наиболее изменчивым фактором окружающей среды в пологе древостоя является солнечная радиация. Поэтому основные различия фотосинтеза в пологе зависят от поступающей к листьям солнечной радиации. В исследуемом дубовом насаждении солнечная радиация в трех слоях сильно различалась, в верхнем слое интенсивность радиации свыше 30% от максимальной величины, когда фотосинтез выходит на уровень светового насыщения, встречалась 80% случаев, тогда как в среднем слое 44% и в нижнем только в 14% случаях [7]. В сосновом древостое солнечная радиация свыше 30% от максимальной величины встречалась в верхнем слое полога в 58%, в среднем 34% и в нижнем в 26% случаев. Таким образом, для определения более точной величины поглощения CO_2 пологом древостоя его необходимо разделить на горизонтальные слои. В каждом из них необходимо проводить исследования по поглощению радиации слоем полога.

На основе полученных данных по фотосинтезу за световой день, в дни с разными условиями окружающей среды и разным водообеспечением для дуба были рассчитаны значения КПД фотосинтеза по формуле (2). Используя полученные значения КПД фотосинтеза и показания окружающей среды в эти дни было рассчитано уравнение зависимости КПД фотосинтеза $\eta(h)$ от солнечной радиации за день (Q), среднедневной температуры воздуха (T) и предрассветного водного потенциала листа (ψ) отдельно для световых и для теневых листьев [4, 5]. Ниже приводится формула для расчета зависимости КПД фотосинтеза световых (уравнение 3) и теневых (уравнение 4) листьев дуба от окружающих факторов.

$$\eta = 1,37 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 + 0,0053 \cdot T^2 - 1,013 \cdot \psi^2 - 0,021 \cdot Q - 0,40 \cdot T + 17,67 \quad R^2 = 0,61 \quad n = 61 \quad (3)$$

$$\eta = -4,2 \cdot 10^{-7} \cdot Q^3 + 4,67 \cdot 10^{-4} T^2 - 2,64 \cdot \psi + 6,257 \quad R^2 = 0,40 \quad n = 25. \quad (4)$$

Используя эти зависимости, по формуле (1) рассчитывали фотосинтетическую продуктивность верхнего, светового и нижнего, теневого слоев полога дубового насаждения. Таким образом, для расчета ФП дубового насаждения, кроме этих зависимостей необходимо знать только поглощенную солнечную радиацию конкретным древостоем в разных слоях полога по вертикали и условия окружающей среды.

Для расчета ФП в сосняке мы допустили, что в формулах (1) и (2) коэффициент поглощения солнечной радиации облиственного побега, на котором определяли фотосинтез в слое полога древостоя, примерно одинаков для всех побегов растущих в этом слое полога. Рассмотрим, в какой степени это подтверждается.

По нашим данным [2], в сосновом насаждении на основании исследования 13 модельных деревьев получено, что удельная поверхность 1 г хвои (площади поверхности хвои на единицу массы) в верхнем слое полога равна $46\ см^2\ г^{-1}$, среднем $58\ см^2\ г^{-1}$ нижнем $63\ см^2\ г^{-1}$ (табл.).

Таблица. Удельная поверхность хвои сосны (в расчете на 1 г свежей хвои) в трех слоях полога с учетом возраста хвои (хвоя текущего года / хвоя 1-го года) [2]

Слой полога	Среднеарифметическое (M), $см^2\ г^{-1}$	Среднеквадр. отклонение ($\pm \sigma$)	Коэффициент вариации (V), %	Точность опыта (P), %
Верхний	50.2/46.0	7.70/5.28	15.34/11.48	4.84/3.62
Средний	60.6/58.1	6.40/6.55	10.56/11.27	3.04/3.39
Нижний	71.7/63.2	8.21/10.93	11.45/17.29	3.45/5.21

Определение зависимости фотосинтеза от света, поглощения света побегами и КПД фотосинтеза велось отдельно для побегов каждого уровня. Экспериментальные охвоенные побеги, на которых проводили определение фотосинтеза, имели удельную поверхность для верхнего слоя 49, 40, 41, 41, 44, 41 $\text{см}^2 \text{г}^{-1}$ (в среднем 42,7), для среднего слоя - 54, 53, 56, $\text{см}^2 \text{г}^{-1}$ (в среднем 54,3), для нижнего - 59, 62 $\text{см}^2 \text{г}^{-1}$ (в среднем 60,5). Таким образом, экспериментальные охвоенные побеги имели меньшую удельную поверхность, чем среднестатистические, полученные по модельным деревьям: для верхнего слоя на 7%, для среднего слоя на 6% и для нижнего на 4%, т.е. хвоя во всех слоях полога была более светового типа.

Для определения изменчивости коэффициента поглощения ФАР побегами в пологе соснового древостоя провели определение коэффициента поглощения ФАР охвоенными побегами в горизонтальной и вертикальной плоскости полога. В этой работе [8] мы взяли по 9 охвоенных побегов из трех горизонтальных слоев полога древо-

стоя. Определение коэффициента поглощения ФАР охвоенными побегами (b) проводили в фотоинтегрирующей сфере диаметром 45 см. Различие в поглощении ФАР охвоенными побегами между слоями полога составляло меньше 15%. Так в верхнем слое поглощение ФАР охвоенными побегами 1-го года было 78%, в среднем - 65% и 54% в нижнем слое полога соснового древостоя. Коэффициент вариации поглощения ФАР охвоенными побегами в верхнем слое составлял 9,5%, в среднем - 15,2%, в нижнем - 16,0%. Кроме того, в этой же работе было показано, что поглощение ФАР зависит от густоты охвоения побега и от удельной поверхности хвои. Используя полученные данные интенсивности фотосинтеза за световой день и поступление к исследуемому побегу солнечной радиации в трех слоях полога соснового древостоя, была получена зависимость коэффициента использования поглощенной солнечной радиации на фотосинтез от поступающей радиации к побегу у хвои 1-го года в верхнем, среднем и нижнем слоях полога соснового древостоя (рис. 2).

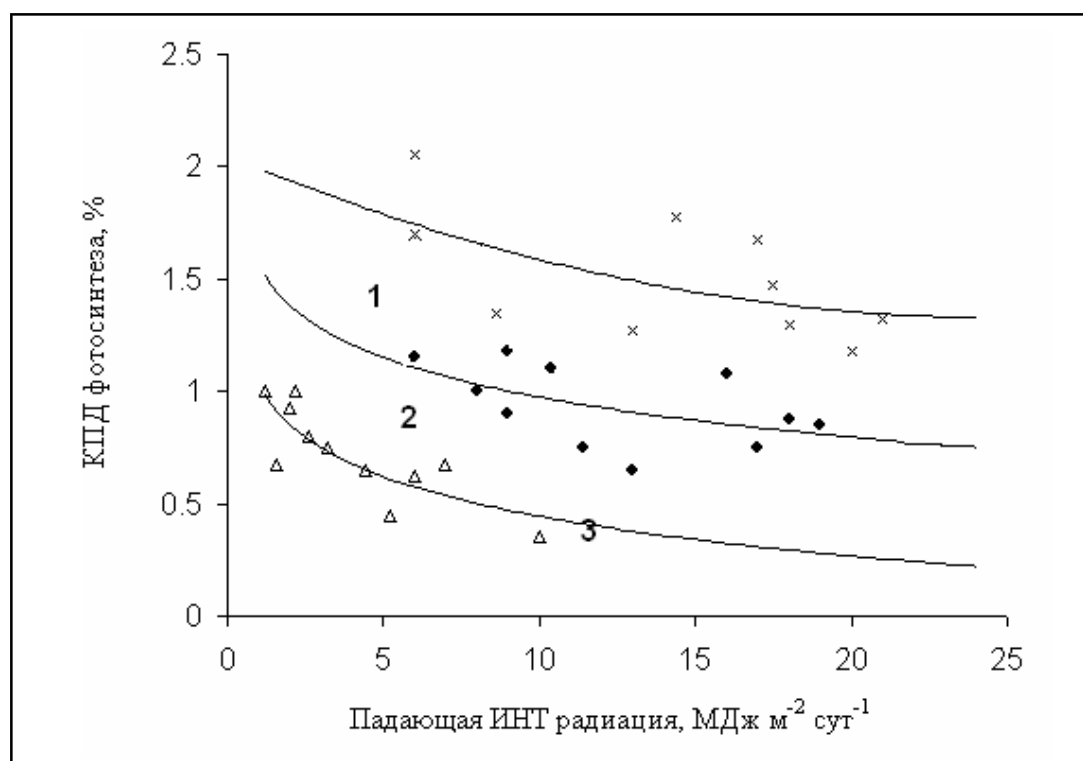


Рис. 2. Зависимость коэффициента использования поглощенной солнечной радиации на фотосинтез от поступающей радиации к побегу у хвои 1-го года в верхнем (1), среднем (2) и нижнем (3) слоях полога соснового древостоя

Для хвои первого года уравнение зависимости КПД фотосинтеза от падающей радиации в верхнем слое получилось равным $y = 0,018x^2 - 0,37x + 4,54$ $R^2 = 0,98$ при стандартной ошибке = 0.1. Различие между зависимостями КПД фотосинтеза от падающей ФАР из разных слое поло-

га около 20%. Отклонение КПД фотосинтеза, используемой при расчете, от действительной не будет превышать более 10%. Различие поглощенной ФАР охвоенными побегами между слоями полога, как было показано выше, около 15%. Таким образом, отклонение, используемой при рас-

чете КПД фотосинтеза, от действительной не будет значительной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, точность определения продуктивности зависит от полученной зависимости КПД фотосинтеза от падающей на исследуемый побег солнечной радиации. Эти зависимости различаются в разных частях полога древостоя.

Предложенный нами метод оценки ФП, в отличие от других эколого-физиологических методов, учитывает распределение фотосинтетических органов, их взаимозатенение в пологе древостоя, естественную ориентацию листьев в пространстве. Используя этот метод, не требуется определения площади листы в древостое. Для расчета ФП древостоя использовалась зависимость среднедневного КПД фотосинтеза от количества солнечной радиации поглощенной за день и других факторов окружающей среды, и таким образом учитывалось изменение дневного хода фотосинтеза в разных условиях, в частности в зависимости от недостатка или избытка влаги, от влияния облачности (суммы прихода солнечной радиации за день).

На основе наших исследований и литературных данных [6] мы пришли к выводу, что величины интенсивность фотосинтеза, при световом насыщении в оптимальных условиях, хотя и изменяются в течение сезона и в зависимости от внешних условий, но мало зависят от географического места произрастания, поэтому могут служить функциональной характеристикой в частности для таких древесных пород, как сосна *Pinus sylvestris* (L.), береза *Betula pendula* (Roth.) и дуб *Quercus robur* (Roth.). Следовательно, зная зависимость КПД фотосинтеза от окружающих факторов для определенной породы, и поглощение солнечной радиации конкретным древостоем можно рассчитать фотосинтетическую продуктивность этого конкретного древостоя в заданных или естественных условиях окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корзухин М.Д., Выгодская Н.Н., И.М. Милюкова, Татаринцев Ф. А., Цельникер Ю.Л. Применение объединенной модели фотосинтеза и устьичной проводимости к анализу ассимиля-

- ции елью и лиственницей в лесах России // Физиология растений. 2004. Т. 51, № 3. С. 341-354.
2. Молчанов А.Г. Экофизиологическое изучение продуктивности древостоев. М.: Наука, 1983. 135 с.
3. Молчанов А.Г. Изменчивость интенсивности фотосинтеза дуба черешчатого от факторов окружающей среды // Лесоведение. 2002. № 6. С. 13-22.
4. Молчанов А.Г. Фотосинтетическая продуктивность дубового древостоя в различных условиях водообеспеченности // Физиология растений. 2005. Т. 52, № 4. С. 522-531.
5. Молчанов А.Г. Баланс CO₂ в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. Тула: Гриф и К., 2007. 284 с.
6. Молчанов А.Г. Функциональная характеристика фотосинтетического аппарата сосны, березы и дуба // 2009 (в печати).
7. Молчанов А.Г., Молчанова Т.Г. Распределение солнечной радиации в пологе дубового насаждения // Лесоведение. 2005. № 1. С. 52-62.
8. Молчанов А.Г., Хазанов В.С. Измерение и расчет поглощения ФАР побегами сосны // Лесоведение. 1975. № 2. С. 75-79.
9. Тооминг Х. О. теоретически возможном КПД фотосинтеза с учетом дыхания // Вопросы эффективности фотосинтеза. Тарту: Ротапринт ТГУ, 1969. С. 5-25.
10. Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов. (Методы изучения и результаты) // Лесоведение и лесоводство. Т. 1. Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, 1975. С. 9-190.
11. Цельникер Ю.Л. Физиологические основы теневыносливости древесных растений. М.: Наука, 1978. 216 с.
12. Farquhar G.D., von Caemmerer S., Berry J.A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species // Planta. 1980. V. 149 P. 78-90.
13. Molchanov A.G. Photosynthetic utilization efficiency of absorbed photosynthetically active radiation by Scots pine and birch forest stands in the southern Taiga // Tree Physiology. 2000. V. 20. № 17. P. 1137-1148.
14. Molchanov A.G. Estimation of photosynthetic productivity of a forest stands using the efficiency in the utilization of absorbed radiation by a stand for photosynthesis // Monitoring of Energy-Mass Exchange between Atmosphere and Forests Ecosystems. Göttingen, 2002. P. 31-42.
15. Monsi M., Saeki T. Über den Lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion // Jap. J. Bot. 1953. V. 14, № 1. P. 22-52.

ESTIMATION OF PHOTOSYNTHETIC EFFICIENCY OF FOREST STANDS

© 2009 A.G. Molchanov

Institute of Forest Science, v. Uspenskoe, Moscow region; e-mail: root@ilan.msk.ru

It is offered to count photosynthetic efficiency (FP) on the basis of absorbed by bed curtains of a forest stand of solar radiation and operating ratio absorbed HEADLIGHTS on photosynthesis overdeciduous runaway. The quantity assimilated CO₂ a layer of bed curtains of a forest stand at definition by this method is product of two sizes: quantities absorbed by a layer of bed curtains of radiation and operating ratio of absorbed solar radiation on photosynthesis (photosynthesis EFFICIENCY) overdeciduous runaway.

Keywords: *photosynthetic efficiency, absorbed solar radiation, operating ratio of absorbed radiation on photosynthesis.*

УДК 631.618 + 631.442.5 : 004.942

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ КАРЬЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ ROMUL

© 2009 М.А. Надпорожская¹, Е.В. Абакумов¹, О.Г. Чертов²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург,
e-mail: biosoil.bio.pu.ru

² University of Applied Sci., Bingen, Germany, e-mail: chertov@fh-bingen.de

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 органического вещества почвы и растительности (разнотравно-злаковой смеси и саженцев ели). Произведена оценка экологически оптимальных доз внесения торфа при рекультивации.

Ключевые слова: *рекультивация, нарушенные промышленные земли, органическое вещество почв, математическая имитационная модель.*

ВВЕДЕНИЕ

Площадь земель, нарушенных в результате открытых горных разработок на территории Северо-Запада Русской равнины, составляет около 0,1%. Интенсивные исследования сравнительной эффективности самозарастания и рекультивации таких нарушенных земель проводятся сравнительно недавно, с 70-х годов XX в. Основными приемами биологической рекультивации техногенных отвалов служат внесение торфа, подсев разнотравно-злаковых смесей, лесопосадки. Полевые наблюдения показали, что временные стадии восстановления почв при рекультивации могут ускоряться по сравнению с самозарастанием примерно на 10 лет. Но проведение рекультивационных мероприятий нарушенных ландшафтов на Северо-Западе России значительно отстает от других регионов страны. Причина малой популярности рекультивации – экономическая и экологическая неэффективность проводимых мероприятий [1, 4].

При рекультивации техногенных отвалов восстановление растительности и почвы значительно ускоряется за счет внесения семян растений, удобрения почвы. Органические удобрения способствуют накоплению биомассы, улучшают физико-химические свойства минеральных грунтов. Важно определить стартовую дозу внесения удобрений, обеспечивающую продукционные процессы и не дающую избытка непродуктивных потерь, приводящих к загрязнению атмосферы и грунтовых вод.

Для оптимизации доз и видов вносимых органических удобрений, уменьшения непродуктив-

ных потерь биофильных элементов на начальных этапах можно применять имитационные вычислительные эксперименты с использованием математических моделей. Модель динамики органического вещества почв ROMUL была широко использована для анализа функционирования и прогноза изменений педогенной основы лесов Восточной России и других стран [5]. Модель ROMUL может быть использована также для объективизации процедур оценки воздействия на окружающую среду и прогнозирования эффективности почвовосстановления. Первая подобная попытка применения математической модели для оценки эффективности рекультивации нарушенных территорий была предпринята О.Г. Чертовым с соавторами. [9]. Вычислительные эксперименты производили с помощью модели экосистемы леса EFIMOD, где в качестве почвенной подмодели использована ранняя версия модели ROMUL. Вычислительные эксперименты показали, что темпы рекультивации сильно зависят от стартового внесения удобрений в виде грубого гумуса или компоста (C:N соответственно 25 и 15) и поступления азота из атмосферы (4 и 15 кг/га в год). Все варианты показали преобладание процессов минерализации внесенных органических удобрений. Преобладание аккумуляции органического вещества в почве начиналось только после достижения определенных стадий роста сосны. Использованная версия модели EFIMOD имитировала разложение внесенного удобрения, аккумуляцию биомассы древостоя и гумуса в почве, т.е. имитировала динамику органического вещества в системе «удобрения-почва-дерево», без учета влияния напочвенного покро-

ва, который обеспечивает более полное использование освобождающихся в процессе минерализации веществ и может позволить сократить непродуктивные минерализационные потери стартовых удобрений. Простой балансовый агрохимический расчет здесь неприменим, так как зависимости динамических взаимодействий минерализации, гумификации и роста растений достаточно сложны. Версия лесной экосистемной модели с напочвенным покровом находится в стадии разработки [5]. Поэтому для вычислительных экспериментов в настоящей работе мы использовали модель динамики органического вещества почв ROMUL, которая дает возможность учета поступления любых когорт органического вещества – опада трав, деревьев, органических удобрений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Задачей 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.

Математическая модель ROMUL детально описана ранее [8, 9]. В основу модели положена математическая формализация концепции типов гумуса лесных почв как сукцессионных стадий трансформации органического вещества почв, отмечаемой превалированием различных групп организмов-деструкторов. Входные параметры: количество поступающего органического вещества, содержание азота и золы по когортам, запасы органического вещества и азота в почве и ее объемная масса. Климатические параметры: температура и влажность лесной подстилки и почвы. Используются среднемесячные значения. Модель рассчитывает динамику органического вещества почвы в лесной подстилке, минеральной части профиля почвы и соответствующие запасы азота. Модель также показывает количество углекислого газа и доступного растениям минерального азота, выделившихся при разложении органического вещества.

Варианты вычислительных экспериментов. *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 распределения корней в зависимости от мощности лесной подстилки (в данном случае для 100 летнего леса 45% и 55%

корневого опада поступало на и в почву, соответственно). Влияние приемов рекультивации изучали в следующих вариантах: 2 - подсев разнотравно-злаковой смеси (N в напочвенном и корневом опаде трав соответственно 1,0 и 0,8%), с возрастающе - сокращающимся опадом в течение 20 лет, с максимумом 100 г/м² за год и долей опада корней 70%; 3 - стартовое внесение в почву торфо-гумусовой смеси 1 кг/м²: 30% торфа (C/N 25) и 70% гуматов (C/N 10); 4 - подсев разнотравно-злаковой смеси и внесение в почву торфо-гумусовой смеси 1 кг/м² – сочетание вариантов 2 и 3; 5 - стартовое внесение на/в почву торфа 1, 2, 3, 4 кг/м² (C/N 25).

Варианты 3 и 4 нуждаются в дополнительном пояснении. Традиционно применяют только низинный или переходный торфы, что фактически восстанавливает только лабильную часть гумуса, т.е. комплекс гумусовых веществ с частично разложенными растительными остатками (как в варианте 5). В вариантах 3 и 4 сделана попытка имитации восстановления целостной системы органического вещества почв. Предполагается, что восстановление стабильного гумуса можно обеспечить внесением растворов искусственно синтезированных гумусовых веществ, способных к адсорбции минеральной частью почвы, а торф соотнесен с лабильной частью. Пробные лабораторные эксперименты по исследованию устойчивости искусственных гуматов после внесения их в почву предполагают возможность применения такого приема при восстановлении почв [6].

Климатические параметры. Нами были составлены сценарии изменения температуры и влажности суглинистой почвы Лужского района Ленинградской области (Табл. 1). Компилировали температуру лесной подстилки и почвы, принимая во внимание, что температура воздуха самых холодного и теплого месяцев (-8,9) и (+)16,6°C. Изменение в течение года влажности лесной подстилки и минеральной части профиля почвы задали в диапазоне 100-400 и 40-60 весовых % соответственно. В проведенных вычислительных экспериментах действие нерегулярных факторов (ветровалов, снегопадов, насекомых, инфекций) не учитывали.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты вычислительных экспериментов показали, что при имитации влияния только опада ели восстановление лесной подстилки и лабильной части гумуса происходит за 100 лет, стабильный гумус продолжает накапливаться замедленными темпами и после 200 лет (рис. 1). Это соответствует литературным данным о характерном времени формирования основных морфоло-

Таблица 1. Среднемесячные значения температуры и влажности.

Месяц	Т, °С		Влажность, вес. %	
	воздуха	почвы	Лесной подстилки	почвы
1	-8,9	-0,5	400	60
2	-8,0	-1,0	400	60
3	-4,3	-1,0	400	60
4	3,3	2,0	400	60
5	10,6	9,0	300	60
6	14,8	14,4	200	50
7	16,6	16,0	100	40
8	15,1	14,5	200	50
9	9,6	10,0	300	60
10	4,1	5,0	400	60
11	-2,0	1,0	400	60
12	-7,0	0,0	400	60

гических свойств в подзоне южной тайги на тяжелых породах [2] и данным по запасам органического вещества в почвах зональных лесов – 5,8-6,9 кг/м² [7].

Посев разнотравно-злаковой смеси, внесение торфо-гумусовой смеси повышают общие запасы органического вещества почвы, это влияние

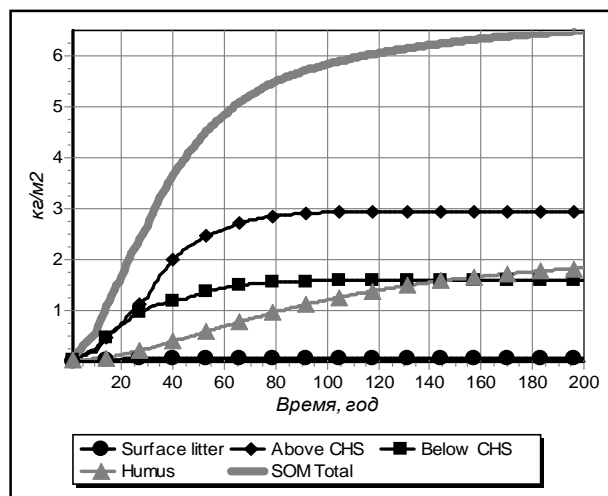


Рис. 1. Аккумуляция органического вещества в почве восстановительной сукцессии елового леса: Above CHS - лесная подстилка; Below CHS - частично разложенные растительные остатки в почве; Humus - специфические гумусовые вещества в почве; SOM total - органическое вещество почвы

сохраняется 40-50 лет. Общие запасы органического вещества в почве во всех вариантах становились равными через 50 лет (рис. 2). Используемая версия модели ROMUL не представляет возможности вычлнить роль гуматов, вносимых с торфом. Этот вопрос остается открытым как в плане преобразования структуры модели, так

и для изучения в лабораторных и полевых экспериментах.

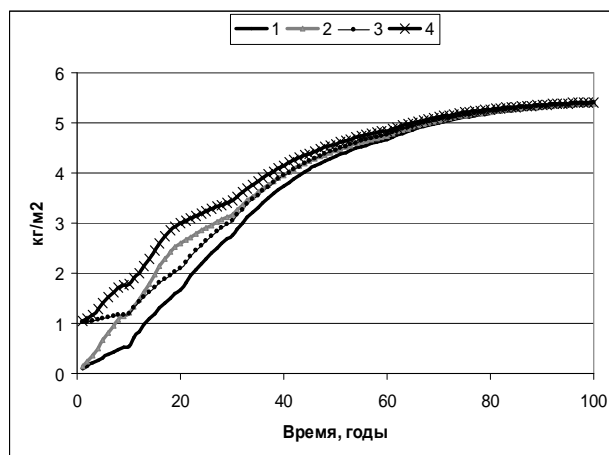


Рис. 2. Аккумуляция органического вещества в почве восстановительной сукцессии елового леса: 1 - контроль, 2 - посев злаково-разнотравной смеси, 3 - внесение торфо-гумусовой смеси в почву, 4 - посев трав и внесение торфо-гумусовой смеси в почву

В последние годы главным принципом для управления экосистемами декларируется сохранение всех параметров и процессов экосистемы, находящейся в состоянии оптимального функционирования без признаков деградации [10]. В развитие принципов устойчивого природопользования и самовоспроизводства лесных экосистем был предложен почвенный критерий устойчивости: сохранение запасов органического вещества почвы. В настоящий момент представляется интересным произвести расчет доз органических удобрений для получения сбалансированного биологического круговорота и предотвращения непродуктивных минерализационных потерь. В наших вычислительных экспериментах этому условию соответствуют дозы органических удобрений 1-2 кг/м² (10-20 т/га). После внесения 30 т/га торфа на поверхность почвы преобладают процессы минерализации (рис. 3А). При внесении торфа 30 т/га запахованием в почву непродуктивные потери лабильной фракции органического вещества почвы определены в первые 10 лет (рис. 3Б). Подсев трав (при общей массе их опада 100 г/м²) компенсирует непродуктивные потери удобрений (рис. 3В).

Биомасса высеянных на рекультивируемых субстратах травосмесей может достигать и гораздо больших величин, до 500-600 г/м² [3]. Эта величина зависит от почвенных и климатических условий, а также биологических особенностей растений и требует отдельных вычислительных экспериментов. Вероятно, дозы вносимых

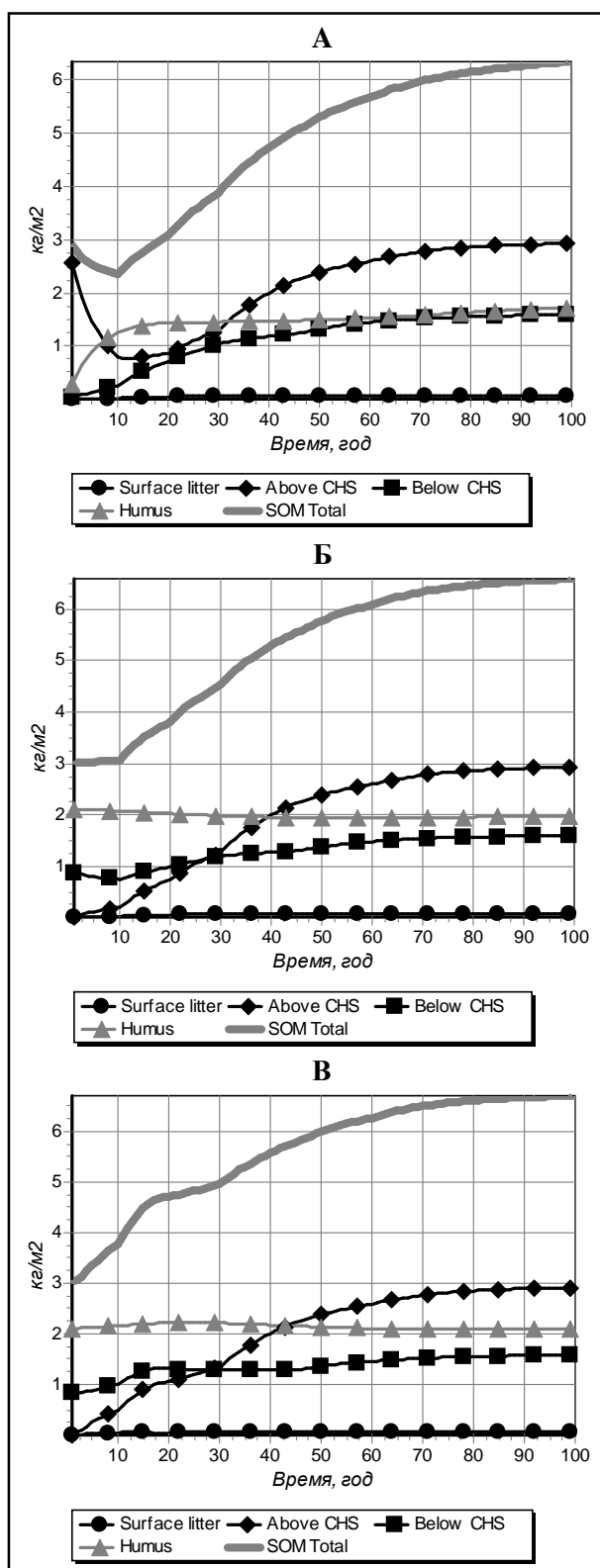


Рис. 3. Аккумуляция органического вещества в почве восстановительной сукцессии елового леса. Обозначения как на рис. 1. Варианты вычислительных экспериментов: А - торф, 3 кг/м², внесение на поверхность почвы; Б - торф, 3 кг/м², внесение запахиванием в почву; В - Торф, 3 кг/м², внесение запахиванием в почву, и посев трав, дающих опад 100 г/м²

органических удобрений могут быть повышены как в случае подсева и развития обильной биомассы трав на первых этапах рекультивации, так и в условиях более холодного климата, когда скорости трансформации органического вещества значительно понижаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные нами пробные вычислительные эксперименты показывают перспективность использования математических моделей для оценки эффективности рекультивационных мероприятий. Долгосрочные прогнозы развития экосистем трудно проверить экспериментально. Математическое моделирование начальных этапов восстановления растительности и почвы на минеральных грунтах, проходящих достаточно быстро (различия между вариантами существенны и выявляются на протяжении первых 5-10 лет) можно подтвердить (или опровергнуть) полевыми опытами.

Развитие работ по прогнозированию скорости восстановления и оценке эффективности рекультивации – в уточнении физико-химических характеристик: содержания азота в когортах опада и изменения микроклимата по стадиям зарастания минеральных субстратов; изменения свойств минеральных субстратов после стартового внесения органических удобрений (водоудерживающей способности, теплоемкости). Следует учитывать специфику минералогического и гранулометрического состава литогенной основы. Существенный момент исследований – учет гетерогенности условий и свойств поверхности минерального субстрата, а также неравномерности поступления опада на начальных этапах зарастания. Важен, особенно для промышленных районов, учет поступления в почву азота с атмосферными выпадениями. Необходимо сочетать исследования в долгосрочных стационарных наблюдениях, физических лабораторных и полевых экспериментах с имитационным математическим моделированием. Перспективны оценка гетерогенности почвенно-растительного покрова и развитие приемов математического моделирования его динамики.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-04-01128).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Александровский А.Л. Развитие почв восточ-

- ной Европы в голоцене: Дис. ... докт. биол. наук. М., 2002. 48 с.
3. Андроханов В.А., Овсянникова С.В., Курачев В.М. Техноземы: свойства, режимы, функционирование. Новосибирск: Наука. 2000. 200 с.
 4. Капелькина Л.П. Экологические аспекты оптимизации техногенных ландшафтов. СПб.: ПРОПО, Наука, 1993. 191 с.
 5. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. (Отв.ред. В.Н. Кудяров.) М.: Наука, 2007. 380 с.
 6. Федорос Е.И., Надпорожская М.А., Шипов В.П., Чертов О.Г. Препараты гуминовых веществ для сельского и городского хозяйства – оспользование для рекультивации и реабилитации почв // *Фундаментальные основы инновационных биологических проектов в «Наукограде»*. Сб. статей. СПб.: Изд-во С.-Петербур. унта, 2008. С. 179-203.
 7. Чертов О.Г. Экология лесных земель. Л.: Наука. 1981. 192 с.
 8. Chertov O.G. Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.A., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modelling. *Ecological Modelling/ 2001: V. 138 № 1-3. P. 289-308.*
 9. Chertov. O.G. Komarov. A.S., Tsiplianovsky. A.V. Simulation of soil organic matter and nitrogen accumulation in Scots pine plantations on bare parent material using forest combined model EFIMOD. *Plant and Soil. 1999. V. 213. P. 31-41.*
 10. Helsinki Process. European Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management Adopted by the Expert Level Follow-up Meetings of the Helsinki Conference in Geneva (24 June 1994) and in Antalya (23 January 1995). 1995.

OPTIMIZATION OF SOIL RECLAMATION ON OPEN-CUST MINES USING SIMULATION MODEL OF SOIL ORGANIC MATTER DYNAMICS ROMUL

© 2009 M.A. Nadporozhskaya¹, E.V. Abakumov¹, O.G. Cherotv²

¹ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia;
e-mail: biosoil.bio.pu.ru

² University of Applied Sci., Bingen, Germany;
e-mail: chertov@fh-bingen.de

As showed by our simulation experiments with mathematical model ROMUL the most effective reclamation of open-cust mines nontoxic loam would be in artificial restoration of soil organic matter system and plant cover (grasses and spruce seedlings). The optimal doses of peat used for reclamation were estimated.

Key words: *reclamation of open-cust mines, soil organic matter, mathematical simulation model.*

ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СИСТЕМ ИЗМЕНЧИВОСТИ (НА ПРИМЕРЕ *AGROPYRON CRISTATUM* (L.) BEAUV.)

© 2009 С.И. Неуймин¹, С.А. Шавнин¹, А.И. Монтиле², А.А. Монтиле¹

¹Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург;
e-mail: sergneu@mail.ru; sash@botgard.uran.ru; org17@mail.ru

²Уральский государственный лесотехнический университет, г. Екатеринбург;
e-mail: amontile@gmail.com

Представлен новый подход к изучению изменчивости отдельных признаков и их сочетаний. Совместное рассмотрение элементарных и финальных признаков обеспечивает учет основных элементов строения, которые определяются наследственностью и факторами среды. Траектории (последовательности признаков) отображают индивидуальные особенности онтогенеза. Предложенный метод проиллюстрирован примером анализа генеративной сферы четырех генетических форм *Agropyron cristatum* (L.) Beauv. за четыре вегетационных периода.

Ключевые слова: *эпигенетика, изменчивость, структурные элементы, паспортизация генетических форм.*

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия явно прослеживается возрастание интереса к различным, в том числе эволюционным, аспектам эпигенетики [2, 7, 9, 20, 21, 23, 26], «изучающей причинные взаимодействия между генами и их продуктами, образующими фенотип» [18, с. 18]. Несмотря на то, что основной объем исследований сосредоточен на изучении процессов, которые имеют место при синтезе белков, в теоретическом плане продолжается разработка концепций, охватывающих все иерархические уровни организации жизни. По-прежнему далека от разрешения проблема объяснения взаимообусловленности двух «краев» спектра: молекулярно-генетического и организма в целом, соотношения наследственности и фенотипа [3, 20, 25].

Различия в наследственности проявляются не только в статически фиксируемых морфометрических признаках, но и в специфике протекания биологических процессов на разных уровнях организма, в том числе динамики адаптации, как гомеостатической, так и связанной с переходом в новые устойчивые состояния. По словам Б.С. Эфрусси, «внехромосомная наследственность обуславливается информацией, находящейся в ядре», однако «в некоторых случаях передача информации основана на чисто генетических механизмах, то есть на передаче частиц, содержащих собственную структурную информацию, а в других случаях – на эпигенетических механизмах, т.е. передаче функционального состояния ядра» [24]. Е.Н. Синская [17, с. 109], кроме структурных информаций (которые не обязательно относятся к хромосомной информации, так как

существуют и внехромосомные информации, связанные со структурными частицами иного рода), указывает еще и эпигенетические надстройки (эпигенез) и отмечает: «В основе эпигенеза лежит развитие особых динамических равновесий».

Представляется очевидным, что выявление динамической специфики, фиксируемой результатами наблюдений, возможно только с позиций изучения комплексной изменчивости всей совокупности параметров и структуры организма, как системы. Основные трудности связаны, с одной стороны, с отсутствием системных моделей процессов развития, объединяющих физиологический и морфологический подходы, а с другой – с недостаточностью средств формального анализа результатов наблюдений с точки зрения отображения собственно структурных компонентов описаний многоуровневых объектов [6, 20].

В современных исследованиях жизненные формы растительного организма рассматриваются как многоуровневые системы. Ставятся вопросы о наличии в любом организме набора конструктивно-морфологических элементов определяющих их внешний облик независимо от среды обитания [1, 5, 22, 27-32]. Рассматриваются аналитический и синтетический принцип комплектации внешнего облика организма с использованием различных моделей строения. Так при аналитическом подходе осуществляется синтез составных частей объекта с учетом типов элементов и типов связей между ними. Особо подчеркивается важность набора строительных единиц (состав объекта) и способов их соединения друг с другом [4, 19]. В основу данного подхода заложен принцип раскрытия структуры объектов по свойствам и числу их элементов, а также отношении-

ями между ними [19]. При архитектурном подходе осуществляется анализ правил взаимного расположения частей с конечным выходом на строение объектов и их архитектуру [5, 8]. В то же время представленные авторы в своих исследованиях предполагают существование набора конструктивно-морфологических элементов, которые имеют ограниченное число способов комплектации [1, 22]. При этом подчеркивается влияния среды на модели строения организмов [27-32].

Одним из направлений в изучении изменчивости, является полноценное раскрытие различных ее механизмов (систем) [10, 15, 16]. Само понятие изменчивость рассматривается в различных контекстах, ключевым из которых является многовариантность ее проявления на различных уровнях организации. Способность любого организма адаптироваться к условиям произрастания реализуется в формировании траекторий элементов и признаков различного ранга. Соответственно, механизмы формирования траекторий признаковой структуры предопределяются и могут проявляться взаимосвязанной комбинаторикой последовательностей структурированных признаков, фиксирующей в системе организма особенности протекания динамических процессов.

Проводимые исследования закономерностей изменчивости признаков различного ранга в большинстве случаев фактически не учитывают особенности измеряемых варьирующих характеристик, применительно к иерархическому положению их групп в описании системы. В частности, не фиксируется «архитектурное» построения ее структурных элементов. Параметризация структурных компонентов, т.е. формальное, доступное для аналитического исследования, определение конструкции в смысле Кренке остается основной проблемой [6]. По нашему мнению, влияние среды на строение организмов значимым образом проявляется в различных аспектах изменчивости траекторий развития элементов, формирующих признаки различного ранга [13, 14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

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 предложено использовать «Радикальный показатель системы сжатых отображений» (Рп ССО) [10-12, 14]. 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. В растительной системе на разных уровнях ее организации, таковыми являются варьирующие признаки, также состоящие из совокупности элементов.

Мы предлагаем следующую модель построения траекторий развития количественных признаков на уровне растительного организма. Задана случайная последовательность количественных «финальных» признаков: a, b, c, d, \dots которая соответствует организму – A , и аналогичная последовательность организму – B . Соответственно, организмы также формируют ряды субэлементов: A, B, C, D, \dots , но на другом уровне организации – экотипическом. При формировании «финального» признака « a » возможно в свою очередь выделить последовательность элементов $a_1, a_2, a_3, a_4, \dots$, суммарное значение которых, составляет данный признак, в силу чего он определен нами как экоэлемент « a ». Экоэлементы b, c, d, \dots так же состоят из соответствующих последовательностей элементов. Совокупность траекторий или последовательностей признаков-элементов 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. В нашем опыте соцветья растений *A. cristatum* (L.) Beauv. описаны по 14 финальным признакам колоса (a, b, \dots, n) и соответствующим каждому из них последовательностям аналогичных признаков-элементов ($\{a_1, a_2, \dots, a_s\}, \{b_1, b_2, \dots, b_s\}, \dots, \{n_1, n_2, \dots, n_s\}$). 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 входят в соответствующий вариационный ряд последовательностей: $a_1, a_2, a_3, a_4, \dots$. Траектории формирования «финального признака» у разных образцов житняка различны при сходных условиях развития признаков (a_1 № a_2 № a_3 № a_4, \dots). Соответственно экоэлементы b, c, d, \dots взаимосвязано формируют свои специфические траектории развития в виде элементов. При последовательной свертке элементов траекторий (анализируется ниже) получаем числовые значения Рп ССО. В дальнейшем проводится частотный анализ значений Рп ССО и, на основании полученных данных, идентификация в частотном пространстве генетических форм.

Таким образом, при формировании финального признака возникают промежуточные вариан-

ты числовых значений элементов составляющие различные траектории развития. Данный процесс, в конечном итоге, соответствует формированию нормального для популяции или линии фенотипа. Так называемый набор промежуточных последовательностей элементов, по сути, в ходе своего развития направлен на реализацию определенных, отличных от нормы, устойчивых состояний фенотипа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В систематике растений совокупности варьирующих признаков используются как описательные комплексы. Для формального выражения представленных комплексов и их траекторий развития нами использован математический алгоритм «Радикальный (интегральный) показатель системы сжатых отображений». В условиях применимости принципа повторных преобразований элементов растительной системы стал возможным интегральный анализ последовательностей количественных и качественных признаков в зависимости от их уровня организации. При первичном агрегировании последовательностей элементов растительной системы (с их перестановкой, которая обусловлена чувствительностью алгоритма к порядку вхождения элементов) получаем унифицированную систему единиц измерения для их дальнейшего анализа. Последующее агрегирование унифицированных элементов с использованием того же алгоритма дает качественную характеристику сложных растительных описательных комплексов. Исходные данные признаков-элементов, формирующих финальные признаки, представленные в количественном числовом выражении, преобразовывались по алгоритму Рп ССО [14] с использованием компьютерных возможностей по следующей схеме:

1. Первичная унификация элементов последовательностей аналогичных признаков колоса *Agropyron cristatum* (L.) Beauv. (представлены финальные признаки *a* и *b*, остальные последовательности обрабатываются таким же образом)

$$\begin{array}{r}
 a_1, a_2, a_3, \dots, a_{s-1}, a_s \quad Fa_1 \\
 a_2, a_3, \dots, a_{s-1}, a_s, a_1 \quad Fa_2 \\
 a_3, \dots, a_{s-1}, a_s, a_1, a_2 \quad Fa_3 \\
 \dots \quad \dots \\
 a_s, a_1, a_2, a_3, \dots, a_{s-1} \quad Fa_s
 \end{array}$$

Результат - последовательность признаков вида свертки $Fa = \{Fa_1, Fa_2, Fa_3, \dots, Fa_s\}$

$$\begin{array}{r}
 b_1, b_2, b_3, \dots, b_{s-1}, b_s \quad Fb_1 \\
 b_2, b_3, \dots, b_{s-1}, b_s, b_1 \quad Fb_2 \\
 b_3, \dots, b_{s-1}, b_s, b_1, b_2 \quad Fb_3 \\
 \dots \quad \dots \\
 b_s, b_1, b_2, b_3, \dots, b_{s-1} \quad Fb_s
 \end{array}$$

Результат - последовательность признаков вида свертки $Fb = \{Fb_1, Fb_2, Fb_3, \dots, Fb_s\}$.

2. Вторичное агрегирование (с перестановкой) унифицированных аналогичных признаков-элементов колоса *Agropyron cristatum* (L.) Beauv.

$$\begin{array}{r}
 Fa, Fb, Fc, \dots, Fm, Fn \quad Ra=FFa \\
 Fb, Fc, \dots, Fm, Fn, Fa \quad Rb=FFb \\
 Fc, \dots, Fm, Fn, Fa, Fb \quad Rc=FFc \\
 \dots \quad \dots \\
 Fn, Fa, Fb, Fc, \dots, Fm \quad Rn=FFn.
 \end{array}$$

Получаем результаты вторичного агрегирования с перестановкой *Ra, Rb, Rc, ..., Rn*. Вид свертки в этом случае тот же, что и при первичной унификации элементов.

Результаты вторичного агрегирования унифицированных аналогичных признаков-элементов колоса *Agropyron cristatum* (L.) Beauv. записываются в виде таблицы для последующего анализа совокупности элементов растительной системы (таблица).

Ниже приведен один из вариантов анализа полученных результатов. В частности, при распределении частоты встречаемости вторично агрегированных элементов отмечены характерные распределения последних в частотном пространстве (рисунок).

Установлено, что независимо от года выращивания *Agropyron cristatum* L. (Beauv.) четыре генотипа имеют четко детерминированную локализацию частот значений Рп ССО. Отдельные варианты имеют рассеянную характеристику частот, хотя в целом соответствуют примерному расположению в относительном частотном ряду. Так генотип Агр 4_3 имеет наиболее полиморфную систему подвижности частот Рп ССО практически во все годы изучения. Генотип Агр 4_1 отличается от остальных незначительной коррекцией в распределении частот. Соответственно, все генотипы имеют характерные частоты встречаемости Рп ССО.

В то же время представленные формы *Agropyron cristatum* L. (Beauv.) различаются между собой по локализации частот вторично агрегированных элементов. Генетически более близкими являются Агр 4_1 и Агр 4_14, так как у них большее количество совпадающих частот в близких позициях. Особого внимания заслуживает распределение незначительных частот (тонкие линии) вторично агрегированных элементов. Таковые частоты имеют характерные позиции, их подвижность является специфичной для каждого конкретного участка в комбинации вариантов признаков.

Таким образом, использование модели сжатия эпигенетических признаков, выраженных через Рп ССО, позволяет решать задачи дифференциации растительного многообразия и раскры-

Таблица. Вторично агрегированные значения элементов последовательностей аналогичных признаков колоса *Agropyron cristatum* L. (Beauv.)

Последовательности элементов в колосе	Вторично интегрированные элементы колоса													
	Ra	Rb	Rc	Rd	Re	Rf	Rg	Rh	Ri	Rj	Rk	Rl	Rm	Rn
1.	400	419	454	493	525	547	557	559	554	543	530	512	489	398
2.	402	419	453	491	524	545	556	559	554	544	530	513	490	400
3.	400	418	453	493	527	548	558	559	554	543	529	512	489	399
4.	402	418	452	491	525	547	558	559	554	544	530	512	490	400
5.	400	417	452	492	526	548	559	560	554	543	529	511	488	399
6.	400	417	452	492	526	548	559	560	554	544	529	511	488	399
7.	400	418	453	492	526	548	559	560	554	543	529	512	489	399
8.	401	419	453	492	525	547	557	559	554	544	530	512	490	399

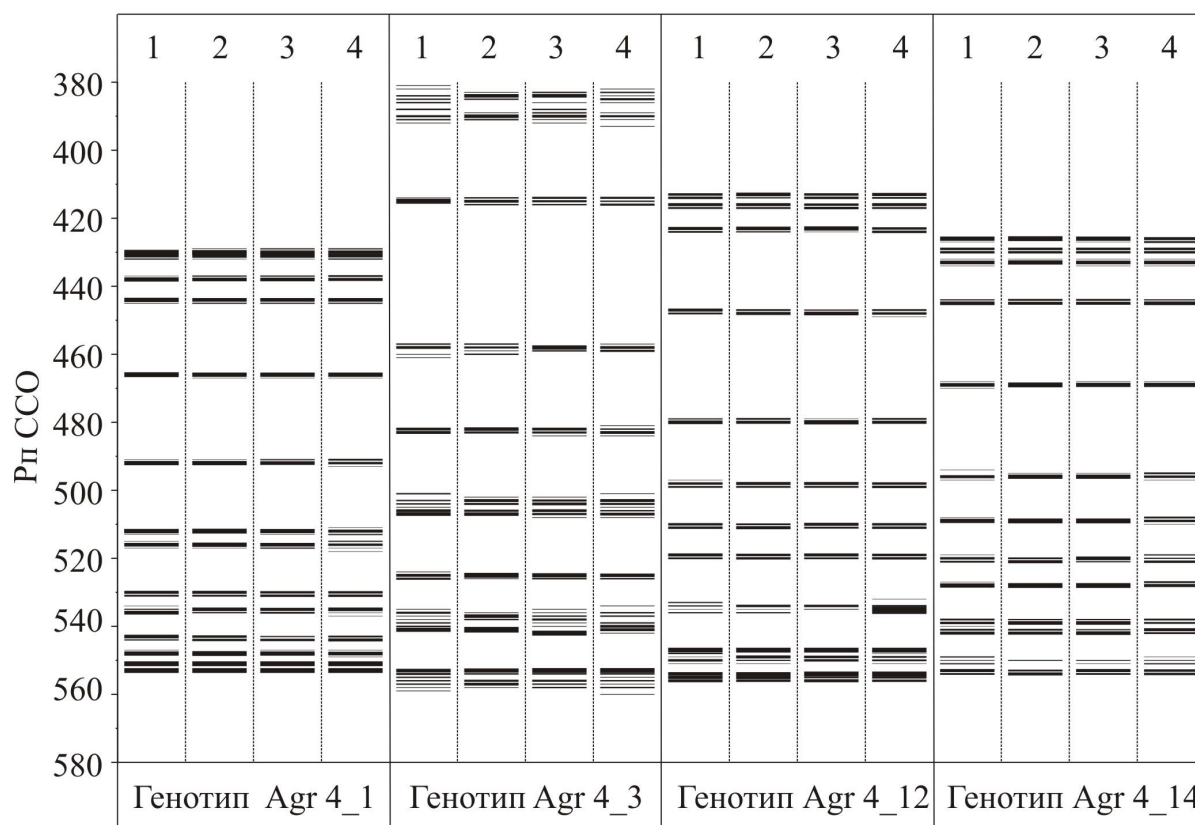


Рис. Частотное распределение вторично агрегированных элементов у различных генотипов *Agropyron cristatum* L. (Beauv.): толщина линии – пропорциональна частоте встречаемости Pп ССО; 1 - 2006 г., 2 - 2005 г., 3 - 2004 г., 4 - 2003 г.

вает свойства систем изменчивости. Получаемые результаты дают возможность идентифицировать генетические формы графически отображаемыми спектрами, которые аналогичны штрих-кодам.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН «Биологическое разнообразие» (ПП-1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Беклемишев В.Н. Основы сравнительной анатомии беспозвоночных. 3-е изд. Т. 1. Проморфология. М.: Наука, 1964. 432 с.
2. Белоусов Л.В., Чернавский Д.С., Соляник Г.И. Приложения синергетики к онтогенезу: (О параметрическом управлении развитием) // Онтогенез. 1985. Т. 16, № 3. С. 213-228.

3. Васильев А.Г. Эпигенетическая изменчивость неметрических пороговых признаков, фены и их композиции // Фенетика природных популяций. М.: Наука, 1988. С. 158-169.
4. Кирпотин С.Н. Жизненные формы организмов как паттерны организации и пространственные экологические факторы // Журн. общ. биол. 2005. Т. 66. № 3. С. 239-250.
5. Корона В.В., Васильев А.Г. Строение и изменчивость листьев растений: Основы модульной теории. Екатеринбург: УроРАН, 2007. 280 с.
6. Магомедмирзаев М.М. Введение в количественную морфогенетику. М: Наука, 1990. 232 с.
7. Малецкий С.Н. Иерархия единиц наследственности, изменчивость, наследование признаков и видообразование у растений // Эпигенетика растений. Новосибирск, 2005. С. 7-53.
8. Мамкаев Ю.В. Гомология и аналогия как основные понятия морфологии // Гомологии в ботанике: опыт и рефлексия. Тр. IX школы по теоретической морфологии растений «Типы сходства и принципы гомологизации в морфологии растений». СПб.: С.-Петербургский союз ученых, 2001. С. 39-50.
9. Назаров В.И. Эволюция не по Дарвину: смена эволюционной модели. М.: КомКнига, 2005. 520 с.
10. Неуймин С.И. Система изменчивости пшеницы эфиопской (*Triticum aethiopicum* Jakubcz.): Автореф. Дис.к.б.н. Л., 1991. С. 19.
11. Неуймин С.И., Мамаев С.А., Филатенко А.А. Паспортизация уровней проявления полигенных комплексов выраженных через «Систему-Р» / Сборник науч. тр. Бот. сада УрО РАН, Екатеринбург, 1998.: С. 133-140.
12. Неуймин С.И., Шмырин Н.И. Популяционная экология и интродукция растений // Новый подход к формализации структурных подразделений растительной системы / Сб. тр. Вып. 2. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. С. 210-218.
13. Неуймин С.И., Монтиле А.И., Шавнин С.А. Модель сжатия совокупности и эпигенетических признаков растений в виде интегрального показателя // Математическая биология и биоинформатика: Докл. I Международная конф. М.: МАКС Пресс, 2006. С. 162-163.
14. Неуймин С.И., Монтиле А.И., Шавнин С.А. Модель сжатия совокупности эпигенетических признаков растений в виде интегрального показателя // Электронный журнал «Математическая биология и биоинформатика». 2007. Т. 2, № 1. С. 154-159.
15. Неуймин С.И., Шавнин С.А., Зимницкая С.А. Структурно-функциональная организация генеративной сферы *Agropyrum cristatum* (L.) Beauv. в связи с адаптацией к новым условиям // «Вестник» ОГУ. 2007. Ч. 2. Вып. 75. С. 241-243.
16. Неуймин С.И., Зимницкая С.А., Филатенко А.А. Архитектурная модель оценки равновесных состояний растительной системы // Тезисы докл. Генетические ресурсы культурных растений в XXI веке, состояние, проблемы, перспективы. Санкт-Петербург, 2007. С. 676-678.
17. Синская Е.Н. О категориях и закономерностях изменчивости в популяциях высших растений // Проблем популяций у высших растений / Тр. Всесоюз. ин-та растениеводства. Л., 1963. Вып. 2. С. 3-134.
18. Уоддингтон К.Х. Зависит ли эволюция от случайного поиска? // На пути к теоретической биологии. 1. Прологомены. М.: Мир, 1970. С. 108-115.
19. Урманцев Ю.А. Симметрия природы и природа симметрии. М.: Мысль, 1974. 230 с.
20. Чайковский Ю.В. Наука о развитии жизни. Опыт теории эволюции. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2006. 712 с.
21. Чураев Р.Н. Эпигенетика: генные и эпигенные сети в онто- и филогенезе // Генетика. 2006. Т. 42. № 9. С. 1276.
22. Шафранова Л.М. Проблема гомологии в растительном мире: растение как объект гомологизации // Гомологии в ботанике: опыт и рефлексия; Тр. IX школы по теоретической морфологии растений «Типы сходства и принципы гомологизации в морфологии растений». СПб.: С.-Петербургский союз ученых. 2001. С. 30-38.
23. Шишкин М.А. Закономерности эволюции онтогенеза // Журн. общ. биол. 1981. Т.42, № 1. С. 38-54.
24. Эфрусси Б.С. О ядерной и цитоплазматической наследственности // Изв. АН СССР, сер.-биол., 1959. № 3.
25. Яблоков А. В. Фенетика: Эволюция, популяция, признак. М.: Наука, 1980. 135 с.
26. Alberch P. A developmental analysis of an evolutionary trend: A digital reduction in amphibian // Evolution. 1985. V. 39. P. 8-23.
27. Balogh J. Lebensgemeinschaften der Landtiere. Berlin: Akad-Verl; Budapest: Verl. ung. Akad. Wiss, 1958. 560 p.
28. Gisin H. Analyses et syntheses, biocenotiques // Arch. sci. phys. natur. Geneve. 1947. V. 29. P. 42-75.
29. Kuhnelt W.: VEB Fisher. 1970. 433 p.
30. Remane A. Die Besiedlung des Sandboden im Meere und die Bedeutung der Lebensformtypen für die Ökologie // Zool., Anz., suppl. 1952. V. 16. P. 357-369.
31. Tischler W., Synökologie der Landtiere. Stuttgart: Fischer, 1955. 414 p.
32. Warming E. Om planterigetets livsformer. Kjobenhavn: Festskr. udg. Univ. Kjobenhavn, 1908. 86 p.

**EPIGENETIC LAWS OF VARIABILITY SYSTEMS (ON EXAMPLE OF
AGROPYRON CRISTATUM (L.) BEAUV.)**

© 2009 S.I. Neuymn¹, S.A. Shavnin¹, A.I. Montile², A.A. Montile¹

¹Botanical Garden, Ural Division, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg;
e-mail: sergneu@mail.ru; sash@botgard.uran.ru; org17@mail.ru

²Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg;
e-mail: amontile@gmail.com

New approach to the study of separate organism characteristics and their combinations variability is proposed. Combined analysis of elementary and final characteristics allows to describe the main elements of construction, which are determined by genetic and environmental factors. Trajectory (characteristics sequence) reflects individual peculiarities of ontogenesis. Proposed method is illustrated by generative organs construction analysis for four genetical *Agropyron cristatum* (L.) Beauv. forms within four periods of vegetation.

Key words: *epigenetics, variability, elements of structure, genetic passport system*

УДК: 517.958:57

СЛОЖНЫЕ РЕЖИМЫ ДИНАМИКИ МОДЕЛИ ДВУХВОЗРАСТНОЙ ПОПУЛЯЦИИ С ПЛОТНОСТНО-ЗАВИСИМОЙ РЕГУЛЯЦИЕЙ ВЫЖИВАЕМОСТИ МОЛОДИ

© 2009 Г.П. Неверова¹, Е.Я. Фрисман²

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, г. Биробиджан,
e-mail: ¹ galina.nev@gmail.com; ² frisman@mail.ru

Исследуется модель динамики численности популяции с сезонным характером размножения. Предполагается, что популяция может быть представлена к началу очередного сезона размножения совокупностью двух возрастных классов: младшего, включающего неполовозрелых особей, и старшего, состоящего из особей, участвующих в размножении. Параметр выживаемости молоди представлен экспоненциальной функцией численностей обеих возрастных групп и тем самым осуществляется плотностно-зависимая регуляция роста популяции. Проведено аналитическое и численное исследование модели. Показано, что плотностно-зависимые факторы регуляции роста популяции могут привести к возникновению колебаний численности и к хаотическому динамическому поведению популяции.

Ключевые слова: *плотностно-зависимые факторы, динамика численности популяции, динамические режимы.*

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенным механизмом регулирования уровня численности популяции является уменьшение выживаемости неполовозрелых особей. Ранее случай двухвозрастной модели при плотностном лимитировании выживаемости младших возрастов был изучен довольно основательно. Так в работах [4-6] рассматривался случай, когда выживаемость молоди линейно или экспоненциально зависела от плотности самих младших возрастов. Однако, для многих животных выживаемость молоди определяется не только (и не столько) численностью молоди, но зависит и от численности взрослых особей. Крайним случаем здесь является каннибализм (например, у некоторых видов рыб), когда взрослые особи частично питаются собственным приплодом, снижая тем самым численность своих популяций [1].

Данная работа продолжает исследования начатые в [4-6]. В отличие от предшествующих работ, в которых предполагалось, что на выживаемость молоди влияет только его численность (или численность всей популяции), здесь анализируется случай, когда коэффициент выживаемости молоди является функцией численности обеих возрастных групп. Такая постановка задачи в полном виде до сих пор не рассматривалась, ее исследование позволяет проследить качественную картину изменения динамического поведения предлагаемой модели в зависимости от интенсивности конкурентного давления двух возрастных классов друг на друга.

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ

Уравнения динамики популяции, регуляция роста которой осуществляется путем снижения выживаемости молоди, имеют вид:

$$\begin{cases} x_{n+1} = ay_n \\ y_{n+1} = s(x_n, y_n)x_n + vy_n \end{cases} \quad (1)$$

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 [14] в виде $s(x, y) = e^{-\alpha x - \beta y}$, где α - коэффициент, описывающий интенсивность воздействия особей младшего возрастного класса, коэффициент β характеризует интенсивность воздействия особей второго возрастного класса.

УСТОЙЧИВОСТЬ СТАЦИОНАРНОГО СОСТОЯНИЯ

Модель (1) при замене переменных $\alpha \cdot x \rightarrow x$ и $\alpha \cdot y \rightarrow y$ сводится к виду:

$$\begin{cases} x_{n+1} = a \cdot y_n, \\ y_{n+1} = x_n \cdot \exp(-x_n - \rho \cdot y_n) + v \cdot y_n, \end{cases} \quad (2)$$

где $\rho = \beta/\alpha$ - параметр, характеризующий отношение интенсивности лимитирования выживаемости младшей возрастной группы за счет по-

ловозрелых особей и самолимитирования. Система имеет единственное ненулевое стационарное решение

$$\bar{x} = \frac{1}{1+c} \ln \frac{a}{1-v}, \quad \bar{y} = \frac{1}{a \cdot (1+c)} \cdot \ln \frac{a}{1-v},$$

существующее при $a \geq 1-v$ и $0 \leq v < 1$, где $c = \rho/a$.

Границы области устойчивости, могут быть определены на основе значений собственных чисел характеристического многочлена линеаризованной системы, соответствующей модели (2)

[2]:

$$\lambda = 1: a = a_1 = 1 - v,$$

$$\lambda = -1: a = a_2 = (1 - v) \exp\left(\frac{2v \cdot (1 + c)}{(c - 1)(1 - v)}\right),$$

$$|\lambda| = 1: a = a_3 = (1 - v) \exp\left(\frac{(2 - v)(1 + c)}{1 - v}\right).$$

Характерное изменение области устойчивости нетривиального равновесия в плоскости $(v; a)$ при вариации значений параметра c представлено на рис. 1.

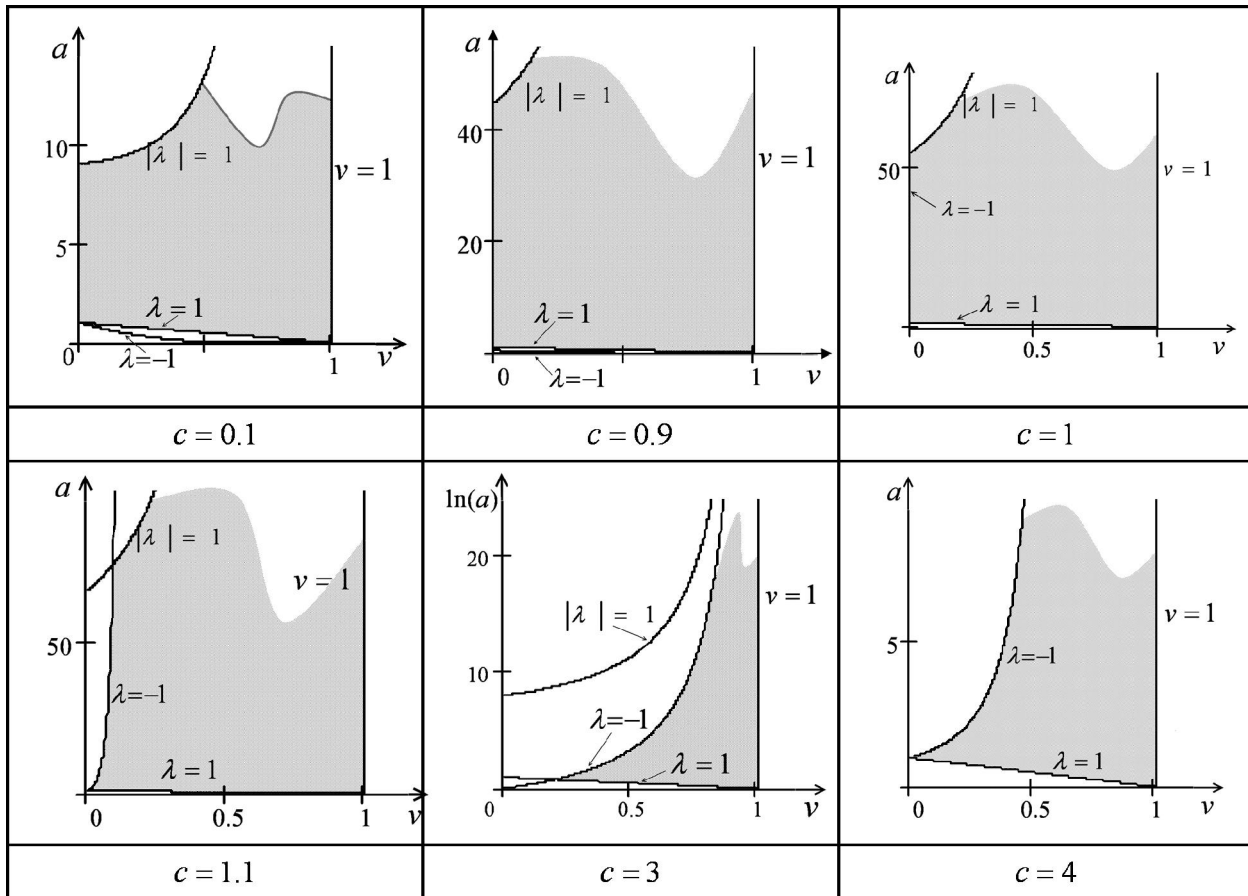


Рис. 1. Область устойчивости нетривиального решения системы (2) при фиксированных значениях параметра c .

В зависимости от возникающих режимов динамики в модели можно выделить следующие диапазоны значений параметра c .

1. $0 < c \leq 1$. В этом случае область устойчивости ограничивается одной кривой a_3 и существенно увеличивается с ростом параметра c .

Потеря устойчивости может произойти только при комплексно-сопряженных корнях характеристического уравнения, при переходе $|\lambda|$ через 1, и сопровождается появлением предельных инвариантных кривых, которые при дальнейшем удалении значений параметров v и a от границы устойчивости разрушаются с образованием весьма сложных предельных структур.

Таким образом, добавление к самолимитированию выживаемости младшей возрастной группы еще и лимитирования взрослыми особями (уменьшение выживаемости младшей группы с ростом численности взрослых) приводит, наряду с уменьшением равновесной численности популяции, к существенному увеличению области ее устойчивости.

2. $1 < c < 3$. При переходе параметра c через бифуркационное значение $c = 1$, добавляется новая граница области устойчивости a_2 , которая с ростом параметра c приводит к существенному ее сужению. Потеря устойчивости нетривиального равновесия через эту границу происходит при

переходе одного из собственных чисел через -1 и сопровождается рождением предельного 2-цикла. Вместе с тем при $1 < c < 3$ сохраняется граница области устойчивости a_3 , соответствующая $|\lambda| = 1$, которая пересекается с кривой a_2 при $v = 2(c-1)/(c+1)$.

Таким образом, дальнейший рост ограничения выживаемости младшей группы взрослыми особями приводит, наряду с уменьшением равновесной численности популяции к существенно уменьшению области ее устойчивости. При этом меняется качественная картина потери устойчивости: появляется большая зона значений параметров v и a увеличивающаяся с ростом параметра c переход в которую сопровождается потерей устойчивости равновесия и появлением 2-цикла.

3. $c \geq 3$. В этом диапазоне значений параметра c кривая a_3 находится выше a_2 . Следовательно, область устойчивости ограничивается одной кривой a_2 и существенно уменьшается с ростом

параметра c . Потеря устойчивости может произойти только при переходе одного из собственных чисел через -1 . Следовательно, усложнение динамики происходит по сценарию Фейгенбаума - через каскад бифуркаций удвоения периода. Самолимитирование выживаемости младшей возрастной практически не играет роли.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Наглядное представление о поведении траекторий системы при $0 < c \leq 1$ дают «портреты» аттракторов, которые соответствуют конкретным значениям параметра a . Так при $c = 0,1$ и $v = 0,05$ переход параметра a через границу устойчивости сопровождается появлением предельной инвариантной замкнутой кривой, которая при дальнейшем росте a разрушается с образованием сложных предельных структур (рис. 2).

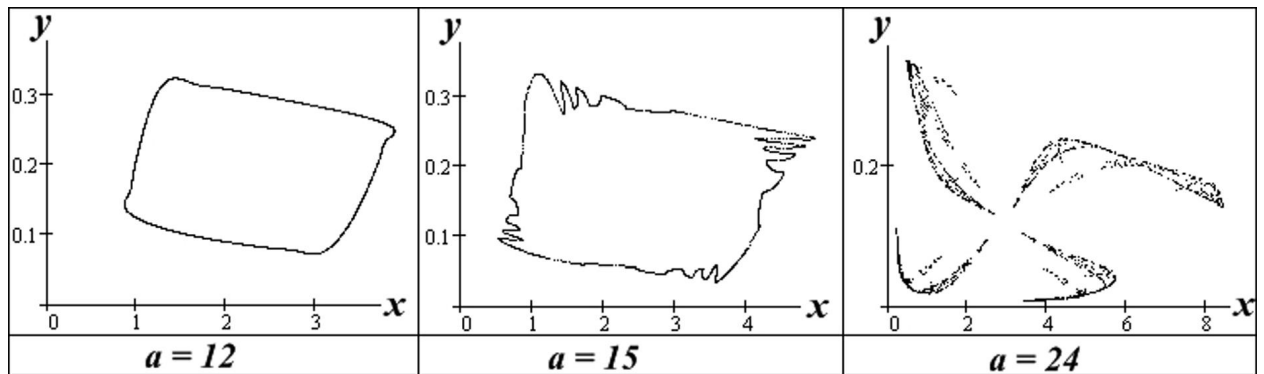


Рис. 2. «Портреты» аттракторов при изменении параметра a

В этом диапазоне значений параметра c ($0 < c \leq 1$) система имеет аттракторы дробной размерности [3], либо при малых значениях па-

раметра выживаемости старшего возрастного класса, либо при очень высоких значениях параметра рождаемости (рис. 3).

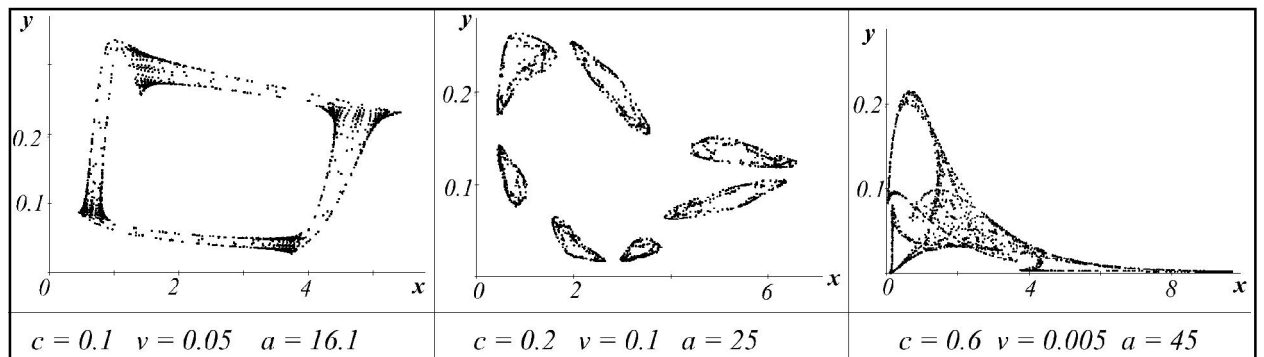


Рис. 3. «Портреты» аттракторов с дробной размерностью при $0 < c \leq 1$

При $1 < c < 3$ потеря устойчивости возможна двумя различными способами. На рисунке 4 для $c = 1,2$ представлены бифуркационные диаграм-

мы при различных значениях параметра выживаемости старшего возрастного класса.

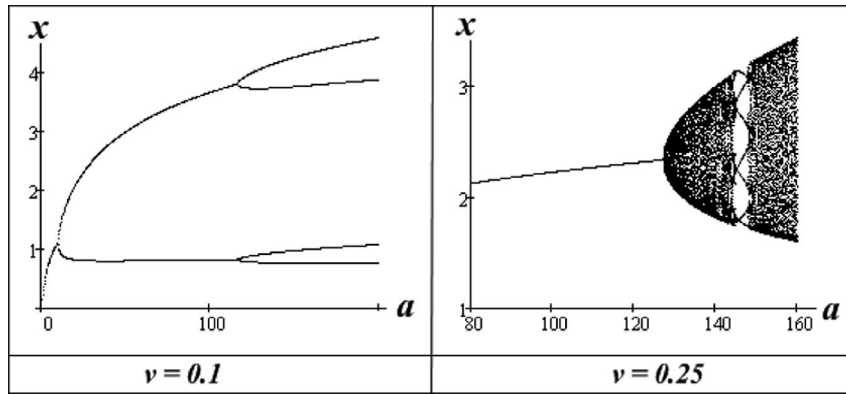


Рис. 4. Бифуркационная диаграмма динамической переменной x от параметра a при $c = 1, 2$

При $c \geq 3$ усложнение динамики происходит через каскад бифуркаций удвоения периода (рис.5). Бифуркационная диаграмма дополнена наиболее общим и часто встречающимся портретом фазовых траекторий ($c = 15, \nu = 0,5$) Как видим, он характеризуется большими размахами значений численности между крайними точками. Для более полного анализа, указанного случая были построены графики старшего ляпуновского показателя и размерности аттрактора (рис.

5). В соответствии со значениями старшего ляпуновского показателя реализуется каскад бифуркаций удвоения периода (в точках бифуркаций значения размерности аттрактора и старшего ляпуновского показателя равны нулю). Возникающие далее хаотические структуры имеют размерность чуть больше единицы. Причем с дальнейшим ростом значений параметра a размерность аттрактора увеличивается [2].

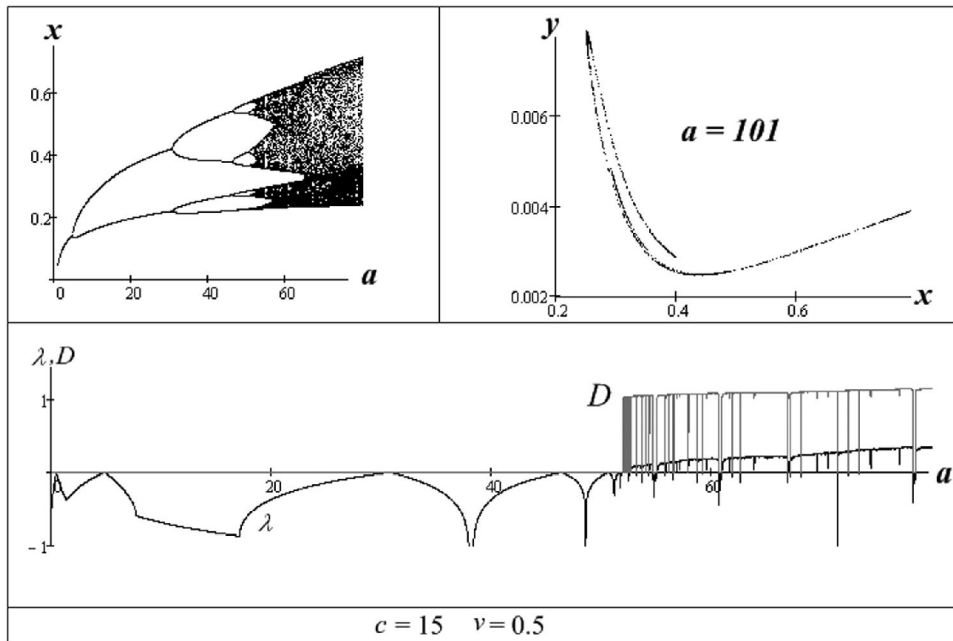


Рис. 5. Бифуркационная диаграмма, дополнена «портретом» аттрактора и графиками размерности аттрактора D и старшего ляпуновского показателя λ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование динамического поведения модели показало, что падение выживаемости молоди с увеличением его численности является эффективным механизмом регуляции роста численности. Падение выживаемости приплода, прямо или опосредованно связанное с

ростом его численности, широко распространено в природных популяциях, в том числе у крупных млекопитающих.

Вместе с тем, очевидно, что такая регуляция роста численности при увеличении потенциальных репродуктивных возможностей особей может привести к возникновению колебаний численности, имеющих весьма сложную временную

организацию.

Зона параметрической устойчивости популяции может существенно увеличиться, если коэффициент рождаемости будет уменьшаться не только с ростом численности половозрелых особей, но и с ростом численности приплода. Однако, такой регуляторный механизм оказывает положительное влияние только при слабом воздействии, не превосходящим регуляторную роль взрослых особей.

Аналогично, увеличивает область параметрической устойчивости популяции добавление к самолимитированию выживаемости младшей возрастной группы небольшого лимитирования взрослыми особями (уменьшение выживаемости младшей группы с ростом численности взрослых). Вместе с тем, регуляция выживаемости молоди преимущественно взрослыми особями оказывается мало эффективной: область устойчивости сильно сужается и при выходе из нее популяция испытывает колебания, подобные бифуркациям.

Таким образом, мы только-только начинаем осознавать эволюционные возможности развития экологически лимитированных популяций, обладающих возрастной структурой [7-10]. Сценарии их генетического и динамического развития очень впечатляют и весьма далеки до полного понимания и описания.

Исследования проведены при финансовой поддержке ДВО РАН (конкурсные проекты № 09-П-СО-06-006, № 09-И-Р15-01) и РФФИ (проект № 09-04-00146).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дажо Р.* Основы экологии. М.: Прогресс, 1975. 416 с.
2. *Кузнецов С.П.* Динамический хаос. М.: Физматлит, 2001. 296 с.
3. *Неймарк Ю.И., Ланда П.С.* Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987. 424 с.
4. *Фрисман Е.Я., Луннов 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.
5. *Фрисман Е.Я., Скалецкая Е.И.* Странные аттракторы в простейших моделях динамики численности биологических популяций // Обзорные прикладной и промышленной математики. 1994. Т.1, № 6. С. 988-1004
6. *Шануро А.П., Луннов С.П.* Рекуррентные уравнения в теории популяционной биологии. М.: Наука, 1983, 132 с.
7. *Charlesworth B.* Natural Selection on Multivariate Traits in Age-Structured Populations. Proc. R. Soc. Lond. B, 1993, 251, 47-52
8. *Ferriere R., Gatto M.* Chaotic Population Dynamics can Result from Natural Selection. Proc. R. Soc. Lond. B 1993, 251, 33-38
9. *Hastings A.* Age dependent dispersal is not a simple process: Density dependence, stability, and chaos // Theor. Popul. Biol. 1992. V. 41. № 3. P. 388-400.
10. *Kooi B. W. and Kooijman S. A. L. M.* Discrete Event versus Continuous Approach to Reproduction in Structured Population Dynamics // Theor. Popul. Biol. 1999. V. 56. № 1. P. 91-105.
11. *Ricker W.E.* Stock and recruitment. – J. Fish. Res. Board Can., 1954, vol.11, № 5, p.559-623.

DYNAMIC MODES OF TWO-AGE POPULATION MODEL

© 2009 G.P. Neverova¹, E.Ja. Frisman²

The Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Science
Institute for Complex Analysis of Regional Problems, Birobidzhan, Russia;
e-mail: ¹ galina.nev@gmail.com; ² frisman@mail.ru

In this paper we research a mathematical model of dynamics for the population number. We considered the population of the two age classes by the beginning of the next season: the younger, one including not reproductive individuals, and the senior class, consisting of the individuals participating in reproduction. The survival parameter of the younger class is represented the exponential functions of the both age groups numbers. According to this supposition the density-dependent factors restrict the development of population. Analytical and numerical analysis of the model is made. We investigate the dynamic modes of the model. It is shown that density-dependent factors of regulation for the population number can lead to generation of fluctuations and chaotic dynamics behavior of the population.

Key words: Population models equations, discrete-time systems, age distribution, density-dependent, stability, bifurcations, dynamic modes, chaos.

УДК 630.161.32

ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫРУБКИ НА РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

© 2009 А.В. Ольчев¹, К. Радлер²

¹Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, г. Москва;
e-mail: aoltche@gmail.com

²Отдел Биоклиматологии, Институт Бюсгена, Университет Георга-Августа, ФРГ, Геттинген;
e-mail: kradler1@gwdg.de

Трехмерная модель Mixfor-3D была разработана для описания радиационного режима неоднородных разновозрастных древостоев. Горизонтальное разрешение модели - 2×2 м, вертикальное разрешение - 1 м, шаг по времени - 1 час. В рамках европейского проекта по изучению динамики лесных экосистем и возобновлению лесных ресурсов Mixfor-3D была использована для оценки влияния сплошной вырубki на радиационный режим лесной экосистемы. Выполненное сравнение результатов модельных расчетов с данными полевых измерений показало, что разработанная модель позволяет достоверно описать пространственную и временную изменчивость полей солнечной радиации при разных условиях освещения как внутри древостоя, так и на вырубке, и в дальнейшем может быть использована для решения различных теоретических и прикладных задач.

Ключевые слова: *трехмерная модель, радиационный режим, лесная экосистема, сплошная вырубка.*

ВВЕДЕНИЕ

Рациональное использование лесных ресурсов, увеличение их продуктивности, а также устойчивости к ветровалам, заморозкам и вредителям требует проведение комплексных исследований, включающих экофизиологические, микроклиматические и почвенные наблюдения, а также развитие численных моделей микроклимата, пограничного слоя атмосферы и продукционного процесса. Очевидно, что подобные модели должны быть основаны на физико-биологических принципах и позволять максимально подробно описать процессы переноса радиации, тепла, водяного пара и углекислого газа в лесных экосистемах. При этом при рассмотрении процессов переноса в локальном масштабе, например в масштабе одной экосистемы, наиболее перспективный, очевидно, является модельный подход, предполагающий трехмерное описание структуры растительного покрова, а также переноса радиации, тепла, влаги и углекислого газа как внутри него, так и внутри приземного слоя атмосферы.

В рамках данного исследования была разработана трехмерная (3D) модель Mixfor-3D для описания радиационного режима внутри разновозрастного растительного покрова. Она была использована для оценки влияния сплошной вырубki на радиационный режим лесной экосистемы. Верификация модели была выполнена по данным микроклиматических измерений на небольшой вырубке (площадью около 2,4 га) в ельнике, расположенном на Золлинговской возвышенности в

Центральной Германии ($51^{\circ}46'N$, $09^{\circ}27'E$, 300 м н. у. м.) (рис. 1).

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Разработанная Mixfor-3D модель состоит из нескольких тесно взаимосвязанных блоков, описывающих 3D структуру древостоя и 3D перенос радиации [4]. Горизонтальное разрешение модели - 2×2 м, вертикальное разрешение - 1 м. Основной шаг по времени - 1 час.

Для описания 3D структуры растительности Mixfor-3D использует данные о положении отдельных деревьев в древостое, их высоте, диаметре и высоте крепления кроны, диаметре ствола и вертикальном распределении фитомассы.

Для описания основных морфологических параметров различных пород деревьев в модели использованы аллометрические соотношения, обобщенные в работе [9]. Для описания длины кроны ели (h_{crown}) в модели было использовано соотношение, предложенное Претчем с соавт. [7]:

$$h_{crown} = h \cdot (1 - \exp(\alpha_1 - \alpha_2 \cdot h/DBH - \alpha_3 \cdot DBH))$$

где h - высота деревьев; DBH - диаметр ствола, измеренный на уровне груди; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - эмпирические коэффициенты, равные 0.376, 0.996, 0,022 соответственно. Аналогичное уравнение в модели было использовано и для параметризации h_{crown} бука и березы. Значения α_{1-3} были приняты равными 0,548; 0,109; 0,002; соответственно.

Проективная площадь поверхность листы отдельного дерева рассчитывалась в модели как

$$S_{tree} = \beta_1 \cdot DBH^{\beta_2},$$

где β_1, β_2 - эмпирические параметры. Согласно данным Гувера с соавт. [3], S_{tree} ели может быть достаточно точно аппроксимирована при значениях $\beta_1 = 0,134$ и $\beta_2 = 2,163$. Для бука значения $\beta_{1,2}$ равны 0,3073 и 1,803 [7], а для березы $\beta_{1,2} = 0,028$ и 1,430 [1].

Модельный алгоритм для отдельного дерева предполагает, что максимальная плотность фитомассы (LAD) расположена в верхней части кроны. Вертикальный профиль нормализованной LAD ($NLAD$) по суммарному листовому индексу (LAI) дерева при этом хорошо описывается следующим уравнением:

$$NLAD = \frac{\pi}{2 \cdot h_{crown}} \cdot \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot z_{crown}}{h_{crown}}\right) - \frac{1}{2} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot z_{crown}}{h_{crown}}\right) \right)$$

где h_{crown} - высота кроны и z_{crown} - расстояние между некоторой высотой в пределах кроны и высотой крепления кроны. Сходное уравнение используется также и для описания вертикального профиля диаметра кроны. При моделировании LAD в пределах участка кроны предполагается, что LAD увеличивается по направлению от ствола к краям кроны. Минимальная LAD наблюдается в северной части кроны, и максимальная - в ее южной части.

Для модельных расчетов в рамках данного исследования было принято, что диаметр кроны ели в исследуемом ельнике составляет 6 м., а диаметр кроны бука в древостое, примыкающем к исследуемой вырубке с юго-восточной стороны - 10 м. (рис. 1). Средняя высота деревьев в древостоях - 34 м.

Алгоритм для описания солнечной радиации в модели 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 смоделированное 3D распределение фитомассы растительности совмещается с топографической картой местности.

Расчет прямой солнечной радиации внутри полога растительности основан на оценке вероятности (P_0) проникновения прямого солнечного луча в некоторую точку внутри растительности без рассеяния листвой [5]:

$$P_0(\mu) = \exp\left(-\frac{G(\mu_s) \cdot PAI}{\cos(\mu_s)}\right)$$

где μ_s - зенитный угол солнца и G is - косинус среднего угла между направлением на солнце и нормалью, проведенной от поверхности листа.

Для сферического распределения листьев, G не зависит от μ_s и равна 0,5.

Рассеянная солнечная радиация внутри полога рассчитывается с учетом рассеянной солнечной радиации, проникающей внутрь растительности через просветы в кроне деревьев от различных участков небосвода, а также прямой и рассеянной радиации, рассеянной листьями, ветвями и стволами деревьев.

Используя приближение об однородной яркости небосвода, вероятность проникновения рассеянной радиации внутрь полога (P_D) может быть рассчитана через вероятности проникновения прямых лучей (P_0) от различных точек небосвода как

$$P_D = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} P_0 \cdot \cos(\mu) \cdot \sin(\mu) \cdot d\mu.$$

Учитывая значения P_0 и P_D , суммарная радиация (Q) в некоторой точке полога растительности (x, y, z) может быть рассчитана как

$$Q(x, y, z) = S(x, y, z) + D(x, y, z) = S_0 \cdot P_0(x, y, z) + D_0 \cdot P_D(x, y, z) + Q_D(x, y, z)$$

где x, y и z - пространственные координаты, $S(x, y, z)$ и $D(x, y, z)$ - прямая и рассеянная солнечная радиация, поступившая к точке (x, y, z) без рассеяния фитоэлементами через просветы вышележащих ярусов растительности, $Q_D(x, y, z)$ - приходящая солнечная радиация в точке (x, y, z) рассеянная листьями, ветвями и корой деревьев вышележащих ярусов.

Полусферическое отражение и рассеяние солнечной радиации в видимом (PAR) и ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах рассчитываются для каждой ячейки внутри полога растительности с использованием двухпоточкового приближения [2, 6], учитывающего локальные значения LAD , а также оптические спектральные свойства фитоэлементов. Суммарный поток радиации для каждой ячейки внутри растительности рассчитывается от верхнего к нижнему слою растительности с помощью пошагового алгоритма.

МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Микроклиматические исследования на вырубке в Золлинге проводились в 2005-2006 гг. с помощью 5 мобильных метеостанций. Одна метеостанция была расположена в центре вырубки, а остальные - на расстоянии 10-15 м. от северо-западной (NW), северо-восточной (NE), юго-западной (SW) и юго-восточной (SE) границ леса (рис. 1). Дополнительная контрольная метеостанция располагалась внутри полога леса на расстоянии около 150 м. к северо-западу от вырубки. На каждой станции проводились измерения сум-

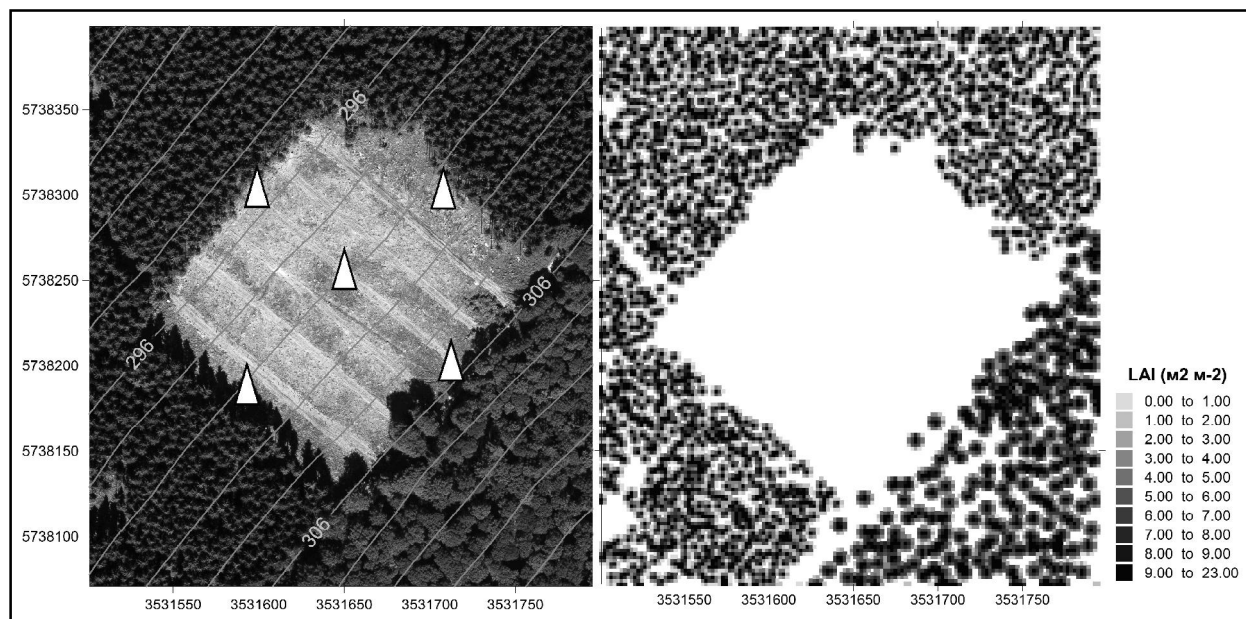


Рис. 1. Аэрофотоснимок исследуемой экосистемы и смоделированное распределение листового индекса (LAI) в древостое вокруг вырубке. Белые треугольники отмечают положение метеостанций на вырубке

марной солнечной радиации, температуры и влажности воздуха, количества осадков, скорости и направления ветра на высоте 2 м. над поверхностью почвы. Кроме того, на станциях измерялась температура почвы на глубине 10 и 20 см. Измерения проводились синхронно с частотой 1 секунда и усреднялись за 5-минутные интервалы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для описания пространственной и временной изменчивости солнечной радиации на вырубке и внутри окружающего вырубку древостоя, а также для проверки модели по экспериментальным данным, был выбран тестовый период с июня по август 2005 г. Метеорологические условия в течение этого периода отличались значительной изменчивостью, что позволило оценить чувствительность модели не только к изменению высоты солнца, но также и к изменению соотношения прямой и рассеянной радиации в падающем потоке.

Для проверки модели использовались данные измерений радиации на 4 станциях, расположенных в различных частях вырубке, а также измерения на контрольной станции внутри леса. Сравнение смоделированных и измеренных значений проводилось как для среднечасовых, так и для среднесуточных значений радиации.

Результаты выполненных модельных и экспериментальных исследований показывают, что сплошная рубка оказывает значительное влияние на радиационный режим лесной экосистемы

(рис. 2). Максимальные значения радиации, приходящей к земной поверхности, за исследуемый трехмесячный период были получены в центральной и северо-западной частях вырубке и достигали 1300-1450 МДж м⁻². Приходящая радиация в южной и юго-восточной части вырубке была значительно ниже и изменялась в пределах от 800 до 1200 МДж м⁻². Внутри полога леса солнечная радиация не превышала 180-240 МДж м⁻².

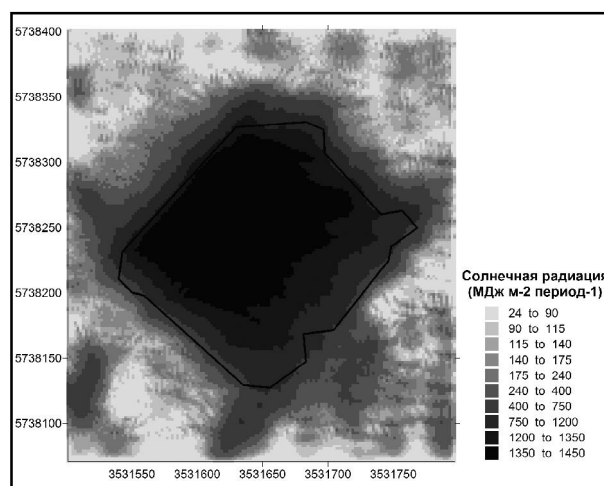


Рис. 2. Смоделированная суммарная солнечная радиация на уровне земной поверхности для исследуемой вырубке и окружающего древостоя в период с 01.06 по 31.08.2005 г. Черная линия отмечает условную границу вырубке и окружающего ее древостоя

Суточная динамика солнечной радиации, приходящей на различные участки вырубке, в значительной степени определялась соотношением

в падающем потоке прямой и рассеянной радиацией, а также затенением вырубki окружающими деревьями. В дни с преобладанием рассеянной радиации в суммарном потоке распределение радиации на вырубке было довольно одно-

родным. С другой стороны, в безоблачные солнечные дни неоднородность распределения солнечной радиации в пределах вырубki была максимальной в основном за счет затенения участков вырубki окружающими деревьями.

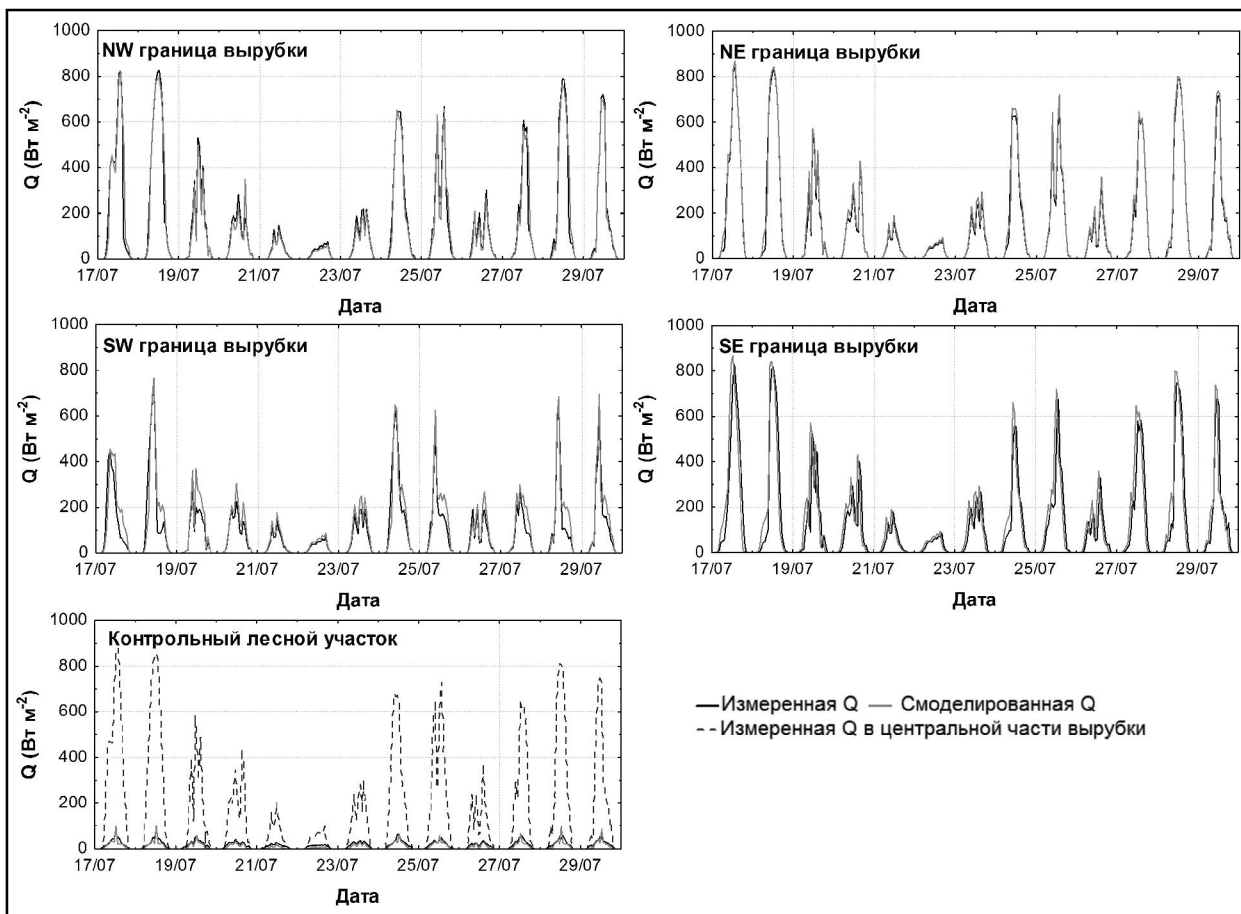


Рис. 3. Сравнение смоделированной и измеренной солнечной радиации (Q) на краях исследуемой вырубki (NE, NW, SW и SE), а также на контрольном лесном участке для периода с 17.07 по 31.07.2005 г.

Сравнение результатов модельных расчетов среднесуточных и среднечасовых значений 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 (рис. 3).

Наилучшее соответствие между смоделированными и измеренными значениями солнечной радиации было получено для северо-восточных и северо-западных участков вырубki, где коэффициент детерминации r^2 для среднесуточных значений достигал 0,99. Значения r^2 для среднечасовых значений солнечной радиации на NE и NW границах вырубki составляли 0,99 и 0,96 соответственно (рис. 3). На юго-восточной и юго-западных границах вырубki значения r^2 были несколько ниже и не превышали 0,92 для среднечасовых и 0,98 и 0,97 для среднесуточных значе-

ний соответственно. Коэффициент детерминации между смоделированными и измеренными значениями на контрольной станции, расположенной под пологом леса, был около 0,79.

Более низкие значения r^2 между смоделированными и измеренными значениями на SE и SW участках, и особенно на контрольном участке, могут быть объяснены значительной неоднородностью поля прямой солнечной радиации, проникающей сквозь кроны деревьев в древостое и на опушках. Очевидно, что структура растительного покрова, и в частности крон отдельных деревьев, генерируемая моделью несколько отличается от реальной структуры древостоя. Разработанная модель использует осредненные значения LAD внутри отдельной модельной ячейки (2 м × 2 м × 1 м), в то время как в реальном покрове фитомасса деревьев распределена в пределах модельной ячейки крайне неоднородно. Подобные различия в распределении фитомас-

сы в реальном и модельном древостое, очевидно, могут привести к занижению смоделированной вероятности проникновения прямых солнечных лучей внутрь растительного покрова без рассеяния, а также к занижению модельных оценок поглощения и рассеяния солнечной радиации фитомассой деревьев внутри модельной ячейки.

Другое возможное объяснение полученных различий связано с методикой измерений солнечной радиации под пологом растительности и на вырубке, использованной в рамках данного исследования. Учитывая, что за счет ажурности крон поля солнечной радиации под пологом растительности отличаются значительной неоднородностью, точечные измерения солнечной радиации, проводимые с помощью единичного датчика радиации, не могут достаточно достоверно описать поле радиации внутри достаточно большой модельной ячейки (2 × 2 м). Кроме того, необходимо учитывать также и различия во временном разрешении модели (1 час) и полевых измерений (часовое осреднение 5-минутных значений). Подобные различия могут оказывать существенное влияние на суммы приходящей радиации, особенно на границе между освещенной частью земной поверхности и поверхностью, затененной окружающими деревьями, за счет изменения часового угла солнца и высоты солнца над горизонтом.

Возможным решением данной проблемы может служить уменьшение пространственного разрешения модели, например, до размеров ячейки (1 × 1 × 1 м), а также уменьшение шага по времени. Однако надо учитывать, что подобные изменения могут вызвать значительное замедление процедуры расчета по модели.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Биологические ресурсы России: Фундаментальные основы рационально-

го использования» (грант П.4.8), гранта РФФИ (№ 08-04-01254-а) и гранта Научного Немецкого Общества, DFG (Gr 738/16-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bugmann H.K.M.* On the ecology of mountainous forests in a changing climate: A simulation study // 1994 PhD Thesis 10638, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, Switzerland
2. *Dickinson R.E.* Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance // *Advances in Geophysics* 1983. V. 25. P. 305-353.
3. *Gower S.T., Reich P.B., Son Y.* Canopy dynamics and aboveground production of five tree species with different leaf longevities // *Tree Physiol.* 1993. V. 12. P. 327-345
4. *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
5. *Myneni R.B., Ross J., Asrar G.* A review on the theory of photon transport in leaf canopies // *Agric. For. Meteorol.* 1989. 45. P. 1-153
6. *Pinty B., Lavergne T., Dickinson R.E. et al.* Simplifying the interaction of land surfaces with radiation for relating remote sensing products to climate models // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, D02116.
7. *Pretzsch H., Biber P., Dursky J.* The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation // *For. Ecol. Management* 2002. V. 162. P. 3-21
8. *Prskawetz M., Lexer M.J.* Evaluierung des Li-Cor LAI-2000 zur Ermittlung des Blattflaechenindex in Buchenjungbestanden // *Allg. Forst Jagdzeit.* 2000. V. 171. P. 185-191.
9. *Widowski J.-L., Verstraete M.M., Pinty B., Gobron N.* Allometric relationships of selected European tree species // *Rep. EUR 20855 EN, Joint Res. Cent., Ispra, Italy,* 2003.

APPLICATION OF THREE-DIMENSIONAL MODEL TO DESCRIBE EFFECT OF CLEAR-CUTTING ON RADIATION REGIME OF O FOREST ECOSYSTEM

© 2009 A.V. Olchev¹, K. Radler²

¹ A.N. Severtzov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Science Moscow

² Department of Bioclimatology, Buesgen Institute, Georg-August University, Germany, Goettingen

Three-dimensional model Mixfor-3D is developed to describe radiation regime of uneven-age forest stands. Horizontal resolution of the model - 2 m × 2 m, vertical resolution - 1 m, time step - 1 hour. It was applied to describe the impact of a clear-cutting on radiation regime within the framework of European project focused on study of forest ecosystem dynamics and regeneration of forest recourses. Comparisons of results of modeling experiments with field measurements show, the developed model allows describing adequately the spatial and temporal variability of solar radiation pattern under different light conditions both within the forest stand and in the clear-cut area. The model can be used to solve different theoretical and applied tasks.

Keywords: *three-dimensional model, a radiating mode, a wood ecosystem, continuous cutting down.*

УДК 551.583:63(470+570)

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ АГРОСФЕРЫ РОССИИ: МЕТОДОЛОГИЯ, МОДЕЛИ, РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

© 2009 В.Н. Павлова

Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии,
г. Обнинск; e-mail: vnp2003@bk.ru

Обсуждаются подходы к решению проблемы оценки влияния изменений климата на продуктивность агроэкосистем - динамические модели ПОГОДА-УРОЖАЙ, разностные уравнения регрессии, метод агроклиматических аналогов. Анализируются рассчитанные климатообусловленные тренды урожайности важнейших сельскохозяйственных культур на территории России за период 1975-2006 гг. Показано, что элиминирование трендов урожайности разностными уравнениями регрессии позволяет значительно повысить точность и надежность оценок влияния изменений (колебаний) климата на продуктивность.

Ключевые слова: *изменения климата, климатические сценарии, био(агро)сфера, урожайность, продуктивность экосистем*

ВВЕДЕНИЕ

Последние обобщения, изложенные в Четвертом оценочном докладе ИРСС и в Оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории РФ [1, 2], свидетельствуют, что с 70-х годов XX в. началась эпоха беспрецедентно быстрых антропогенных изменений климата.

По оценкам ИРСС среднегодовая глобальная температура за весь XX в. повысилась на $0,6 \pm 0,2$ град. С, а на территории РФ соответствующие изменения климата составили 1,0-1,2 град. С. В ходе глобального потепления фактически после 1976 г. наблюдался монотонный рост глобальной и полушарной температур в масштабе десятилетий. Линейный тренд температуры воздуха за период 1976-2007 г. составил $+0,18$ град. С/10 лет для Земного шара, $+0,23$ град. С/10 лет для Северного полушария, $+0,48$ град. С/10 лет для территории России. Из 10 лет, самых теплых для Северного полушария, 8 наблюдались в последнем десятилетии [3].

Производство зерна в России и ее продовольственная безопасность в значительной мере зависят от климатических факторов. Так, колебания валового сбора зерновых и зернобобовых за последние 10 лет весьма значительны – от 55 млн. т. в 1999 г. до 108 млн. т. в 2008 г. Оценка влияния изменений климата на агроэкосистемы и зависящие от них результаты хозяйственной деятельности представляется актуальной и достаточно сложной задачей, методы решения которой еще только разрабатываются. Представить существующие методы получения таких оценок и с их помощью оценить влияние наблюдаемых

и ожидаемых изменений на агроклиматические ресурсы России – основная цель настоящей публикации.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМ

Основу системы КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ, разработанной во ВНИИСХМ [4], составляют динамические модели продуктивности сельскохозяйственных культур с суточным шагом по времени. Модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих ростовой, влажностный и азотный режимы в системе почва-растение-атмосфера. Имитационная система КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ может работать в ретроспективном режиме (оценка динамики агроклиматических условий за прошедшее столетие); оперативном (прогнозирование урожайности в текущем году, расчет влагозапасов почвы под различными культурами, испарения и других агрометеорологических показателей); прогностическом (оценка влияния текущих и ожидаемых изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных культур).

Рассмотрим прогностический режим работы системы. В табл. 1 представлены детальные данные о возможных изменениях агроклиматических условий европейской территории России (ЕТР) к 2030 г. при реализации климатического сценария HadCM3 (A1FI). При реализации этого сценария ожидается существенный рост как зимней, так и летней температуры воздуха – на 3,7-3,8 град. к 2030 г. Континентальность климата

при этом практически не изменится. Рост содержания CO₂ в атмосфере к 2030 г. по этому сценарию составит 29%. Увеличение расходной части водного баланса (испарения) за теплый период года значительно превысит рост осадков. Увеличение испаряемости приведет к значительному росту дефицита испарения (разности между потенциальным PE и фактическим AE испарением). Повсеместное падение величин гидротермического коэффициента (ГТК) может свиде-

тельствовать об увеличении повторяемости засух на ЕТР к 2030 г. Этот процесс будет сопровождаться уменьшением влагозапасов почвы в теплый период года (см. табл. 1). Однако ожидаемое уменьшение влагозапасов не затронет, по видимому, засушливых районов Поволжья, о чем свидетельствует некоторый рост минимальных в среднемноголетнем разрезе июльских влагозапасов почвы в этом регионе.

Таблица 1. Изменения агроклиматических условий на ЕТ России к 2030 г. (отклонения от условий последнего десятилетия XX века) при реализации сценария A1FI (климатическая модель HadCM3, Hadly Center)

Регион	Агроклиматические показатели								
	Средняя температура, °С		Сумма среднесуточных температур выше 10 °С	Длина вегетационного периода, сут.	Сумма осадков за год, мм	Испарение, мм		ГТК	Влагозапасы почвы в июле, мм
	июль	январь				AE	PE		
Северный	3,2	4,3	684	29	46	94	198	-0,42	-29
Северо-Западный	3,0	3,9	724	31	88	136	206	-0,28	-26
Калининградский	2,8	3,2	806	39	85	102	206	-0,34	-45
Центральный	3,4	3,9	748	29	48	43	157	-0,32	-25
Волго-Вятский	3,6	4,1	719	25	32	40	158	-0,22	-17
Центр.- Черноземный	3,9	3,9	841	27	53	6	104	-0,28	-10
Поволжский, север	3,9	3,9	788	24	30	12	104	-0,25	3
Поволжский, юг	3,8	3,8	837	22	36	15	74	-0,13	3
Северо-Кавказский	4,1	3,4	913	26	26	20	73	-0,11	-6
Уральский	3,9	3,8	759	24	21	34	165	-0,28	-15
ЕТ России	3,7	3,8	778	26	37	40	141	-0,25	-14

Примечание: AE и PE - фактическое и потенциальное испарение, соответственно; ГТК - гидротермический коэффициент Селянинова

Рассмотренный сценарий изменений климата для ЕТР можно охарактеризовать как сценарий потепления аридного типа. Сценарии такого типа неблагоприятны для сельского хозяйства РФ. Расчеты показывают, что при реализации такого сценария как HadCM3/A1FI, уже к 2030 г. можно ожидать падения климатообусловленной урожайности зерновых культур до 26 % на Северном Кавказе и до 14-19% - на севере Поволжья, в ЦЧО и на Урале (см. табл. 2). При этих сценариях (в отличие от сценариев потепления гумидного типа) в будущем не ожидается заметного климатообусловленного роста урожайности в целом на ЕТР. Дефицит производства зерна в РФ будет только расти и к 2050 г. достигнет 16-17%.

В то же время расчеты в рамках системы КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ показывают, что при реализации благоприятного для сельского хозяйства России гумидного сценария потепления (сценарий GFDL) следует ожидать роста урожайности, по крайней мере, до середины текущего столетия. При этом урожайность зерновых на территории Нечерноземной зоны превысит современную на 11-29%, тогда как урожай-

ность на территории Черноземной зоны будет ниже современного уровня на 10-13%, т.е. ожидается перераспределение величин урожайности в пользу Нечерноземной зоны. Можно ожидать, что на юге Сибири урожайность зерновых культур снизится на 20-25% при сохранении современного уровня земледелия.

РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ

Для решения задачи оценки и прогноза последствий изменений климата на урожайность сельскохозяйственных культур, как показано выше, предложена физически обоснованная система дифференциальных уравнений, реализованная в виде динамических моделей КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ, 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

Таблица 2. Динамика урожайности сельскохозяйственных культур (отклонения от современного уровня, %) при реализации сценариев HadCM3/ A1FI

Регион	Зерновые культуры				Кормовые культуры			
	Период прогнозирования, годы							
	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Северный	7.1	6.6	6.3	9.1	6.0	14.5	18.4	17.9
Северо-Западный	7.9	8.2	10.5	9.2	13.3	17.4	21.6	22.9
Калининградский	4	13	12	4	7.0	11.0	12.0	8.0
Центральный	-0.8	0.2	-1.3	-6.7	3.4	5.0	4.6	-0.7
Волго-Вятский	-6.8	-5.2	-8.2	-13	2.8	4.1	3.2	-0.9
Центр.-Черноземный	-14.1	-19.1	-26.9	-34	-7.5	-12.4	-19.3	-24.9
Поволжье, север	-13.3	-13.9	-27.4	-40	-2.6	-4.1	-9.6	-22.9
Поволжье, юг	-1.3	2.2	1	3.1	-8.7	-9.0	-11.5	-12.5
Северный Кавказ	-23.8	-26.4	-25.9	-19	-14.4	-17.1	-21.3	-24.9
Уральский	-15.9	-19	-26.4	-32	-0.4	0.5	-1.5	-10.1
ЕТ России	-8.6	-9.3	-13.2	-17	-1.0	-0.4	-2.1	-7.4

приращения урожайности (ΔY) от приращения метеорологических факторов – температуры (ΔT) и сумм осадков (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), показывают, что по меньшей мере 29% междугодовой изменчивости урожайности шести важнейших мировых продовольственных культур могут быть объяснены изменениями выбранных предикторов - минимальной и максимальной температуры воздуха и суммой выпавших осадков, осредненных за вегетационный период [5].

Рассмотрим возможность применения методологии разностного подхода к построению функционалов ПОГОДА-УРОЖАЙ и оценим климатообусловленные тренды урожайности основных сельскохозяйственных культур для тер-

ритории России.

Эффективность перехода от классических уравнений множественной регрессии к уравнениям, представленным в виде первых разностей, можно оценить по данным табл. 3. Оценки коэффициентов корреляции (R) уравнений множественной регрессии для расчета среднеобластной урожайности зерновых культур для областей Центрально-Черноземного и южного регионов с большими посевными площадями зерновых рассчитывались за период с 1975 по 2006 гг. ($n = 32$). Предикторы уравнения регрессии - среднемесячные данные по температуре воздуха (T_5 , T_6) и суммы осадков (P_5 , P_6) в мае и июне. Так, для зерновых и зернобобовых культур переход к разностной форме уравнений повышает учитываемую долю дисперсии ряда урожайности (R^2) на 21,4%, для озимой пшеницы – на 11,3%.

В табл. 4 и 5 представлены рассчитанные

Таблица 3. Оценки коэффициентов корреляции (R) уравнений множественной регрессии для расчета среднеобластной урожайности основных сельскохозяйственных культур по температуре и осадкам за май и июнь

Область, край	R					
	Зерновые и зернобобовые в целом		Озимая пшеница		Яровой ячмень	
	I	II	I	II	I	II
Белгородская	0.679	0.745	0.577	0.566	0.647	0.739
Воронежская	0.736	0.828	0.632	0.732	0.710	0.837
Курская	0.410	0.622	0.382	0.420	0.434	0.727
Липецкая	0.455	0.735	0.519	0.659	0.420	0.627
Орловская	0.372	0.691	0.442	0.647	0.423	0.768
Тамбовская	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

Примечание: * I - классическое уравнение регрессии, II - уравнение для первых разностей.

согласно уравнению (1) количественные оценки приращений продуктивности зерновых и пропашных культур, вызванные изменениями климата за последние три десятилетия. В основных зерновых регионах, в Приволжском и Южном ФО, климатообусловленный прирост урожайности зерновых и зернобобовых в среднем составил 2,4% за 10 лет. Таким образом, только наблюдаемые изменения климатических условий за последние 30 лет привели к росту урожайности зерновых и

зернобобовых культур в этих регионах на 7,2%. В то же время к неблагоприятным воздействиям климата последних десятилетий можно отнести падение урожайности зерновых на Дальнем Востоке (-5,7%) и в Центральном регионе (-0,9%). Следует отметить, что реакция урожайности озимой пшеницы на наблюдаемые изменения климата положительна на всей территории ее возделывания, и в Приволжском ФО достигает величины 8,4%.

Таблица 4. Климатообусловленные приращения урожайности зерновых культур по федеральным округам России за период с 1975-2006 гг.

Федеральный округ	Зерновые и зернобобовые в целом	Озимая пшеница	Яровой ячмень	Зерновые и зернобобовые в целом	Озимая пшеница	Яровой ячмень
Приволжский	0,32	0,47	0,26	2,6	2,8	2,1
Южный	0,30	0,36	0,44	2,2	2,0	3,2
Центральный	- 0,02	0,06	- 0,02	-0,3	0,4	-0,2
Сибирский	0,16	-	0,19	1,6	-	2,0
Дальневосточный	0,21	-	-0,08	-1,9	-	-0,7
Уральский	0,23	-	0,15	1,7	-	1,1

Как показывают расчеты, климатообусловленная урожайность подсолнечника и сахарной свеклы также выросла за последние десятилетия (см. табл. 5), однако 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.

МЕТОД АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ

Только модельный подход не позволяет полностью решить задачу прогноза влияния изменений климата на продуктивность и устойчивость сельского хозяйства, поскольку многие его аспекты (экономические, экологические и социальные) не охватываются известными моделями. Эффективным средством исследования может оказаться метод нахождения пространственных или временных аналогов агроклиматических условий произрастания сельскохозяйственных культур для временных отрезков вегетационного периода, которые важны для роста и развития данной группы растений.

Набор показателей для выбора агроклиматических аналогов может включать любое число параметров, характеризующих теплообеспеченность, влагообеспеченность и условия перезимовки озимых. Например, температура воздуха

Таблица 5. Климатообусловленные тренды урожайности для пропашных технических культур (ц/га за 10 лет) и коэффициенты детерминации R^2 за 1990-2006 гг.

С/х культура	Центральный нечерноземный	Центральный черноземный	Приволжский	Южный
Подсолнечник	1.32 ($R^2=0.56$)	0.29 ($R^2=0.29$)	0.35 ($R^2=0.24$)	0.37 ($R^2=0.34$)
Сахарная свекла	-	6.00 ($R^2=0.36$)	5.32 ($R^2=0.33$)	7.78 ($R^2=0.41$)

самого теплого и самого холодного месяца года, сумма среднесуточных величин температуры воздуха за период с температурой выше 10 С, гидрометеорологический показатель засухи (дефицит испарения) А.И. Будаговского, гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова, сумма выпавших осадков по сезонам и за выбранный промежуток времени, весенние запасы почвенной влаги и другие показатели. В качестве показателя меры близости агроклиматических условий может быть принята суммарная относительная ошибка по модулю [6]

$$K^{ij} = \sum_{p=1}^n \left| \frac{x_p^i - x_p^j}{x_p^i} \right| \alpha_p,$$

где x_p – вектор агроклиматических параметров, i – номер района, для которого определяется аналог, j – номер аналога, α_p – нормированные ве-

совые коэффициенты (оптимизируемый параметр), $(\sum_{p=1}^n \alpha_p = 1)$, n – размерность вектора агроклиматических параметров.

Ниже приведены агроклиматические аналоги для ряда областей черноземной зоны ЕТР при реализации сценария GFDL к середине XXI в. Для оценки продуктивности климата и его изменений в данном варианте расчета использован биоклиматический потенциал (БКП) при достаточном

минеральном питании.

Комплексный подход, сочетающий использование метода агроклиматических аналогов и динамических моделей КЛИМАТ–ПОЧВА–УРОЖАЙ, позволяет сделать вывод об ожидаемом росте климатообусловленной продуктивности сельского хозяйства областей черноземного центра ЕТР при реализации климатического сценария GFDL (см. табл. 6) - рост биоклиматического потенциала может достигать 30%.

Таблица 6. Аналоги агроклиматических условий ряда областей Центрально-Черноземной зоны РФ при изменении климата по сценарию GFDL к 2040 г.

Область	Прогнозируемые условия на 2040 г.			Агроклиматический аналог к 2040 г.	Относительная ошибка, K^{ij}	БКП, ц/га	Изменение БКП, % к сред. за 1980-2000 гг.
	$\sum T$, град	ΔE , мм	T_{min} , град.				
Липецкая	3007	371	-8,2	Белгородская	4,0	12,5	9
Тамбовская	3010	417	-9,5	Белгородская	3,6	12,3	11
Курская	2971	309	-6,9	Киевская	3,7	14,1	6
Белгородская	3236	453	-6,9	Полтавская	3,4	13,6	-1
Воронежская	3261	537	-7,8	Ровенская	2,4	11,7	30
Татария	2547	397	-11,6	Тамбовская	1,3	11,7	5
Пензенская	2733	399	-10,4	Тамбовская	2,5	11,9	3
Ульяновская	2724	446	-8,6	Белгородская	1,5	10,8	25

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наблюдаемые с 70-х годов XX в. изменения климатических условий следует оценивать как благоприятные для зернового хозяйства России. Увеличение степени аридности климата на территории некоторых регионов земледельческой зоны Сибири, суммарный выход которых в зерновой баланс РФ не превышает 15%, – важнейшее из неблагоприятных последствий наблюдаемых изменений климата.

Расчеты оценок изменения продуктивности агроэкосистем к середине XXI в. по сценарию HadCM3/A1FI можно рассматривать как нижнюю, а по сценарию GFDL – как верхнюю границу оценок.

Оценки влияния климата на продуктивность агроэкосистем будут уточняться за счет использования новых методов анализа, позволяющих элиминировать агротехнические тренды урожайности, использование уточненных и обновленных климатических сценариев, с привлечением фактических данных об урожайности при различных уровнях ведения системы земледелия. В дальнейшем, методы оценки влияния изменений кли-

мата на продуктивность сельского хозяйства будут учитывать климатические тренды эффективного плодородия сельскохозяйственных почв, связанные с изменением приходной и расходной составляющей органического углерода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC Forth Assessment Report. URL: <http://www.ipcc.ch>.
2. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2008.
3. Доклад Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2007 год: ежегод. интернет-издание. 2008. URL: <http://climatechange.su>.
4. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
5. Lobell D.B, Field C.B. Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming // Environ. Res. Lett. 2007. № 2.
6. Сиротенко О.Д., Павлова В.Н. Оценка влияния изменений климата на сельское хозяйство методом пространственно-временных аналогов // Метеорология и гидрология. 2003. № 8.

ESTIMATIONS OF CLIMATE CHANGE IMPACT ON AGROSPHERE PRODUCTIVITY IN RUSSIA: METHODOLOGY, MODELS AND RESULTS

© 2009 V.N. Pavlova

Federal State Institution «All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology»;
e-mail: vnp2003@bk.ru

Approaches to solution of climate changes impact problem on agroecosystem efficiency - dynamic models the WEATHER - CROP, multiple linear regressions with first differences in response and predictor variables, an agroclimatic analogues method are discussed. Designed climate-dependant trends of productivity of the major agricultural crops in Russia territory in 1975-2006 are analyzed. It is shown, that detrending the time productivity series with differences regress equations allows significantly to increase the accuracy and reliability of impact of climate changes on productivity.

Key words: *climate changes, climatic scenarios, bio (agro) sphere, productivity, ecosystem efficiency.*

УДК 574.34:599.735.3

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ И ПОЛОВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОПУЛЯЦИЙ ЛОСЯ (*Alces alces L.*) В РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И ДАННЫХ МНОГОЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА

© 2009 В.Г. Петросян, Н.Н. Дергунова, С.А. Бессонов, К.А. Назарова, А.В. Омельченко

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН,
Москва; e-mail: petrosyan@sevin.ru

Представлены результаты сравнительного анализа динамики численности, половозрастной структуры и плотности лося в России (1961-2005 гг.) и Финляндии (1975-2005 гг.) с использованием разработанной имитационной модели и данных многолетнего мониторинга. Показано, что современные низкие показатели численности лося в России в значительной степени связаны с влиянием естественных (увеличение численности хищников – волка) и антропогенных (браконьерство) факторов.

Ключевые слова: динамика численности, половозрастная структура, имитационная модель, база данных, популяция лося.

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 605 тысяч особей. По данным учета 2007 г. В скандинавских странах на меньшей в 11 раз территории обитает 550-600 тыс. лосей [1, 2]. Ежегодная добыча вида в Феноскандии (Финляндия, Норвегия, Швеция) и России составляет 200-250 тыс. и 15-21 тыс. соответственно [2, 6-10]. 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 [6, 7]. 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 (параметров плодовитости, жизнеспособности, смертности, официального отстрела, истребления хищниками и браконьерами, емкости угодий, доступности корма и др.), 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 один год. Переменные, характеризующие численность лосей в каждой из этих групп, формируют вектор состояния системы (популяции):

$$X = (X_{1,1}, X_{1,2}, X_{2,1}, X_{2,2}, \dots, X_{18,1}, X_{18,2}),$$

где $X_{i,1}$ и $X_{i,2}$ – численность самцов и самок соответственно в i -й возрастной группе. В начальный момент времени моделирования ($t = 0$) половозрастная структура определяется на основе литературных данных [11-23]. В модели предусмотрены возможности выбора параметров половозрастной структуры популяции по усмотрению пользователя (или на основе данных учетов при их наличии) в начальный момент $t = 0$. Далее определяется численность особей в последующий момент времени $t + 1$. В модели учитываются следующие параметры: 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.) дифференцировано для различных возрастных групп; параметры, учитывающие неофициальный отстрел животных и естественную смертность и др.

Рекуррентное соотношение, позволяющее определить количество особей для возрастных групп, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} X_{1,1}^{t+1} &= \beta \cdot (N_1 \xi_1 p \chi_1 + N_2 \xi_2 p \chi_2 + N_3 \xi_3 p \chi_3); \\ X_{1,2}^{t+1} &= \beta \cdot (N_1 \xi_1 (1-p) \chi_1 + N_2 \xi_2 (1-p) \chi_2 + N_3 \xi_3 (1-p) \chi_3); \\ X_{2,1}^{t+1} &= X_{1,1}^t \alpha_{1,1} - X_{1,1}^t \gamma_{1,1} - X_{1,1}^t \Delta_{1,1}; \\ X_{2,2}^{t+1} &= X_{1,2}^t \alpha_{1,2} - X_{1,2}^t \gamma_{1,2} - X_{1,2}^t \Delta_{1,2}; \\ X_{3,1}^{t+1} &= X_{2,1}^t \alpha_{2,1} - X_{2,1}^t \gamma_{2,1} - X_{2,1}^t \omega_{2,1} - X_{2,1}^t \Delta_{2,1}; \\ X_{3,2}^{t+1} &= X_{2,2}^t \alpha_{2,2} - X_{2,2}^t \gamma_{2,2} - X_{2,2}^t \omega_{2,2} - X_{2,2}^t \Delta_{2,2}; \\ X_{4,1}^{t+1} &= X_{3,1}^t \alpha_{3,1} - X_{3,1}^t \gamma_{3,1} - X_{3,1}^t \omega_{3,1} - X_{3,1}^t \Delta_{3,1}; \\ X_{4,2}^{t+1} &= X_{3,2}^t \alpha_{3,2} - X_{3,2}^t \gamma_{3,2} - X_{3,2}^t \omega_{3,2} - X_{3,2}^t \Delta_{3,2}; \end{aligned}$$

$$\dots\dots\dots$$

$$\begin{aligned} X_{18,1}^{t+1} &= X_{17,1}^t \alpha_{17,1} - X_{17,1}^t \gamma_{17,1} - X_{17,1}^t \omega_{17,1} - X_{17,1}^t \Delta_{17,1}; \\ X_{18,2}^{t+1} &= X_{17,2}^t \alpha_{17,2} - X_{17,2}^t \gamma_{17,2} - X_{17,2}^t \omega_{17,2} - X_{17,2}^t \Delta_{18,2}; \\ N_1 &= \min(S_1, S_{\min} \cdot a); N_2 = \min(S_2, S_{\min} \cdot b); N_3 = \min(S_3, S_{\min} \cdot c); \end{aligned}$$

$$S_{\min} = \min\left(\sum_{i=4}^{18} X_{i,1}^t, \sum_{i=4}^{18} X_{i,2}^t\right);$$

$$S_1 = \sum_{i=3}^8 X_{i,2}^t; \quad S_2 = \sum_{i=9}^{12} X_{i,2}^t; \quad S_3 = \sum_{i=13}^{18} X_{i,2}^t;$$

$$a = \frac{S_1}{S_1 + S_2 + S_3}; \quad b = \frac{S_2}{S_1 + S_2 + S_3}; \quad c = \frac{S_3}{S_1 + S_2 + S_3};$$

где $a_{i,j}$ - коэффициент выживаемости, т.е. перехода особей из одной возрастной группы в другую с учетом естественной смертности ($i = 1, 2 \dots 18; j = 1, 2$). На основе литературных данных установлено, что значения $a_{i,j}$ ($a_{i,1} = a_{i,2}$) могут быть представлены с помощью зависимостей $\alpha_i = 1 \cdot 10^{-5} i^3 - 0.0022 i^2 + 0.0262 i + 0.9171$. Коэффициент $\beta = \beta(N, S, t)$ - показатель плодовитости животных, который определяется в зависимости от N, S, t ; где N - общая численность животных в момент времени t , S - площадь обитания животных, га. В модели β определяется из следующе-

го условия: $\frac{1000 * \sum_{i=1}^{18} \sum_{j=1}^2 X_{i,j}^t}{S} \leq \rho_{omn}$; т.е. если в момент времени t выполняется это неравенство, то величина β будет изменяться во времени согласно следующим значениям: $\beta_{t+1} = 0,8; \beta_{t+2} = 0,5; \beta_{t+3} = 0,4; \beta_{t+4} = 0,8$ (где ρ_{omn} - допустимая плотность животных, экз. на 1000 га). Это условие обеспечивает ограничение плотности животных при значительном росте их численности на данной территории. Переменная γ_{ij} - коэффициент жизнеспособности особей в зависимости от плотности животных и возрастной группы ($i = 1, 2 \dots 18; j = 1, 2$), которая определяется с помощью соотношения

$$\gamma_i = 7 \cdot 10^{-6} i^4 - 0,0002 i^3 + 0,0031 i^2 - 0,0226 i + 0,0598;$$

$\omega_{i,j}$ - переменная, характеризующая неофициальное изъятие животных ($i = 3, 4 \dots 18; j = 1, 2$);

$\Delta_{i,j}$ - переменные, характеризующие изъятия животных хищниками ($i = 2, 3, 4 \dots 18; j = 1, 2$), p - половое соотношение новорожденных особей;

ξ_i - случайная величина, определяющая количество эмбрионов на стельную самку ($i = 1 \dots 3$);

χ_i - доля стельных самок ($i = 1 \dots 3$).

Численные эксперименты проводились с использованием созданной базы данных охотничье-промысловых видов России на основе многолетних данных мониторинга (1981-2005 гг.) [8-10]. База данных создавалась сотрудниками ИПЭЭ РАН и Центрохозконтроля России в 2003-2009 гг. Данные учета численности Финской популяции лося брались из литературных источников [7].

Количество генераций, необходимых для получения значения показателей половозрастной структуры популяций лося, определялось помощью методов, представленных в работе [24].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Один из важных этапов использования разработанной модели - верификация параметров модели и проверка адекватности полученных результатов. В связи с тем, что многие параметры модели априори не известны, поэтому для подбора наилучшего варианта реализаций динамики численности значения параметров брались из наперед заданного допустимого интервала. Полученные случайные реализации сравнивались с данными мониторинга численности животных на основе метода наименьших квадратов (МНК), т.е. подбирались такие параметры модели, которые приводили к динамике численности лося, близкой к данным мониторинга. После анализа случайных генераций и оценки параметров адекватности была выбрана модельная реализация с точностью 90-92%. Результаты оценок динамики численности и половозрастной структуры лося на основе имитационной модели представлены на рис. 1 и 2.

Оценки, полученные с помощью имитационной модели 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% (см. рис. 2).

Из оценок следует, 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

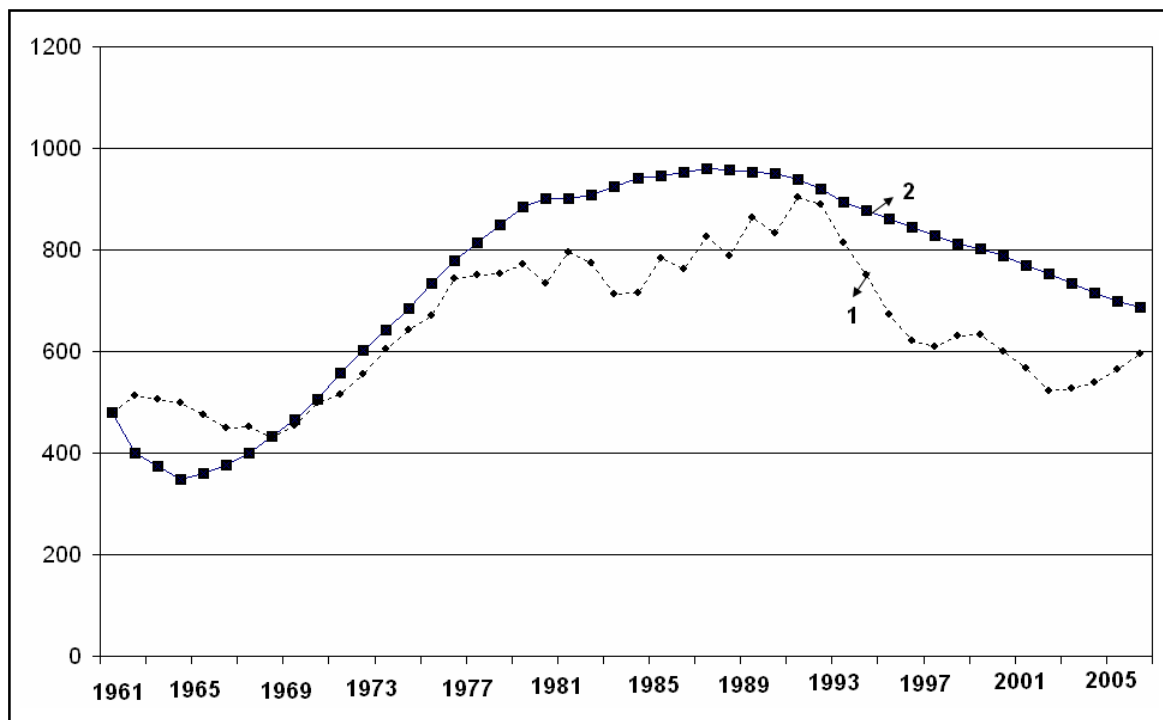


Рис. 1. Динамика численности лося в России: (1 - данные мониторинга, 2 - модельные оценки; по оси X - годы мониторинга, по оси Y - численность лосей в России, тысяч особей)

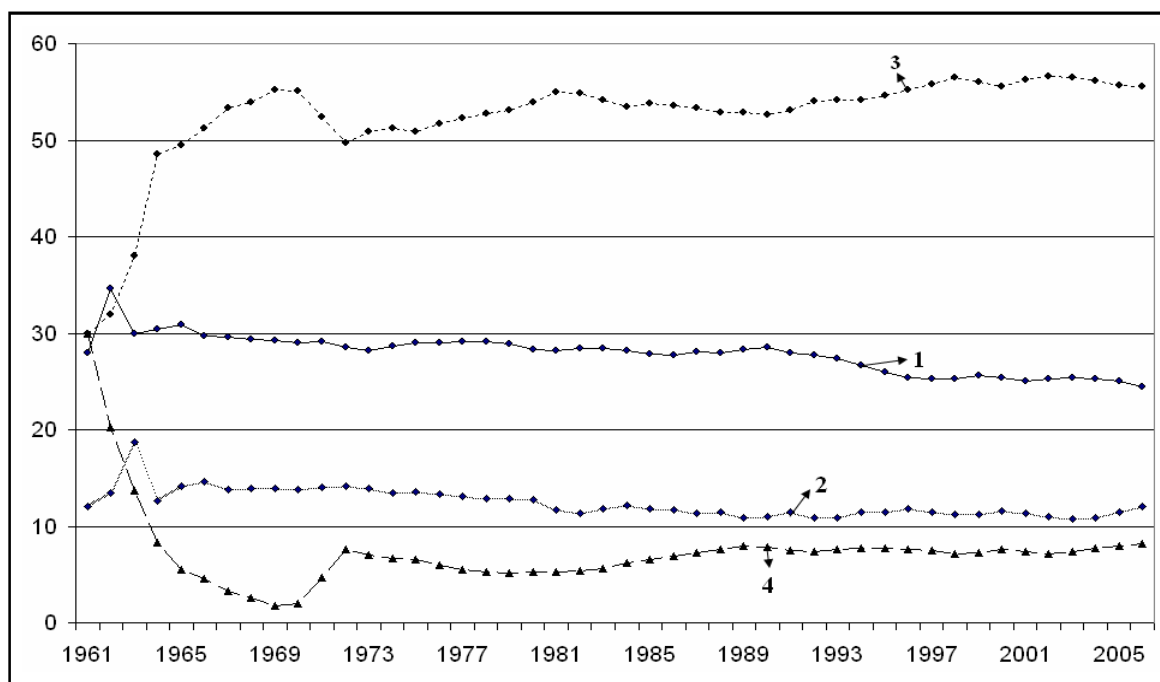


Рис. 2. Модельная оценка возрастной структуры лося в 1961-2005 гг.: (1 - новорожденные, 2 - сеголетки, 3 - взрослые до 12 лет, 4 - взрослые возраст у которых больше 12 лет; по оси X - годы, по оси Y - численность лосей для возрастных групп, тыс. особей)

в Финляндии на основе данных мониторинга в 1975-2005 гг. Полученные нами оценки показывают, что воспроизводство телят в финской популяции лося в 1975-2005 гг. изменялось в диапазоне 44-58%. Благодаря разумной методике по квотированию изъятия животных возрастная

структура популяции поддерживалась на уровне, способствующем наибольшей плодовитости самок. Данные мониторинга указывают, что в популяции преобладали самки с высоким потенциалом плодовитости. Годичный прирост составлял около 60 телят на 100 взрослых особей [7].

Причем в 1981-2005 гг. финны изымали 56-75% поголовья предыдущей осенней послепромысловой численности (42-74 тыс. особей), за исключением периода 1994-1997 гг. В эти годы они изымали 22-32 тыс. 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. Следует отметить, что такой высокий уровень добычи сеголеток практикуется также в Швеции и Норвегии [2, 6, 7]. 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, потребуются дополнительный сравнительный анализ обеспеченности животных доступными кормовыми ресурсами в двух странах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усредненные показатели воспроизводства телят в России 157 тысяч особей в год (модельная оценка) и легального отстрела 15-21 тыс. особей в год (официальные данные) свидетельствуют в пользу того, что современная динамика численности в значительной степени связана с влиянием естественных (увеличение численности хищников – волка) и антропогенных (браконьерство) факторов. Этот вывод дополнительно подтверждается данными мониторинга 1961-2005 гг. Известно, что в периоды максимальной численности лося в России (1991-1992 гг.) численность волка составляла порядка 22-24 тыс. особей. В последние годы с уменьшением чис-

ленности лося с 904 (1991 г.) до 565 (2006 г.) тыс. особей численность волка увеличилась примерно два раза и составляет 42-45 тыс. особей (данные 2006-2007 гг.). Для восстановления численности лося в России необходимо вводить дифференцированные лицензии на отстрел сеголетков и взрослых особей, преимущественно самцов. Причем, исходя из Финского опыта управления популяциями лося, рекомендуется соотношение полов 1,6:1 (т.е. 1,6 коров на одного быка) при плотности животных не ниже 1-2 особей на 1000 га. Это будет способствовать нормализации половозрастной структуры популяции и упорядочит отстрел. Нормирование добычи копытных должно выполняться с учетом параметров воспроизводства вида, плотности и половозрастной структуры животных, численности хищников и технологии изъятия в регионе. В целях сохранения основного воспроизводственного ядра копытных рекомендуется увеличить площади особо охраняемых природных территорий путем создания новых заповедников, заказников и других участков для воспроизводства лося.

В целом проведенный анализ показывает, что популяция лося в России находится в критическом состоянии. Если при сильной антропогенной и высокой техногенной нагрузке, при существующем уровне воспроизводства лося ситуация с динамикой численности будет развиваться в нынешнем направлении, то в предстоящие годы может произойти резкий спад численности животных.

Разработанная имитационная модель показала высокую эффективность для оценки демографических параметров популяции (выживаемости, смертности, плодовитости, прироста численности и др.) на основе данных мониторинга. Она может быть использована для определения демографических параметров других парнокопытных животных (косули, олени, кабана) с целью анализа их динамики численности. Имитационная модель и созданное программное обеспечение, реализующее модель, могут быть использованы для различных субъектов России с целью анализа динамики численности, на территории которых предполагается предоставление в пользование участков лесного фонда для организации и ведения охотничьих хозяйств различного направления.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Отделения биологических наук РАН «Биологические ресурсы России: Фундаментальные основы рационального использования» (проект № П.11) и частично гранта РФФИ (№ 09-04-91331_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилкин А.А. Дикие копытные в охотничьем хозяйстве (основы управления ресурсами). М. ГЕОС, 2006. 366 с.
2. Данилкин А.А. К проблеме цикличности в динамике численности диких копытных животных // Вест. охотоведения. 2007. Т. 4. № 1. С. 89-99.
3. Павлов А.В., Петросян В.Г., Бессонов С.А., Марин Ю.Ф. Комплексная модель системы управления ресурсами копытных – дендрофагов на основе данных наземных и дистанционных измерений. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2006. С. 183-191.
4. Петросян В.Г. Развитие методов оценки динамики обилия и оптимальной плотности крупных растительноядных млекопитающих // Мониторинг биоразнообразия. М.: Наука, 1997. С. 172-178.
5. Петросян В.Г., Павлов А.В., Бессонов С.А., Назаренко Е.А., Ильин И.Н. Комплекс информационных систем и баз данных по инвентаризации биологических ресурсов // Фундаментальные основы управления биологическими ресурсами. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2005. С. 23-34.
6. Нюгрэн Т., Данилкин А.А., Кузякин В.А. Динамика численности и добычи лося в Финляндии. Вест. охотоведения. 2006. Т. 3. № 1. С. 81-84.
7. Нюгрэн Т., Песонен М., Тюккюлайнен Р., Валлен М., Руусила И. Причины высокой продуктивности лося в Финляндии // Вест. охотоведения. 2007. Т. 4, № 2. С. 148-160.
8. Состояние ресурсов охотничьих животных в Российской Федерации. М.: Изд-во ГУ Центрохотконтроль, 2000. Вып. 2. 131 с.
9. Состояние ресурсов охотничьих животных в Российской Федерации в 2000-2003 гг. М.: Изд-во ГУ Центрохотконтроль, 2004. Вып. 6. 213 с.
10. Состояние ресурсов охотничьих животных в Российской Федерации в 2003-2007 гг. М.: Изд-во ГУ Центрохотконтроль, 2007. Вып. 8. 162 с.
11. Вопросы современного охотоведения. Материалы междунар. науч.-практич. конференции. М.; 2002. 443 с.
12. Глушков В.М. Воспроизводство и продуктивность лося и их прогнозирование // Экология. 1987. № 6. С. 31-39.
13. Глушков В.М. Экологические основы управления популяциями лося // Вопросы современного охотоведения. М.; 2002. С. 115-119.
14. Копытные фауны СССР. М.: Наука, 1975. 352 с.
15. Копытные фауны СССР. М.: Наука, 1980. 393 с.
16. Недзельский Е.М. Экология, охрана и воспроизводство диких копытных животных в Предбайкалье. Автореф. дис. докт. биол. наук. М.; 2008. 48 с.
17. Русанов Я.С. Лес и копытные. М.: Лесн. пром., 1984. 129 с.
18. Русанов Я.С. Основы охотоведения. М.: Изд-во МГУ, 1986. 160 с.
19. Филонов К.П. Динамика численности копытных животных и заповедность. Охотоведение. М. Лесн. пром., 1977. 232 с.
20. Филонов К.П. Особенности численности лося в заповедниках европейской части РСФСР. Копытные фауны СССР. М.: Наука, 1980. С. 50-51.
21. Ericsson G. Demographic and life history consequences of harvest in a Swedish moose population. Doct. thesis. Acta Univers. Agriculturae Sueciae. Silvestria. 1999. P. 1-17.
22. Renecker L.A., Schwartz Ch.C. Food habits and feeding behaviour // Ecology and Management of the North American Moose. Washington: Smithsonian Institution Press. 1997. P. 403-440.
23. Renecker L.A., Hudson R.J. Seasonal foraging rates of freeranging moose. // Wildl. Manage. 1986. V. 50. P. 143-147.
24. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 414 с.

EVALUATION OF NUMBER DYNAMICS AND SEX-AGE STRUCTURE OF MOOSE POPULATIONS (*ALCES ALCES* L.) IN RUSSIA WITH THE USE OF SIMULATION MODEL AND LONG-TERM MONITORING DATA

© 2009 V.G. Petrosyan, N.N. Dergunova, S.A. Bessonov, K.A. Nazarova, A.V. Omelchenko

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the RAS,
Moscow; e-mail: petrosyan@sevin.ru

The results of comparative analysis of the number dynamics, sex-age structure and density of moose populations in Russia (1961–2005) and Finland (1975–2005) are presented with the use of developed simulation model and long-term monitoring data. It is shown that the modern low indices of the moose number in Russia are to a great extent connected with an influence of natural (a raise of a predator number – a wolf) and anthropogenic (poaching) factors.

Key words: *number dynamics, sex-age structure, simulation model, database, moose population.*

УДК 574.58.001.573+519.6

ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭКОСИСТЕМЫ НЕВСКОЙ ГУБЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

© 2009 К.А. Подгорный

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,
пос. Борок, Ярославская обл.; e-mail: kap@ibiw.yaroslavl.ru

Рассматривается общее описание пространственно-неоднородной имитационной модели экосистемы Невской губы Финского залива. Приводятся результаты модельных экспериментов и сравнение их с данными наблюдений.

Ключевые слова: экосистема, биогенные элементы, гетеротрофный бактериопланктон, фитопланктон, зоопланктон, детрит, пищевая цепь, математическое моделирование, имитационная модель.

ВВЕДЕНИЕ

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:

- на формирование ее водной массы значительное влияние оказывает Ладожское озеро, воды которого со стоком р. Невы поступают в Невскую губу в объеме ~2400-2500 м³/с [5, 8, 9, 12, 13, 21, 23-26];
- кратность годового водообмена за счет притока речных вод равна 66, что обеспечивает обновление воды в ней в среднем за 5-6 сут., а в центральной транзитной зоне почти вдвое быстрее [5, 6, 8, 9];
- Невская губа – мелководный водоем с преобладающими глубинами 3-5 м, интенсивным ветровым перемешиванием водных масс, разнообразными внутриводоемными процессами биогидрохимической трансформации [5, 6, 8, 9, 25];
- велико влияние Балтийского моря, которое сказывается на изменении солености и температуры воды, изменениях уровня воды и структуры биологических сообществ;
- Невская губа - район с высоким уровнем техногенной нагрузки на окружающую среду [1, 5, 6, 8, 9, 12-14, 19, 21, 23-26];
- на экосистему Невской губы оказывает влияние строящийся комплекс водозащитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений [6, 10, 15].

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 [3, 4, 8, 11, 13, 16, 20, 22, 26].

Цели работы состояли в том, чтобы:

- на основе всестороннего системного анализа данных наблюдений и сведений, опубликованных в литературных источниках, разработать имитационную, пространственно-неоднородную модель экосистемы Невской губы;
- 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.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И ПРИМЕНЯЕМЫХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

В имитационной модели экосистемы Невской губы были выделены, разработаны и программно реализованы следующие основные ее блоки:

- гидродинамический - для расчета нестационарной, осредненной по вертикали структуры течений в водоемах;
- гидротермодинамический - для расчета фотопериода, составляющих теплового баланса и температурного режима водоема;
- гидрооптический - для расчета оптических характеристик водной толщи;
- блок для описания процессов трансформации соединений азота и фосфора в водоеме и динамики растворенного в воде кислорода¹;
- блок для расчета времени оборота и потоков вещества между выделенными (агрегированными) модельными компонентами экосистемы;

- блок для выполнения процедуры оценивания параметров имитационной модели.

Воды Невской губы почти всегда перемешаны до дна, в ней отсутствует выраженный сезонный термоклин и имеет место относительная вертикальная однородность (однослойная структура) течений. Поэтому при моделировании пространственно-временной структуры течений использовано приближение теории мелкой воды. Значения средних по глубине составляющих скорости течения определяются в результате численного интегрирования системы уравнений Сен-Венана без учета турбулентного перемешивания [2, 18]. Для численного решения используется неявная, разнесенная по пространству и времени разностная схема с применением метода переменных направлений [2, 18]. Вычисления полей течений в модели проводились на равномерной прямоугольной сетке с размером шага 500×500 метров. Временной шаг при численном интегрировании разностных уравнений для обеспечения устойчивости вычислений был выбран равным 30 сек. Общее число узлов расчетной сетки 53 × 36. Вычисления полей течений начинались от момента очищения Невской губы ото льда и продолжались до 31 октября. Изменение гидрометеорологической ситуации над водоемом происходило каждые сутки модельного времени.

Моделирование проводилось как для естественных, так и для проектных условий, т. е. при наличии комплекса водозащитных сооружений города г. Санкт-Петербурга от наводнений. В проектных условиях Северные и Южные ворота Невской губы перекрыты дамбами, в которых имеется шесть водопропускных отверстий (B1 – B6) и два судопропускных отверстия (C1, C2). Расходы р. Невы (1900 м³/с), р. Малая Нева (400 м³/с) и р. Малая Невка (300 м³/с) задавались по данным многолетних наблюдений [5, 9]. Площади водопропускных и судопропускных отверстий заданы по данным работы [10]. Принималось, что в проектных условиях 54% расхода проходит через Северные ворота, а 46% - через Южные ворота [22]. Соответственно этим данным, вычислялись скорости течений в водопропускных и судопропускных отверстиях.

Для моделирования пространственно-временной динамики полей температуры используется уравнение теплопроводности [18]. Из этого уравнения следует, что эволюция температурного поля водоема определяется тремя основными факторами: адвективным переносом тепла; тур-

булентной диффузией; процессами теплообмена между водоемом, атмосферой и деятельным слоем донных отложений. В качестве граничных условий при построении численной схемы на всей твердой границе, в створах вытекающих рек и на открытой границе при направлении движения воды за пределы расчетной области задавалось условие равенства нулю производной по направлению внешней нормали к границе водоема. На открытой границе при направлении движения воды внутрь расчетной области ставилось первое краевое условие. В створах втекающих рек задавалось значение температуры воды втекающей реки в данный момент времени.

Задача моделирования термического режима Невской губы решается в два основных этапа. Сначала на заданном шаге по времени τ проводится численное интегрирование системы уравнений гидродинамики – уравнений «мелкой воды». В результате этого определяются значения средних по глубине составляющих скорости течения. Затем на том же временном интервале интегрируется уравнение теплопроводности. При этом применяются схемы расщепления по физическим процессам и пространственным координатам [18]. В результате решения этой задачи находят пространственное распределение температуры в пределах расчетной области к концу заданного шага по времени. Схемы численного интегрирования указанных выше уравнений, методика расчета фотопериода, тепловых потоков на поверхности водоема при различных условиях стратификации приводного слоя воздуха и варианты расчета потока тепла на дне водоема подробно рассмотрены в работах [17, 18].

Расчет полей температуры, как и расчет течений, проводился на той же самой равномерной прямоугольной сетке с размером шага 500 × 500 м. Временной шаг при численном интегрировании разностных уравнений составлял 120 сек. Начальное значение температуры воды по всей акватории было равно 0,5°. При выполнении расчетов в соответствующих узлах расчетной сетки задавался известный из наблюдений временной ход температуры воды в реках. Расчеты тепловых потоков в приводном слое атмосферы проводились на основе многолетних данных стандартных метеорологических наблюдений Санкт-Петербургской ГМО в предположении равновесной стратификации приводного слоя воздуха.

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

¹ 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 искреннюю благодарность.

по глубине составляющих скорости течения, потоков коротковолновой солнечной радиации, величины фотопериода и средней по вертикали температуры воды. Затем на том же временном интервале (в данном случае 120 сек., как и при расчете поля температуры) и на той же самой пространственной сетке численно интегрируется система уравнений турбулентной диффузии и трансформации веществ химико-биологического комплекса. Решение этой задачи позволяет найти значения концентраций биотических компонентов экосистемы к концу заданного шага по времени. Эволюция полей химических и биологических характеристик определяется воздействием четырех основных факторов: переносом субстанций вдоль траекторий частиц (адвекцией); гравитационным осаждением взвешенных веществ; турбулентной диффузией; трансформацией химико-биологических субстанций. Для численного интегрирования применяются схемы расщепления по физическим процессам и пространственным координатам, которые подробно рассмотрены в работе [18].

В качестве граничных условий при построении численной схемы на всей твердой границе, в створах вытекающих рек и на открытой границе при направлении движения воды за пределы расчетной области задавалось условие равенства нулю производной по направлению внешней нормали к границе водоема. На открытой границе при направлении движения воды внутрь расчетной области ставилось первое краевое условие. В створах втекающих рек задавались значения концентраций химических и биотических компонентов в воде реки в данный момент времени.

Имитационная модель совместной трансформации соединений азота и фосфора, а также динамики растворенного в воде кислорода учитывает основные взаимодействия как природных, так и антропогенных факторов, их совместное влияние на водную экосистему. В этом блоке 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 (N) и фосфора (P).

В водной среде присутствуют органические и минеральные соединения биогенных элементов. Различные микроорганизмы потребляют их и своими прижизненными выделениями, а также образованием детрита влияют на состав компонентов водной среды. Наиболее важные взаимодействия между химическими и биологически-

ми компонентами отражают круговорот рассматриваемых в модели биогенных элементов. При моделировании трансформации форм N и P эти взаимодействия учтены на основе реалистичного описания кинетики и стехиометрии процессов биотрансформации веществ. Кроме этого учтено влияние факторов среды обитания (температура, освещенность водной среды, изменение водной и биогенной нагрузки) на скорость трансформации отдельных соединений.

В модели биотрансформации химических веществ количественно связываются скорости роста гидробионтов с концентрациями биогенных элементов. При этом различные компоненты одного элемента могут рассматриваться как взаимозаменяемые вещества, потребляемые гидробионтами в процессе их развития. Математическая формулировка отдельных слагаемых модели для описания процессов потребления веществ микроорганизмами, выделения ими продуктов обмена и отмирания гидробионтов выполнено с учетом условий полисубстратной среды. При математическом описании процессов учтена гипотеза о предпочтении потребления отдельных соединений. Это позволяет отразить смену биогенного элемента или его отдельных соединений в лимитировании развития гидробионтов. Таким образом, модель фактически воспроизводит переходные процессы и описывает реакцию водной экосистемы на изменения условий среды обитания или на изменение хотя бы одного из учитываемых в модели факторов (изменение температуры воды, водного режима, освещенности, биогенной нагрузки). Полное описание модели дано в работе [18].

С помощью данной модели можно изучать пространственно-временную динамику сестона, который является одним из наименее изученных факторов водной среды. Сестон - совокупность взвешенных в воде минеральных и органических частиц. Содержание его в воде определяет такое важное свойство природной воды, как прозрачность. Модель позволяет выполнять расчет различных характеристик прозрачности воды [18]. Для этого используется ряд эмпирических зависимостей, которые были получены на основе данных натурных измерений [12, 18].

Для решения оптимизационной задачи подбора параметров имитационной модели реализован двухэтапный алгоритм прямого поиска [18]. На первом этапе используется алгоритм случайного поиска, который проводится в пределах всего пространства параметров (глобально). Его задача состоит в отыскании возможной области существования глобального минимума целевой функции в заданном параметрическом пространстве. На втором этапе выполняется локальный

поиск. Для этого используется модифицированный симплексный метод Нелдера-Мида [27]. Локальный поиск уточняет положение минимума целевой функции, найденное на первом этапе работы алгоритма.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование проводилось для четырех лет наблюдений – с 1984 по 1987 г. Результаты моделирования позволяют говорить о достаточно хорошем качественном и количественном соответствии модельных оценок и имеющихся данных наблюдений. В качестве показателя адекватности модели используется критерий Тила [28], значение которого может меняться от нуля до единицы, причем при полном совпадении модельных и наблюдаемых величин его значение равно нулю. Сравнение полей температуры показывает, что для них критерий Тила меняется в пределах от 0,0307 до 0,2093 при среднем значении 0,0781. Средние по биотическим компонентам величины этого критерия меняются от 0,2306 до 0,3778 при среднем значении 0,2812. Наибольшие расхождения отмечаются для мая месяца, что может быть связано с ошибками в задании начальных полей модельных компонентов экосистемы. Во взвешенном органическом веществе азот и фосфор в составе детрита составляют 45-75%, 10-30% – азот и фосфор в составе фитопланктона и 10-20% – азот и фосфор в составе гетеротрофных бактерий. Роль зоопланктона в Невской губе невелика. Основной фракцией минерального азота является азот нитратов – 60-70%. Азот нитритов составляет менее 5%. Отношение $N_{\text{мин}}/DIP$ менялось от 30 до 190, $N_{\text{орг}}/P_{\text{орг}}$ – от 16 до 40, $N_{\text{tot}}/P_{\text{tot}}$ – от 23 до 49, а их внутригодовая динамика качественно отличалась от года к году. С помощью модели оценены пределы изменчивости важнейших компонентов экосистемы: DIP – 2,02-20,08 (мкг/л); DOP – 1,30-12,25 (мкг/л); PD – 19,60-35,06 (мкг/л); N-NH₄⁺ – 31,96-191,97 (мкг/л); N-NO₂⁻ – 4,50-18,14 (мкг/л); N-NO₃⁻ – 160,05-468,20 (мкг/л); DON – 237,87-943,41 (мкг/л); ND – 196,04-400,12 (мкг/л). Эти результаты также согласуются с данными многолетних наблюдений [21, 23-25]. С помощью модели и данных наблюдений показано, что содержание азота и фосфора в воде Невской губы, по всей видимости, не может быть лимитирующим фактором, сдерживающим увеличение биопродуктивности водоема. На это указывает несоответствие между сравнительно низким уровнем развития фитопланктона при достаточно высоких концентрациях биогенных элементов. Вклад первичной продукции фитопланктона в общее поступление органического вещества не-

велик. Результаты моделирования и данные наблюдений [1, 6, 7, 12] показывают, что основной причиной интенсивного развития гетеротрофных процессов в Невской губе являются величины аллохтонного органического вещества. Влияние комплекса защитных сооружений в целом невелико и прослеживается только на нескольких шагах расчетной сетки (в среднем до 5-10 шагов в зависимости от ветровых условий). Однако данный вопрос еще требует более детального исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-05-00470).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов А.Ф., Никулина В.Н., Панов В.Е., Телеш И.В., Финогенова Н.П. Гидробиологическая характеристика Невской губы Финского залива // Гидробиол. журн. 1993. Т. 29, № 3. С. 3-14.
2. Баклановская В.Ф., Пальцев Б.В., Чечель И.И. О краевых задачах для системы уравнений Сен-Венана на плоскости // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1979. Т. 19, №3. С. 708-725.
3. Андреев О.А., Соколов А.В. Численное моделирование динамики вод и переноса пассивной примеси в Невской губе // Метеорол. и гидрология. 1989. № 12. С. 78- 5.
4. Афанасьев С.В. Результаты численных экспериментов по моделированию распространения примеси в Невской губе // Системы и методы автоматизации исследований и управления. М.: Наука, 1982. С. 30- 4.
5. Гидрология устьевой области Невы / Под ред. С.С. Байдина. - М.: Гидрометеиздат. 1965. 384 с.
6. Дробкова В.Г., Беляков В.П., Каурова З.Г. Особенности процессов антропогенного эвтрофирования в эстуарии р. Невы (восточная часть Финского залива) // Биол. внутр. вод. 1999. №1-3 С. 58-69.
7. Дробкова В.Г., Каурова З.Г., Хлопотина Н.Л. Особенности гетеротрофной активности бактериопланктона в эстуарии р. Невы (Невская губа и восточная часть Финского залива) // Гидробиол. журн. 2000 Т. 36, №6. С. 52-61.
8. Интегрированное управление водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Опыт создания системы поддержки принятия решений / Под ред. А.Ф. Алимова, Л.А. Руховца, М.М. Степанова. - СПб.: Vorey Print, 2001. 420 с.
9. Исследования водной системы Ладожское озеро - река Нева - Невская губа и Восточная часть Финского залива // Тр. ГГИ. 1988. Вып. 321. 152 с.
10. Клеванный К.А. Наводнения в Санкт-Петербурге при незавершенном комплексе защитных сооружений // Изв. АН. Серия географическая.

2002. №2. С. 80 - 88.
11. Менишуткин В.В., Гришман З.М., Пинчук Н.М. Концептуальная модель экосистемы Невской губы // Физиол. человека. 1993. Т. 19, №6. С. 126 - 136.
 12. Невская губа: гидробиологические исследования / Под ред. Г.Г. Винберга, Б.Л. Гутельмахера. – Л.: Наука, 1987. 216 с.
 13. Невская губа - опыт моделирования / Под ред. В.В. Менишуткина. - СПб.: Vorey Print, 1997. 375 с.
 14. Никулина В.Н. Сезонная динамика фитопланктона мелководного района восточной части Финского залива при антропогенном воздействии // Биология внутренних вод, 2003. №4. С. 43 - 50.
 15. Никулина В.Н., Большакова В.А. Фитопланктон эстуария р. Невы в зоне строительства сооружений защиты г. Санкт-Петербурга от наводнений // Гидробиол. журн. 1998. Т. 34. №1. С. 25 - 33.
 16. Пинчук Н.М., Гришман З.М., Дитятев А.Э., Евдокимов И.И., Левченко В.Ф., Менишуткин В.В. Исследование и прогнозирование экологического состояния Невской губы и восточной части Финского залива методами имитационного моделирования // Физиол. человека. 1992. Т. 18. №5. С. 131 - 135.
 17. Подгорный К.А. Расчет параметров термодинамического взаимодействия, характеристик теплового баланса и температуры воды в нестратифицированных водоемах. - Ярославль: Изд-во ЯГТУ. 2000. 100 с.
 18. Подгорный К.А. Математическое моделирование пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов (алгоритмы и численные методы). – Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский Дом печати». 2003. 328 с.
 19. Подгорный К.А., Смирнова Н.Ф. Распределение токсических веществ в Невской губе за период с 1984 по 1987 гг. // “Гидрология Южного океана и Северной Атлантики”. Сб. научн. трудов. - Л.: Изд-во ЛГМИ. 1990. Вып. 109. С. 130 - 139.
 20. Пясковский Р.В., Молчанов В.Н. Моделирование динамического переноса загрязняющих веществ в Невской губе // Метеорол. и гидрология. 1976. №3. С. 68 - 77.
 21. Румянцева Э.А., Скакальский Б.Г. Оценка временной и пространственной неоднородности вод Невской губы и восточной части Финского залива по гидрохимическим показателям // Метеорол. и гидрология. 2008. №1. С. 98 - 106.
 22. Руховец Л.А. Математическое моделирование водообмена и распространения примесей в Невской губе // Метеорол. и гидрология. 1982. №7. С. 78 - 87.
 23. Скакальский Б.Г., Румянцева Э.А. Гидрохимическое районирование Невской губы // Метеорол. и гидрология. 1989. №9. С. 110 - 113.
 24. Смирнова Н.Ф. Особенности структуры вод Невской губы в период 1979-1983 гг. // “Вопросы охраны и рационального использования вод суши”. Сб. научн. трудов. - Л.: Изд-во ЛПИ, 1985. Вып. 89. С. 51 - 57.
 25. Смирнова Н.Ф., Подгорный К.А. Пространственно-временные изменения структуры вод Невской губы за период с 1984 по 1987 гг. // “Динамика русловых потоков и охрана природных вод”. Сб. научн. трудов. - Л.: Изд-во ЛГМИ. 1990. Вып. 107. С. 136 - 149.
 26. Экологическое состояние водоемов и водотоков бассейна реки Невы / Под ред А.Ф. Алимова, А.К. Фролова. – СПб: Научный центр РАН. 1996. 225 с.
 27. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // Comp. J. 1964. V. 7. P. 308 - 313.
 28. Theil H. Applied economic forecasting. Amsterdam: North-Holland 1971. 474 p.

A TWO-DIMENSIONAL SIMULATION ECOSYSTEM MODEL OF THE NEVA BAY, GULF OF FINLAND

© 2009 K.A. Podgornyj

I.D. Papanin Institute for the Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences
Borok, Yaroslavl region; e-mail: kap@ibiw.yaroslavl.ru

The paper presents a generic description of a two-dimensional simulation ecosystem model of the Neva bay, Gulf of Finland. A result of model experiments was validated with concurrent field observations.

Key words: *ecosystem, biogenic elements, heterotrophic bacterial plankton, phytoplankton, zooplankton, detritus, food chain, mathematical modeling, simulation model.*

УДК 577.1+577.48

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МАСС-БАЛАНСА ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ЭКОСИСТЕМ К ВОЗДЕЙСТВИЮ АТМОСФЕРНЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ

© 2009 И.В. Припутина¹, А.В. Танканаг², И.Ю. Аверкиева¹

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино, Московская обл.; e-mail: i.priputina@gmail.com, averkieva25@rambler.ru

²Институт биофизики клетки РАН, г. Пущино, Московская обл.; e-mail: tav@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к оценке устойчивости наземных экосистем в отношении воздействия атмосферных поллютантов, базирующиеся на использовании моделей биогеохимического масс-баланса вещества. На примере территории Республики Коми представлены результаты расчетов допустимых параметров поступления с атмосферными выпадениями соединений азота, превышение которых определяет экологические риски эвтрофирования природных биогеоценозов.

Ключевые слова: модели простого масс-баланса, биогеохимический круговорот азота, критические нагрузки, эффекты эвтрофирования экосистем

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, математическое моделирование экологических и биологических систем широко используется для решения практических задач охраны окружающей среды и рационального природопользования, когда невозможно проведение натурных экспериментальных исследований, например, для прогноза динамики техногенных изменений экосистем и определения параметров их устойчивости в отношении воздействий различных поллютантов. Техногенные соединения, поступающие в окружающую среду в результате хозяйственной деятельности человека, как правило, не остаются в неизменном виде, а «включаются» в уже существующие в природе потоки миграции вещества. Поэтому подобные оценки могут быть выполнены на основе моделей биогеохимического масс-баланса, реализованных для природно-территориальных комплексов разного иерархического уровня и с разной степенью детализации [12, 17].

В настоящей работе приведен пример использования простой модели масс-баланса в рамках региональных исследований по оценке допустимых параметров поступления соединений азота в наземные экосистемы с атмосферными выпадениями. Объект исследования – участок территории Республики Коми вдоль трассы газопровода «Ямал-Европа», что связано с планируемым увеличением в ближайшие годы объемов транспортировки природного газа из районов Крайнего Севера в центральную Россию и европейские страны и как следствие, ожидаемым ростом региональных уровней атмосферной эмиссии окси-

дов азота [5, 9]. Экологические последствия загрязнения воздушной среды соединениями азота, обуславливающего их повышенное поступление в наземные и водные экосистемы с атмосферными выпадениями, хорошо известны на примере территории Западной и Северной Европы [12, 16]. Основные негативные эффекты для биотических компонентов экосистем условно могут быть подразделены на две группы, связанные с процессами эвтрофирования и подкисления, биогеохимическими индикаторами которых являются увеличение концентраций азота в почвенном растворе и кислотности почв по сравнению с «критическими» значениями [19].

ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ

Биогеохимический баланс азота в природных экосистемах складывается из совокупности многих ландшафтно-геохимических и микробиологических процессов, особая роль в которых принадлежит наземной растительности и почвенной биоте [6, 13]. В настоящее время разработаны достаточно детальные модели круговорота азота, максимально учитывающие трансформацию и миграцию соединений азота в системе «атмосфера – осадки – почва – почвенная биота – растительность – почвенно-грунтовые воды».

Однако для оценки устойчивости экосистем на региональном уровне возможно использование упрощенной модели, включающей в себя ограниченное число параметров, определяющих интенсивность долговременной иммобилизации поллютантов в отдельных компонентах экосистем, их возможной нейтрализации и удаления за

пределы экосистем с продукцией биомассы или почвенно-грунтовым стоком [17]. Именно этот подход использован в методологии критических нагрузок (КН), развиваемой в рамках научного обеспечения международной Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния [14].

Согласно определению, величина КН ограничивает допустимый порог поступления загрязняющих веществ в экосистемы, ниже которого не происходит нарушений в их функционировании, структуре и биоразнообразии в течение длительного (50-100 лет) периода времени [15]. Таким образом, уровень техногенного воздействия ниже величин КН обеспечивает долговременное отсутствие негативных изменений, тогда как превышение КН является показателем потенциального экологического риска. Основные принципы и методы расчета КН освещены в западных [18, 19] и российских публикациях [3, 10]. В этих моделях делается целый ряд допущений, а именно:

- глубина рассматриваемого слоя почвы условно равняется глубине корневой зоны, что позволяет пренебречь циклом питательных веществ;

- эвапотранспирация происходит на поверхности профиля почвы;
- просачивание влаги атмосферных осадков является постоянным по всему профилю почвы и происходит только вертикально;
- физико-химические константы принимаются однородными по всему почвенному профилю; внутренние потоки элементов (азотфиксация и др.) не зависят от химических условий почвы (таких как pH).

Также не учитываются внутренние «экосистемные» взаимодействия, такие как внутривидовая конкуренция или наличие вредителей, вынос элементов из почвы с приростом той части наземной биомассы, которая ежегодно возвращается на поверхность с опадом растительности, и другие.

Для соединений азота в отношении эффектов эвтрофирования рассчитывают так называемые КН питательного азота ($KH(N)_{nut}$). Расчет величин КН включает параметризацию миграционных потоков (таблица), специфичных для разных биоклиматических и ландшафтных условий.

Таблица. Параметры уравнения масс-баланса для расчета величин КН питательного азота и характеристика входных данных

Условные обозначения	Наименование параметра	Единицы измерения	Формула для расчета / источник данных
$KH(N)_{nut}$	Критическая нагрузка питательного азота	г-экв./га/год	$= N_{upt} + N_{im} + N_{le(acc)} / (1 - f_{de})$
N_{upt}	Закрепление азота в продукции наземной биомассы	г-экв./га/год	$= Y_{hpp} * [N]$
Y_{hpp}	Ежегодная продукция наземной биомассы	кг/га/год	По данным: Бобкова, 1990; Лесное хозяйство..., 2000.
$[N]$	Концентрация азота в продукции биомассы	г-экв./кг	По данным: Бобкова, 1990; Пристина, 2003
N_{im}	Долговременная иммобилизация азота в почве	г-экв./га/год	По данным: Кудеяров и др., 2008; UBA, 2004
$N_{le(acc)}$	Допустимое вымывание азота	г-экв./га/год	$= Q_{le} * [N]_{acc}$
Q_{le}	Слой инфильтрации осадков	м	Пространственно-распределенные данные, рассчитанные на основе: www.cru.uea.ac.uk
$[N]_{acc}$	Критическая концентрация азота в почвенном растворе	экв./м ³	В соответствии с рекомендациями (UBA, 2004) для видов-эдикаторов
f_{de}	Коэффициент денитрификации азота в почве	-	В соответствии с рекомендациями (UBA, 2004) в зависимости от гранулометрического состава почв

Описывая условия равновесного биогеохимического состояния, данная модель является статической и требует использования в качестве входной информации детерминированных показателей (констант и долгосрочных усредненных значений миграционных потоков). Сезонные, межгодовые и другие краткосрочные динамические изменения в данной модели не учитываются. В Европе, где в большинстве стран существует достаточно детальная сеть мониторинговых на-

турных наблюдений, для расчетов величин КН используются измеренные средние показатели, характеризующие участки территорий с высокой степенью детальности.

Однако при расчетах КН для крупных регионов со слабой степенью изученности или сложной природной структурой возникают проблемы, связанные с высокой степенью неопределенности и пространственной дифференциацией большинства природных показателей. На наш взгляд,

в этом случае более корректные оценки могут быть получены за счет использования вероятностных методов расчета КН, например, метода Монте-Карло. В этом случае для ряда параметров модели по литературным и картографическим данным определяется набор возможных значений, включение которых в расчеты происходит «случайным образом». В данной работе для каждой экосистемы (участка территории 1×1 км) было проведено 1000 прогонов модельных рас-

четов, что позволило получить вероятностное распределение – диапазон возможных значений КН питательного азота. Анализ распределения полученных вероятных значений КН позволяет обосновать интенсивность техногенных нагрузок в зависимости от природоохранных приоритетов и/или экономической целесообразности использования территорий и их природных ресурсов (рис. 1).

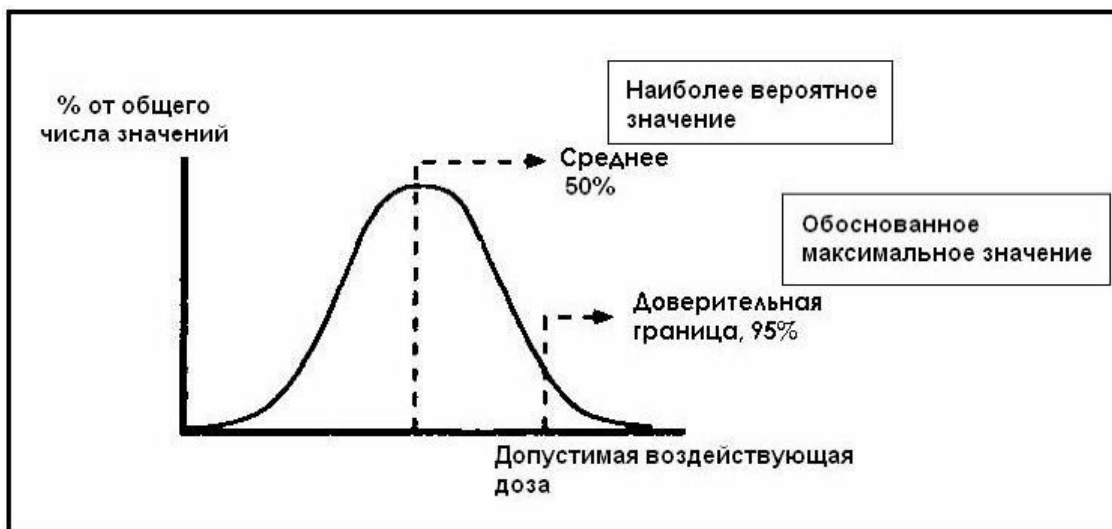


Рис. 1. Кривая распределения вероятных значений допустимых нагрузок загрязнителей для условной экосистемы

База данных для вероятностных расчетов величин КН азота в отношении эффектов эвтрофирования экосистем для территории Республики Коми была сформирована в виде ГИС-проекта в программной среде ArcView, что позволило проводить текущий анализ и визуализацию получаемых данных. Рассмотрена трансекта шириной около 50 км вдоль трассы Микунь – Ухта – Печора – Инта – Воркута. Детальность пространственного разрешения – 1×1 км. Для лесных экосистем были рассмотрены наиболее типичные сценарии рубок. Для травянистых и кустарниково-травянистых экосистем тундровой и лесной зон рассмотренный сценарий возможного хозяйственного использования включал использование территорий в качестве пастбищ, в том числе в северных районах для оленеводства.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате выполненных расчетов получена детальная пространственно распределенная информация, характеризующая специфику биогеохимического цикла азота в различных зональных и интразональных типах тундровых, лесотундровых и таежных экосистем Республики Коми. На рис. 2 и 3 приведены примеры пространствен-

ного распределения полученных значений КН питательного азота для 50%-ного и 95%-ного уровней значений на участке Ухта-Инта. Согласно оценкам, допустимый уровень поступления азота с атмосферными выпадениями составляет для данной территории от 200-400 до 700-1000 г-экв./га в год (или от 3-6 до 10-15 кг N/га в год). Анализ полученных результатов свидетельствует о дифференцированности экосистем исследуемого региона к величине поступления азота с атмосферными выпадениями. Так, например, вынос азота из лесных экосистем таежной зоны с приростами древесины при разных вариантах рубок оценивается в 0,5-1,5 кг N/га в год в притундровых смешанных лесах и 6-10 кг N/га в год для высокопродуктивных среднетаежных ельников. При оценке допустимых уровней выноса азота с почвенно-грунтовыми водами были рассмотрены 2 сценария, соответствующие предупреждению эффектов дисбаланса азотного питания для растений эдификаторов (древесных видов в лесах и наземных в травянистых биоценозах) и эффектов снижения биоразнообразия напочвенного покрова. В первом случае данные величины могут составлять 1-2,5 кг N/га, при этом уровень концентраций азота в почвенном растворе соответствует в среднем 0,2-0,4 мг N/л в

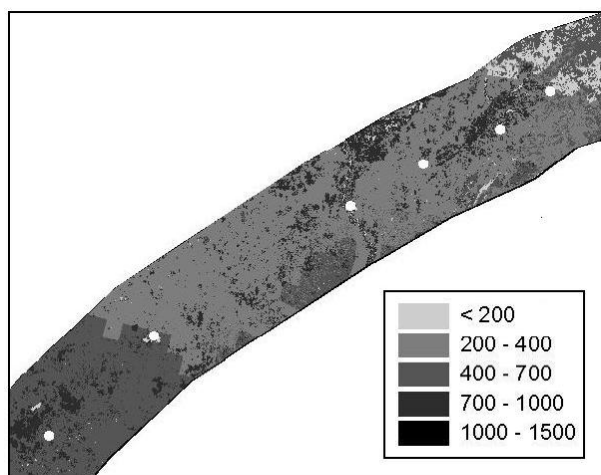


Рис. 2. Пространственное распределение величин КН азота: 50% уровень значений. (величины в легенде – г-экв./га в год; 700 г-экв./га = 10 кг N/га)

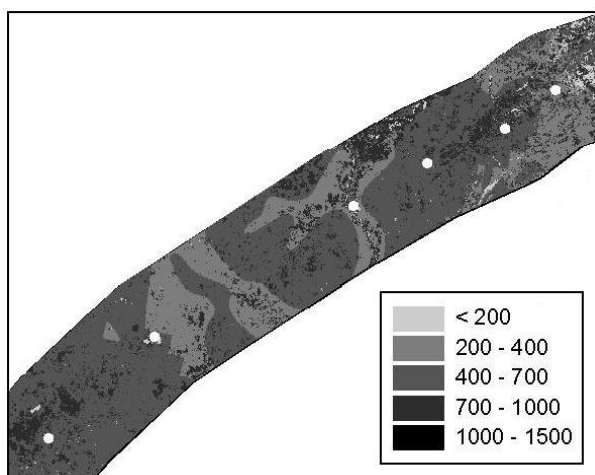


Рис. 3. Пространственное распределение величин КН азота: 95% уровень значений. (величины в легенде – г-экв./га в год; 700 г-экв./га = 10 кг N/га)

зависимости от типа древостоев. Эффекты нарушения видового разнообразия (увеличение доли нитрофильных и снижение олиготрофных видов) возможны, когда концентрация азота в почвенном растворе превышает для лишайников и мхов величину 0.2-0.4 мг N/л, для кустарничковых видов – 1 мг N/л, для осок и злаков – 1-3 мг N/л [19]. С учетом высокого уровня атмосферных осадков, характерных для исследуемой территории, рассчитанные параметры допустимого вымывания азота с почвенно-грунтовым стоком составили диапазон 1,5-7 кг N/га для тундровой зоны и 7-10 кг N/га для лесных территорий.

Авторы выражают благодарность проф., д.б.н. К.С. Бобковой (Институт биологии КНЦ УрО РАН) за консультации по вопросам оценки продуктивности лесов Республики Коми. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 07-05-00492).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г.А., Логофет Д.О. Динамическая модель совместного круговорота органического вещества и азота в биогеоценозе переходного болота // Математическое моделирование биогеоценологических процессов. М.: Наука, 1985. С. 80-97.
2. Базилевич Н.И. Баланс химических веществ в природных, трансформированных и искусственных экосистемах: Концептуальные модели // Гетеротрофы в экосистемах Центральной лесостепи. М.: ИГАН СССР, 1979. С. 236-258.
3. Башкин В.Н., Припутина И.В., Абрамычев А.Ю., Танканин А.В. Количественная оценка и картографирование критических нагрузок серы и азота на наземные и пресноводные экосистемы европейской части России. Часть II // Проблемы региональной экологии, 1998. № 1. С. 26-42.
4. Бобкова К.С. Экологические основы продуктивности хвойных лесов европейского северо-востока. Дис. докт. биол. наук. Сыктывкар. 1990.
5. Бухгалтер Э.Б., Пыстина Н.Б. Магистральный транспорт газа и экологическое состояние земель в районах прохождения газопроводов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2008, № 8, С. 90-94.
6. Ковда В.А. Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком. М.: Наука, 1975. 73 с.
7. Кудеяров В.Н., Демкин В.А., Комаров А.С. Природная и антропогенная эволюция почв, круговорот углерода в ландшафтах в связи с изменениями климата и катастрофическими явлениями // Изменение окружающей среды и климата природные и связанные с ними техногенные катастрофы: 8 т. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 13-35.
8. Лесное хозяйство и лесные ресурсы Республики Коми. /Под ред. Г.М. Козубова, А.И. Таскаева. М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2000. 512 с.
9. Минигулов Р.М., Райкевич С.И., Фокина Л.М. Новые технологии сокращения выбросов оксидов азота в атмосферу // Газовая промышленность, 2005. № 5. С. 74-76.
10. Припутина И.В. Влияние почвенных условий на параметры устойчивости экосистем Европейской России к техногенным выпадениям поллютантов // Почва как связующее звено природных и антропогенно-преобразованных экосистем. Иркутск: ИГУ. 2006. С. 239-241.
11. Пристина Т.А. Биологический круговорот азота и зольных элементов в лиственно-хвойном насаждении подзоны средней тайги. Дис... канд.

- биол. наук. Сыктывкар, 2003.
12. *Bobbink R., Hornung M., Roelofs J.G.* The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation // *J. Ecology*. 1998. V. 86, № 5. P. 717-738.
 13. *Boyer E., Howarth R.* (Eds.) The nitrogen cycle at regional to global scale. Report of the Intern. SCOPE Nitrogen Project. Dordrecht. Boston, London: Kluwer Academic Publishers. 2002. 519 pp.
 14. Mapping Manual for modelling and mapping of critical loads and their input data (2004) <http://www.icpmapping.org>.
 15. *Nilsson J., Grennfelt P.* Critical loads for sulphur and nitrogen. Report from a Workshop held at Skokloster Sweden March 19-24 1988. Moljo rapport 1988: 15. Copenhagen Denmark Nordic Council of Ministers.
 16. *Nordin A., Strengbom J., Witzell J. et al.* Nitrogen deposition and the biodiversity of boreal forests: implications for the nitrogen critical loads // *Ambio* 2005. V. 34, № 1. P. 20-24.
 17. *Posch M., de Vries W., Hettelingh J.-P.* (1995) Critical loads of sulphur and nitrogen // Calculation and mapping of critical thresholds in Europe. Status report 1995. P. 31-47.
 18. *Reinds GJ, Posch M., De Vries W.* A semi-empirical dynamic soil acidification model for use in spatially explicit integrated assessment models for Europe. Alterra Green World Research, Rep. 084. Wageningen, the Netherlands, 2001. 55 p.
 19. UBA (2004) Mapping Manual for modelling and mapping of critical loads and their input data. <http://www.icpmapping.org>. 2004.

APPLICATION OF THE MODELS OF BIOGEOCHEMICAL MASS-BALANCE FOR ESTIMATING ECOSYSTEMS SUSTAINABILITY TO AIR POLLUTANTS IMPACT

© 2009 I.V. Pripulina, A.V. Tankanag², I.Yu. Averkieva¹

¹Institute of physicochemical and biological problems in soil science of RAS, Pushchino, Moscow region; e-mail: i.pripulina@gmail.com, averkieva25@rambler.ru

²Institute of cell biophysics, Pushchino, Moscow region; e-mail: tav@mail.ru

This article is a view on some approaches to estimate a sustainability of terrestrial ecosystems to air pollutants impact based on using biogeochemical mass-balance model. On the example of Komi Republic, the results of calculating permissible levels of nitrogen inputs to the ecosystems with air depositions are discussed. Exceeding these values will be effected in risks of natural ecosystems eutrophication.

Key words: *simple mass-balance model, biogeochemical cycle of nitrogen, critical loads, eutrophication effects*

УДК 517.958:57

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ПОПУЛЯЦИИ С ВОЗРАСТНОЙ И ПОЛОВОЙ СТРУКТУРОЙ

© 2009 О.Л. Ревуцкая, Е.Я. Фрисман

Институт комплексного анализа региональных проблем, г. Биробиджан;
e-mail: oksana-rev@mail.ru, frisman@mail.ru

Исследуется нелинейная 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.

Ключевые слова: популяционные модели, возрастной и половой состав популяции, устойчивость, динамические режимы, хаос.

ВВЕДЕНИЕ

Обоснование и развитие классических матричных моделей динамики популяций [5-7] позволяет подробно описывать и исследовать роль и значение возрастной структуры и стадийности развития для поддержания и эволюции популяционной цикличности [2-4]. Формирование половой структуры рассматривается здесь зачастую как сопутствующий процесс, однозначно определяющийся различиями коэффициентов выживаемости разнополых ровесников. Однако в случае полигамных видов, как формирование половой структуры, так и характер популяционной динамики в целом, оказываются существенно связаны с параметрами, определяющими тип «брачных отношений» и роль самцов в процессе воспроизводства [1, 8, 10].

В данной работе предлагается простая математическая модель, в рамках которой удастся одновременно проследить формирование возрастной и половой структур и явно учесть асимметричность влияния полов на демографические процессы.

Такая постановка задачи подробно до сих пор не рассматривалась, ее исследование позволяет описать картину качественного изменения динамического поведения популяции в зависимости от уровня различий характеристик полов, определяющих процессы выживания и воспроизводства.

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 размно-

жении. 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

$$\begin{cases} P_{n+1} = r \cdot F_n \\ F_{n+1} = \delta w_1 P_n + s_1 F_n \\ M_{n+1} = (1 - \delta) w_2 P_n + s_2 M_n \end{cases}, \quad (1)$$

где r - коэффициент рождаемости, δ - 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 r зависит от соотношения численностей самцов и самок в популяции, и выбирается в виде зависимости

$$r = \frac{aM}{hF + M}, \quad (2)$$

где a - максимально возможный коэффициент рождаемости, или, другими словами, репродуктивный потенциал популяции (максимально возможное среднее число потомков, приходящихся на одну оплодотворенную самку), определяемый видовыми особенностями. Параметр h характеризует тип брачных отношений в популяции. Фактически, безразмерный параметр h - это такое соотношение самцов и самок в популяции, при котором оплодотворенными оказываются ровно половина самок.

Величина коэффициента h определяется видовыми особенностями и фактически характеризует половую активность самцов: чем меньше h , тем больше активность самцов и тем меньше их требуется для поддержания высокого коэффициента рождаемости.

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 ($\delta = 0,5$), 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 $b = \beta_1 / \beta_2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ

Координаты ненулевой равновесной точки с положительными координатами определяются по формулам

$$\bar{p} = \frac{1 + C - bA}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4(C - A)}{(bA - C - 1)^2}} \right),$$

$$\bar{f} = \frac{\bar{p}(1 - b\bar{p})}{2(1 - s)}, \quad \bar{m} = \frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{2(1 - s)}, \quad (3)$$

где $C = \frac{2s + a - 2}{ab}$, $A = \frac{2h(1 - s)}{ab}$.

Нетривиальное равновесие с положительными координатами существует тогда, когда выполняются условия:

$$0 < \bar{p} < 1 \text{ при } 0 < b < 1,$$

$$0 < \bar{p} < 1/b \text{ при } b > 1,$$

$$\text{или } a > 2((1 - s) + h(1 - v)),$$

а его устойчивость определяется значениями собственных чисел, удовлетворяющих характеристическому уравнению

$$(\lambda - s)(\lambda^2 - s\lambda + G) = 0, \quad (4)$$

где $G = a \frac{hf^2(2\bar{p} - 1) + \bar{m}^2(2b\bar{p} - 1)}{2(h\bar{f} + \bar{m})^2}$.

Характеристическое уравнение (4) имеет три корня, одно из которых $l = s$ всегда будет меньше или равно 1.

Тогда для изучения устойчивости нетривиального равновесия необходимо рассмотреть поведение корней уравнения $\lambda^2 - s\lambda + G = 0$. Согласно теореме Виета корни этого трехчлена находятся по формулам $\lambda_1 + \lambda_2 = s$, $\lambda_1 \cdot \lambda_2 = G$. Из уравнения $\lambda_1 + \lambda_2 = s$ следует, что $\lambda_1 = \lambda_{\max} > 0$,

так как $s > 0$, причем $|\lambda_2| < \lambda_1$. Это означает, что $\lambda_{\max} \neq -1$, а следовательно, через $\lambda = -1$ не может произойти потеря устойчивости ненулевой стационарной точкой.

Потеря устойчивости равновесного решения может произойти только при прохождении пары комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения через единичную окружность ($|\lambda| = 1$).

Критическое значение коэффициента рождаемости a , при котором равновесная точка теряет устойчивость, может быть найдено из выражения

$$a = \frac{2(h\bar{f} + \bar{m})^2}{(h\bar{f}^2(2\bar{p} - 1) + \bar{m}^2(2b\bar{p} - 1))}.$$

Исследование динамических режимов системы (2) удобно проводить последовательно, анализируя ее различные частные случаи.

Как видно из выражений (3), равновесные численности половозрелых самок \bar{f} и самцов \bar{m} нелинейно зависят от равновесной численности младшего возрастного класса \bar{p} . В связи с этим были рассмотрены следующие случаи: а) $\bar{p} = 1/2b$ и б) $\bar{p} = 1/2$ которые обеспечивают максимальную равновесную численность самок и самцов, соответственно. Для каждого случая определены равновесные решения, условия их существования и устойчивости.

1. Рассмотрим сначала поведение системы (2), когда $\bar{p} = 1/2b$.

Равенство $\bar{p} = 1/2b$ эквивалентно зависимости коэффициент b от других параметров

$$b = \frac{1}{2} \frac{(-4 + 4s + a)}{(-4 + 2sh + 4s - 2h + a)}.$$

Равновесные численности половозрелых групп, при которых в популяции наблюдается максимальная равновесная численность самок, определяются по формулам

$$\bar{p} = 1/2b, \quad \bar{f} = \frac{1}{8b(1 - s)},$$

$$\bar{m} = \frac{2b - 1}{8b^2(1 - s)}.$$

Из отношения $\bar{m} / \bar{f} = (2b - 1) / b$ следует, что параметр b должен удовлетворять условию $b > 1/2$.

Равновесное половозрастное распределение численностей при $\bar{p} = 1/2b$ устойчиво, если для параметров системы выполняется неравенство $a < h + 2(1 + h)(1 - s) + \sqrt{h(h(3 - 2s)^2 + 8(1 - s))}$. (5)

Если параметры системы изменяются таким образом, что неравенство (5) нарушается, то в системе возникают квазипериодические колебания численности, которые при дальнейшем изме-

нении параметров системы приобретают хаотический характер.

В фазовом пространстве системы появляется предельная инвариантная замкнутая кривая,

которая при изменении параметров (направленном вглубь неустойчивой зоны) разрушается с образованием сложных предельных структур (рис. 1).

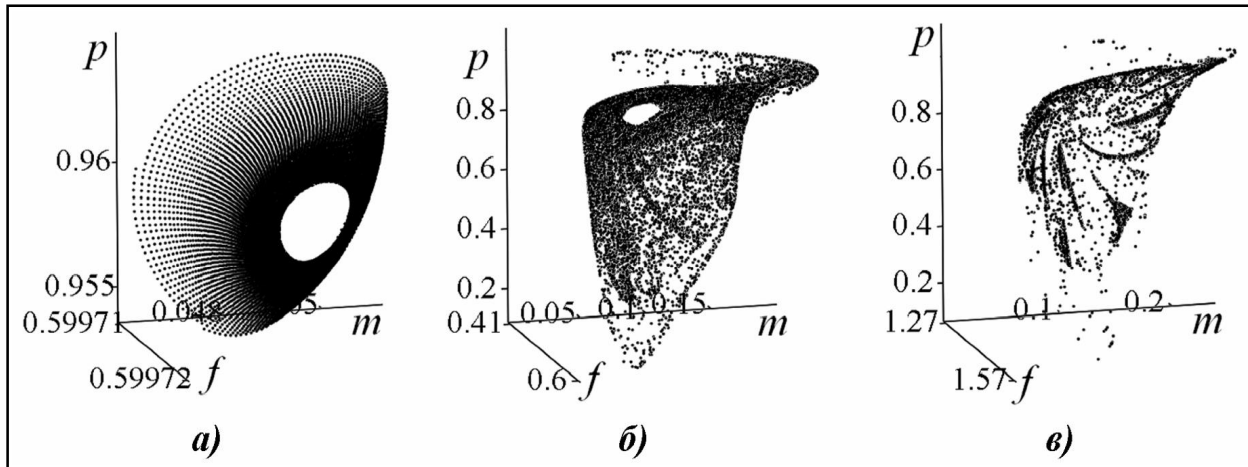


Рис. 1. Предельные траектории (аттракторы) при $\bar{p} = 1/2b$, $h = 0,01$:
 а) $a = 1,79779$, $b = 0,521075926$, $s = 0,6$; б) $a = 1,845$, $b = 0,516877637$, $s = 0,6$;
 в) $a = 0,78901$, $s = 0,8$, $b = 0,366577718$

Увеличение репродуктивного потенциала a приводит к потере устойчивости равновесного решения системы и появлению квазипериодических колебаний (рис. 2а).

Причем бифуркационное значение a уменьшается с ростом коэффициента выживаемости взрослых особей (s) и при больших значениях s удовлетворяющих неравенствам:

$$\frac{7h+6}{8(h+1)} + \frac{\sqrt{h(9h+8)}}{8(h+1)} < s < 1,$$

где $h < 0,5$ может оказаться даже меньше 1 (рис. 1в).

Уменьшение величины h , характеризующей зависимость рождаемости от соотношения полов (фактически, уменьшение «роли» самцов или увеличение их половой активности), также приводит к потере устойчивости равновесия и переходу к циклическим и хаотическим режимам (рис. 2б).

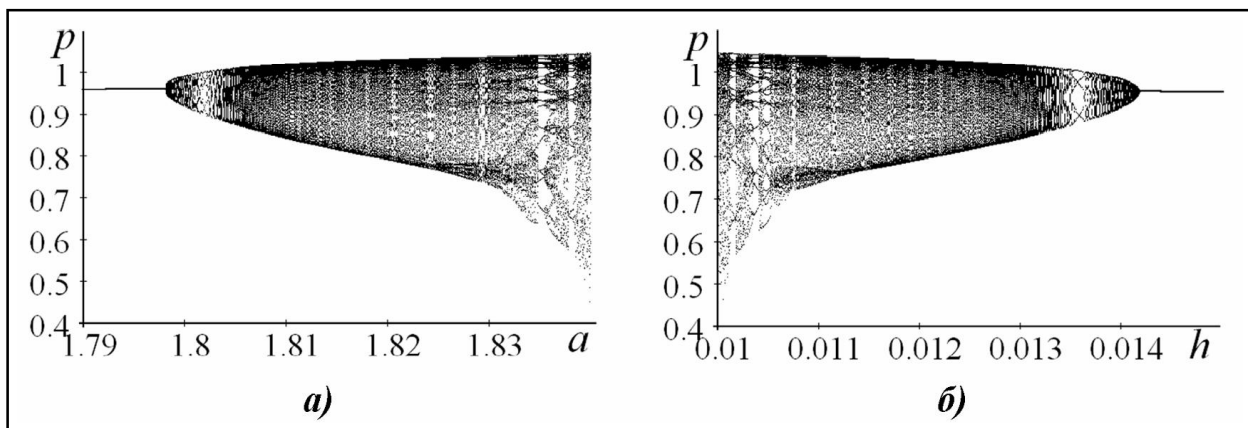


Рис. 2. Сценарии изменений предельных распределений численности особей младшего возрастного класса (p) в аттракторах системы (2) в зависимости от величин параметров a (слева) и (справа) при фиксированных значениях: а) $h = 0,01$, б) $a = 1,84$ и $s = 0,6$. Поведения предельных распределений численностей половозрелых самцов (m) и самок (f) аналогичны

2. Рассмотрим теперь поведение системы (2) в случае, когда $\bar{p} = 1/2$.

Максимальная численность самцов, т.е.

$\bar{p} = 1/2$, наблюдается, когда значение параметра b удовлетворяет равенству

$$b = 2 \frac{-2 + 4sh + 2s - 4h + a}{-4h + 4sh + a}$$

Равновесная численность половозрастных групп определяется по формулам

$$\bar{p} = 1/2, \bar{f} = \frac{2-b}{8(1-s)}, \bar{m} = \frac{1}{8(1-s)}$$

Из отношения $\bar{m}/\bar{f} = 1/(2-b)$ следует, что $b < 2$.

Равновесные значения численностей при $\bar{p} = 1/2$ устойчивы, если выполняется условие:

$$a < 1 + 2(1+2h)(1-s) + \sqrt{(3-2s)^2 + 8h(1-s)} \quad (6)$$

При нарушении неравенства (6) происходит потеря устойчивости равновесных значений численностей.

В результате возникают квазипериодические колебания, которые при изменении параметров системы приобретают хаотический характер (рис. 3).

Отметим, что потеря устойчивости происходит при $a > 1$.

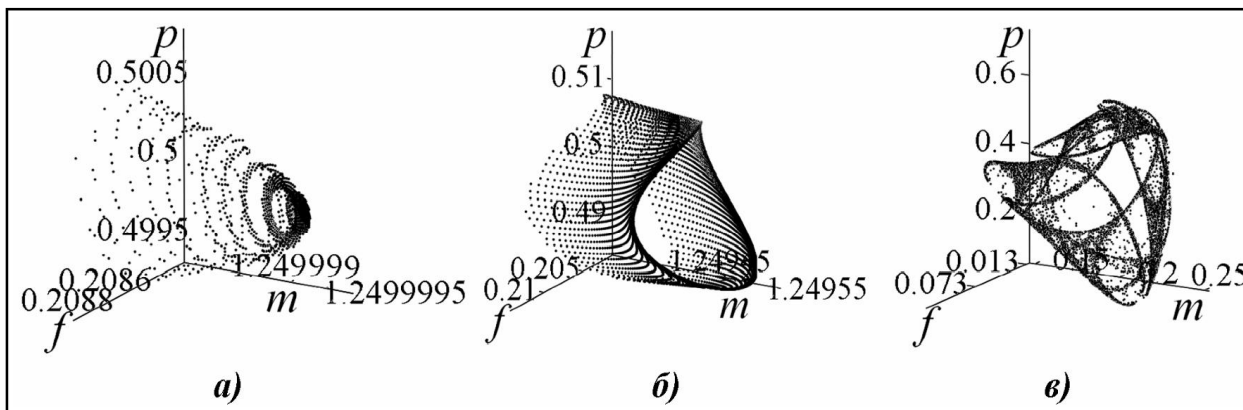


Рис. 3. Предельные траектории (аттракторы) системы при $\bar{p} = 1/2$, $h = 0,01$:
 а) $a = 2,3999$, $s = 0,9$, $b = 1,159628556$; б) $a = 2,409$, $s = 0,9$; $b = 1,162829636$,
 в) $a = 5,15$, $s = 0,5$, $b = 1,610136452$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы показали, что увеличение средней индивидуальной приспособленности особей (т.е. увеличение коэффициентов плодовитости и выживаемости) в экологически лимитированных популяциях может приводить к потере устойчивости и возникновению хаотических аттракторов. Такая хаотизация динамики неудивительна при больших репродуктивных потенциалах [9], характерных для многих животных: насекомых, рыб, птиц, мелких млекопитающих. Несколько неожиданной оказалась возможность появления хаотических режимов динамики численности при росте половых потенций самцов (например, при переходе к полигамному характеру размножения) и при уменьшении доли самцов, необходимой для успешного воспроизводства. Однако возможность перехода к полигамии в ряде случаев (например, при пониженной выживаемости самцов) фактически эквивалентна росту репродуктивного потенциала популяции, поскольку ведет к увеличению числа приплода, приходящегося на одну самку. Следовательно, здесь мы также имеем дело с увеличением средней приспособленности популяции. Весьма интересен полученный результат о возможности хаотизации популяционной динамики для видов с низкой плодовитостью, в

случае, когда регуляция роста численности осуществляется путем падения выживаемости неполовозрелых самцов с ростом численности популяции. Подобный механизм регуляции весьма характерен для полигамных видов и именно для них часто наблюдается нерегулярные длиннопериодические колебания численности [1, 8].

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке ДВО РАН (конкурсные проекты № 09-I-P15-01, № 09-I-ОБН-12, № 09-II-CO-06-006), РФФИ (проект № 09-04-00146), РФФИ и ЕАО (проект № 08-01-98505-p_восток_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Frisman E.Ya., Skaletskaya E.I. Kuzyn A.E. A mathematical model of the population dynamics of a local northern fur seal with seal herd // Ecological Modelling, 1982. V. 16. P. 151-172.
2. Hastings A. Age dependent dispersal is not a simple process: Density dependence, stability, and chaos // Theor. Popul. Biol. 1992. V. 41, № 3. P. 388-400.
3. Kooi B.W. and Kooijman S.A.L.M. Discrete Event versus Continuous Approach to Reproduction in Structured Population Dynamics // Theor. Popul. Biol. 1999. V. 56. № 1. P. 91-105.
4. Lebreton J.D. Demographic Models for Subdivided Populations: The Renewal Equation Approach //

- Theor. Popul. Biol. 1996. V. 49, № 3. P. 291-313.
5. *Lefkovich L.P.* The study of population growth in organisms grouped by stages // *Biometrics*. 1965. V. 21, P. 1-18.
 6. *Leslie P.H.* On the use of matrices in certain population mathematics. *Biometrika*. 1945. V. 33, № 3. P. 183-212.
 7. *Логофет Д.О., Белова И.Н.* Неотрицательные матрицы как инструмент моделирования динамики популяций: классические модели и современные обобщения // *Фундаментальная и прикладная математика*. М., 2007. Т. 13, № 4. С. 145-164.
 8. *Скалецкая Е.И., Фрисман Е.Я., Кузин А.Е.* Математическое моделирование динамики численности северного морского котика. Простейшая модель локальной популяции // *Жур. общ. биол.* 1980. Т. 41, №2. С. 270-278.
 9. *Фрисман Е.Я.* Странные аттракторы в простейших моделях динамики численности популяций с возрастной структурой // *Докл. РАН*, 1994. Т. 338, № 2. С. 282-286.
 10. *Фрисман Е.Я., Скалецкая Е.И., Храмов В.В.* Оптимальное управление размерами и структурой стад пятнистых оленей *Cervus pipron* на основе математической модели популяционной динамики // *Зоол. журн.* 1988. № 2.

COMPLEX DYNAMIC MODES OF POPULATION WITH AGE AND SEX STRUCTURE

© 2009 O.L. Revutskaya, E.Ya. Frisman

Institute for Complex Analysis of Regional Problems Far-Eastern Branch Russian Academy of Science,
Birobidzhan; e-mail: oksana-rev@mail.ru, frisman@mail.ru

We consider the nonlinear three-componential model of population number dynamics. It considers the sex and age structure dynamics and density-dependent effects impact on survival rates of a younger age class. We consider two special cases of the model, when maximum equilibrium number of females or males exists. We investigate some scenarios of the stabilized number transition to nonlinear modes of dynamics.

Key words: *population models, age and sex structure, stability, dynamic modes, chaos.*

РАСЧЁТ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР И ЭФФЕКТИВНОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ С УЧЕТОМ ОДНОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЫ

© 2009 В.А. Романенков¹, О.Д. Сиротенко², М.В. Беличенко¹, В.Н. Павлова²

¹ Всероссийский НИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, г. Москва; e-mail: vniia@online.ru

² Всероссийский НИИ сельскохозяйственной метеорологии, г. Обнинск; e-mail: vnp2003@bk.ru

Созданы модели расчета урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя, учитывающие взаимодействие климатических факторов, почвенных условий и разных доз минеральных удобрений для Нижегородской, Владимирской, Московской областей. Совпадение результатов моделирования на основе разных источников данных позволяет использовать данные Географической сети опытов с удобрениями для формирования равномерной сетки ежегодных оценок урожайности.

Ключевые слова: модель, урожайность, удобрения, зерновые культуры.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования, выполненные в XX в., показали, что в условиях характерного для России континентального климата гидрометеорологические факторы являются важнейшей причиной, определяющей междугодичную изменчивость урожайности, как при низком, так и при высоком уровне интенсификации земледелия. Новизна ситуации с учетом климатических изменений в агроклиматических исследованиях в XXI. в. состоит в том, что эпоха медленных изменений климата сменилась эпохой беспрецедентно быстрых климатических изменений. В ходе глобального потепления фактически после 1976 г. наблюдался монотонный рост глобальной и полусферной температур в масштабе десятилетий. Линейный тренд температуры воздуха за 1976-2007 гг. составил +0,18°C/10 лет для Земного шара, +0,23°C/10 лет для Северного полушария, +0,48°C/10 лет для территории России. Из 10 самых теплых для Северного полушария лет 8 наблюдались в последнем десятилетии [1].

В настоящей работе представлены результаты сравнительного моделирования урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя, учитывающие взаимодействие климатических факторов, почвенных условий и разных доз минеральных удобрений для одних и тех же территорий, но на основе различных источников и подходов моделирования.

МЕТОДИКА

В первом случае были использованы усредненные областные метеорологические наблюдения 455 станций на территории бывшего СССР

(данные Росгидромета) и данные Госкомстата России по среднеобластной урожайности. Для решения задачи оценки и прогноза последствий изменений климата на урожайность сельскохозяйственных культур предложена простая агрегированная зависимость приращения урожайности (ΔY) от приращения метеорологических факторов - среднемесячной температуры воздуха (ΔT) и месячных сумм осадков (ΔP):

$$\Delta Y = a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta P. \quad (1)$$

С помощью имитационной системы КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ [3] были получены зависимости между рядами урожайности и системой агроклиматических показателей по отдельным областям Нечерноземной зоны.

Во втором случае на основе наблюдений в краткосрочных и длительных опытах с удобрениями Географической сети опытов с удобрениями (Геосети) были созданы систематизированные электронные базы данных по сельскохозяйственным культурам, обобщающие многолетние ряды наблюдений за урожайностью и качеством продукции, климатическую, почвенную, агротехническую информацию.

Были построены несколько моделей продуктивности на основе полиномиальных уравнений регрессии методом последовательного включения переменных в программе Statistica 6. Выбор наиболее информативных параметров проведен на основе исследования надежности коэффициентов регрессии и с учетом возможности сравнимости моделей для различных территорий. Проведено определение устойчивости работы моделей для выборок с разной степенью окультуренности почвы, различных типов реализации погодных условий. Модели, показавшие результаты наиболее близкие к экспериментальным

данным, выбраны в качестве рабочих. На основании выбранных моделей проведен расчет прогнозных трендов изменения урожайности культур с учетом одновременного изменения климатических условий и плодородия почвы за пределами временных и пространственных рамок конкретного полевого опыта (группы опытов).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки возможности построения функционалов в соответствии с формулой (1) и оценки климатообусловленного тренда урожайности озимой пшеницы проведен расчет для территории

Нижегородской области. В качестве исходных данных взяты ряды температуры воздуха и месячных сумм осадков, полученные по данным станционных наблюдений месячного разрешения за период с 1976 по 2006 г. и входящие в базу данных Росгидромета. Урожайность озимой пшеницы по Нижегородской области за 1975-2006 гг. – данные Госкомстата.

С помощью функционалов ПОГОДА-УРОЖАЙ (1) были получены зависимости между рядами урожайности и набором агроклиматических показателей по отдельным областям Нечернозёмной зоны. Пример расчетов для Нижегородской области представлен в табл. 1.

Таблица 1. Оценки коэффициентов уравнений регрессии для расчета урожайности озимой пшеницы в Нижегородской области по агроклиматическим показателям

Независимая переменная	Форма представления влияющих переменных	B	σ_B	$t = \frac{B}{\sigma_B}$	p-level
наблюдаемые в течение 1976-2006 гг. $R=0,690$, $n=26$					
Свободный член	b_0	7.640737	7.016402	1.08898	0.286153
Температура, май	T_5	-0.454263	0.405544	-1.12013	0.272898
Осадки, май	R_5	0.092135	0.043109	2.13724	0.042153
Осадки, июнь	R_6	0.032813	0.029512	1.11187	0.276370
Средняя температура сентябрь-ноябрь	T_0	1.258488	0.546659	2.30215	0.029589
Осадки, март-апрель	R_V	0.076750	0.036491	2.10327	0.045270

Примечание: R - множественный коэффициент корреляции, n - объем выборки, B - коэффициент регрессии, σ_B - стандартная ошибка B . Значимые с $p < 0,05$ переменные выделены.

Таблица содержит оценки коэффициентов регрессии B для каждого влияющего на урожайность фактора, их среднеквадратические отклонения σ_B значения t -критерия, а также уровни доверительной вероятности p -level, характеризующие надежность коэффициентов регрессии. Как видно из табл. 1, наибольшую значимость обнаруживали майские осадки, осадки марта-апреля, рост которых приводил к увеличению урожайности, а также температурный режим осеннего периода начала вегетации. В этой связи в последующих этапах работы при поиске оптимальных моделей урожайности с учетом доз удобрений и агрохимических характеристик почвы проведена оценка эффективности азотных удобрений в соответствии с количеством весенних осадков, выпадающих в мае и апреле.

Полученные зависимости удовлетворительно воспроизводили областную динамику урожайности озимой пшеницы при проверке на независимой выборке, при этом коэффициент корреляции составил 0,69. Тем не менее, ограничением данного подхода для практического использования, например, на уровне хозяйства, является необходимость учета эффективности действия азотных

удобрений и различных уровней плодородия почвы.

В противоположность усредненным метеорологическим и урожайным данным, использованным в описанном выше исследовании, данные краткосрочных и длительных опытов с удобрениями Геосети имеют точную привязку к конкретному месту. На основе баз данных Геосети были сформированы и проанализированы следующие выборки:

1. Выборка по озимой пшенице для Нижегородской области содержит результаты наблюдений за 16 лет исследований, 165 строк. Дозы NPK варьируют в диапазоне 0-240, 0-290, 0-155 кг/га соответственно;
2. Выборка по озимой пшенице для Владимирской области содержит данные с 1970 по 1985 годы, всего 78 строк, дозы NPK изменяются в пределах 0-180, 0-180, 0-120 кг/га.
3. Выборка по ячменю содержит данные ЦОС ВНИИА за 26 лет исследований, включает 340 вариантов, варьирование доз NPK: 0-240, 0-180, 0-180 кг/га.

База данных содержала достаточный объем данных для получения выборок по типу почвы,

ее степени окультуренности и однородности применённых элементов агротехнологий.

Для обеспечения принципа однотипности почв, для выборки по Нижегородской области использовали только данные по серым лесным почвам, для Владимирской и Московской – по дерново-подзолистым. Каждую выборку разделили по степени окультуренности почв в соответствии с медианными значениями общих выборок. Для Московской области критерием разделения выборки было содержание подвижного P_2O_5 , равное 70 мг/кг (граница среднее-повышенное содержание), для Нижегородской - 150 мг/кг (граница повышенное-высокое содержание). В расчёт включили все имеющиеся характеристики почвы, дозы удобрений N, P, K, их квадраты и корни из них, температуру и осадки вегетацион-

ного периода. Кроме этих простых показателей для анализа были рассчитаны следующие комбинированные показатели: произведения дозы азотных удобрений на сумму осадков апреля и мая (NR_4 , NR_5) как отражение влияния погодных условий конкретного месяца на действие азотных удобрений; произведение рН и P_2O_5 для обнаружения опосредованного влияния окультуренности почв на урожай; ГТК мая, июня и июля как комплексная характеристика увлажненности. Регрессионный анализ проводили с помощью программы Statistica 6, методом последовательного включения переменных, с последующим выбором наиболее значимых и взаимно не повторяющихся с учетом их сравнимости для различных территорий. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристика уравнений регрессии для расчета урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя

область	почвенные разности	культура	объем выборки, n	Влияющие переменные	множественный коэффициент корреляции, R
Нижегородская	все	озимая пшеница	157	$h, N, T_7, N^2, pH^{0.5}, NR_4, GTK_5$	0,647
	наименее окультуренные	озимая пшеница	79	$h, N, T_5, R_5, N^2, pH^{0.5}, NR_4$	0,828
Владимирская	все	озимая пшеница	72	$T_5, NR_4, R_5, N^2, P+K$	0,916
Московская, ЦОС ВНИИА	все	озимая пшеница	256	$P^{0.5}, T_6, NR_4, R_5, h, P_2O_5, N_2, N, R_4$	0,812
	наименее окультуренные	озимая пшеница	139	$P^{0.5}, T_6, NR_4, R_5, h, P_2O_5, N_2, N$	0,851
	все	ячмень	329	$R_6, N, T_6, N^2, P_2O_5, T_4, R_4, R_5, NR_5$	0,818
	наименее окультуренные	ячмень	159	$R_6, N, T_6, N^2, R_5, T_5, pH^{0.5}, NR_5$	0,919

Теснота выявленных статистических связей между урожайностью зерновых, дозами удобрений, агрохимическими характеристиками почвы и метеорологическими условиями оказалась достаточно высокой – коэффициент детерминации R^2 оценивается величинами порядка 67-85%, кроме общей выборки по Нижегородской области (42%). Вместе с тем, все коэффициенты регрессии (за двумя исключениями) оказались значимыми при 5% уровне.

Выявлено, что для различных территорий не удастся осуществить подбор одинаковых влияющих факторов, тем не менее, для озимой пшеницы в условиях Центрального Нечерноземья важнейшими являются взаимодействия между дозами азотных удобрений (N) и условиями увлажнения на период возобновления вегетации, которые характеризуются осадками за апрель (R_4) для озимой пшеницы либо за май (R_5) для ячменя, дозы азота в степени 1 и 2 (N, N^2), температура, осадки мая (R_5, T_5) либо гидротермический коэффициент мая (GTK_5).

Таким образом, помимо апрельских осадков,

которые оказывают существенное влияние на эффективность азотных удобрений, на урожайность озимой пшеницы значимо влияют метеорологические условия на более поздних стадиях развития растений. Условия увлажнения, характеризующиеся осадками, способствуют повышению урожайности, о чем свидетельствуют знаки коэффициентов регрессии. Повышение температуры воздуха в мае и в июне приводит к снижению урожайности, что может быть обусловлено уменьшением влагозапасов пахотного слоя почвы. Влияние окультуренности отчасти нивелирует отрицательный эффект июньской температуры на озимую пшеницу, что видно по повышению абсолютной величины коэффициента при T_6 для выборки менее окультуренных почв. Для ярового ячменя наблюдается влияние окультуренности на снижение зависимости урожайности от майских и июньских осадков, но изменения влияния температурного режима не выявлено.

Полученные расчётные результаты сопоставлены с данными областной статистики за соответствующий временной период. На рис. 1 пока-

зано соответствие среднеобластных статистических данных (данные Госкомстата России по урожайности) и результатов моделирования (данные Геосети) по Нижегородской области за 1969-1984 гг. для сравнительно менее окультуренных почв при условии абсолютного контроля (азотные удобрения не вносятся). Полученная модель хорошо описывает динамику урожайности ($R = 0,65$) (табл. 2), при этом урожайность культур по выборке данных Геосети выше, чем по области. Это обстоятельство может быть связано как с

включением в выборку для построения модели только серых лесных почв, сравнительно более плодородных по отношению к почвам области, так и с более высоким уровнем плодородия участков проведения полевых опытов. Вместе с тем реально наблюдаемая динамика урожайности даже при условии большей окультуренности обнаруживает сходную направленность многолетней изменчивости, что видно по направлению линейного тренда.

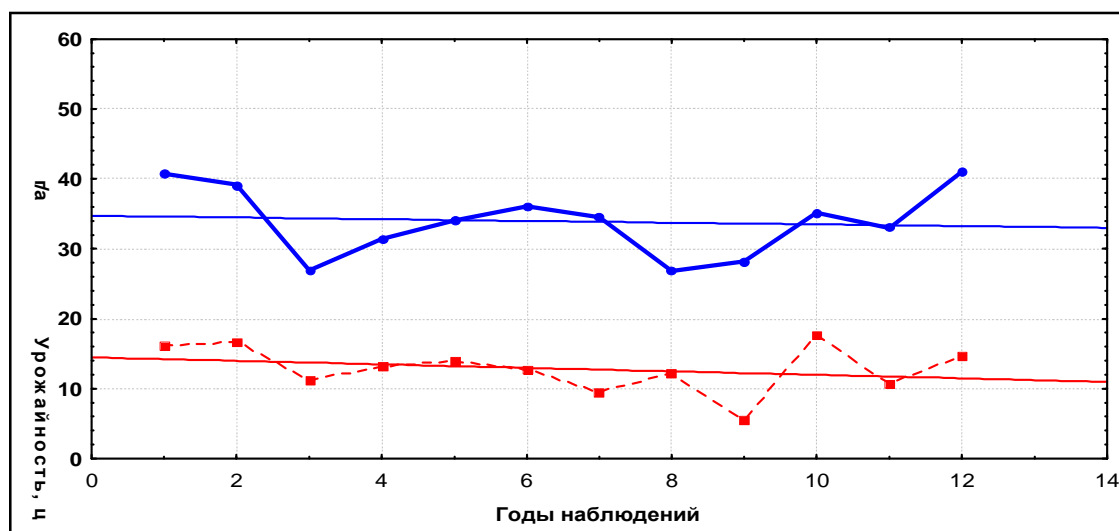


Рис. 1. Соответствие статистических данных (пунктирная кривая) и результатов моделирования (сплошная кривая) по Нижегородской области за 1969-1984 гг.

Другим примером является согласование результатов моделирования урожайности зерновых культур, полученных с помощью уравнений регрессии на основе базы данных Геосети и региональных оценок (рис. 2 и 3).

Для Нижегородской области за последние 37 лет снижение урожайности составляет 1,5-2 ц/га для всего массива данных. Устойчивые прибавки урожая обеспечиваются при росте доз N удобрений до 150 кг/га. Для почв с меньшей степенью окультуренности снижение составляло 2-2,5 ц/га, оптимальной дозой N в этом случае оказывается 100 кг/га. Для Владимирской области снижение эффективности применения N удобрений может достигать 3-4 ц/га. Оценка локальной изменчивости эффективности доз азотных удобрений, вносимых под яровой ячмень (на примере Московской области) показывает слабо выраженный положительный тренд климатообусловленной урожайности - около 1 ц/га за 37 лет, наиболее проявляющийся при дозах до 60 кг/га N, что может быть обусловлено наблюдаемым положительным трендом осадков за апрель-май. Те же закономерности наблюдаются на карте, в основу которой положены зависимости возможно-

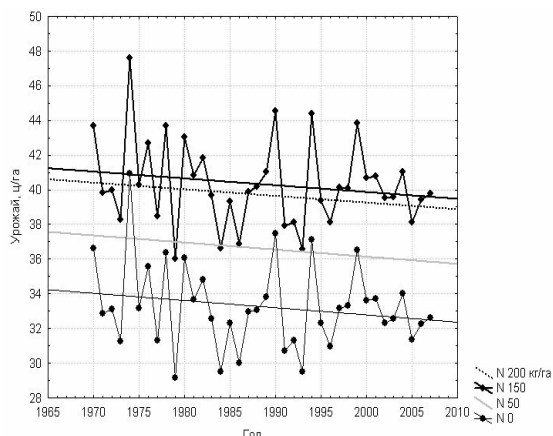
го изменения эффективности применения азотных удобрений за счет наблюдаемых изменений климата с использованием данных 69 станций Геосети, Госсортсети и Госкомгидромета, привлеченных А.П. Федосеевым [4] для оценки средней эффективности удобрений и данные гидрометеорологических наблюдений по 455 станциям на территории бывшего СССР за период с 1975 по 2004 г. [2] (рис. 3).

ВЫВОДЫ

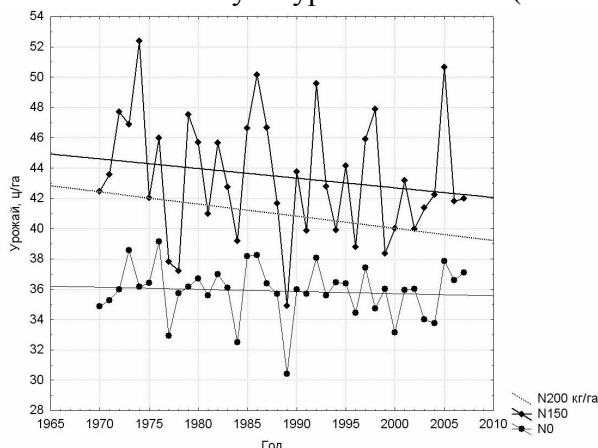
Представляемая методология позволяет оценить влияние наблюдаемых изменений климата на продуктивность основных сельскохозяйственных культур, повысить точность среднесрочного прогнозирования урожайности и окупаемости агрохимических средств при заданных параметрах систем сельскохозяйственного производства, оценить возможность ведения устойчивого земледелия для отдельных культур.

На основе статистических моделей, в которых учитывается роль климатических факторов формирования урожая, данные Географической сети опытов с удобрениями могут быть исполь-

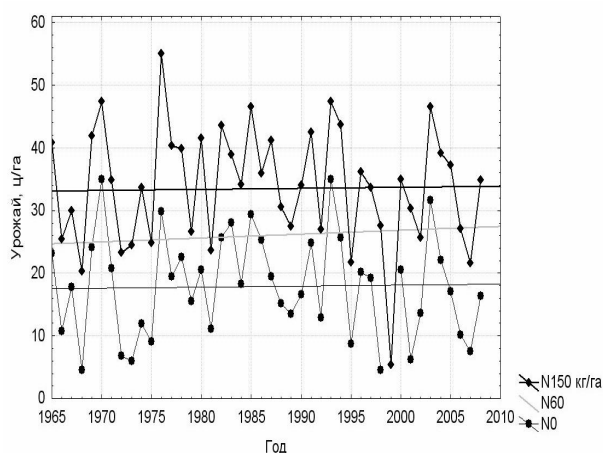
Нижегородская область, общая выборка (пшеница)



Нижегородская область, слабокультуренные почвы (пшеница)



Центральная опытная станция, Московская область (ячмень)



Владимирская область (пшеница)

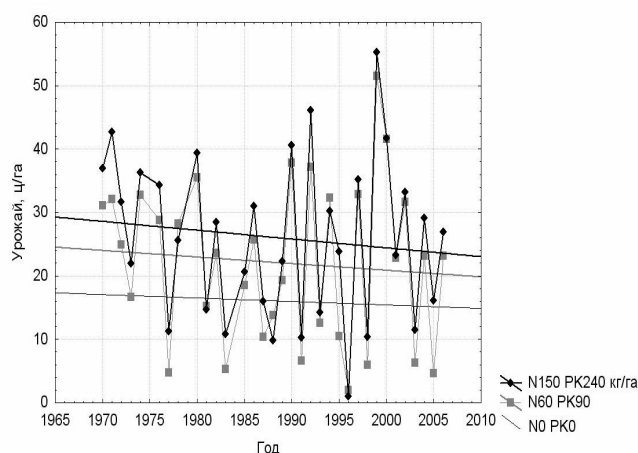


Рис. 2. Динамика рассчитанной в соответствии с уравнениями множественной регрессии (табл. 2) по метеорологическим данным урожайности и соответствующие многолетние линейные тренды для заданных доз минеральных удобрений и контроля (1970-2007 гг.)

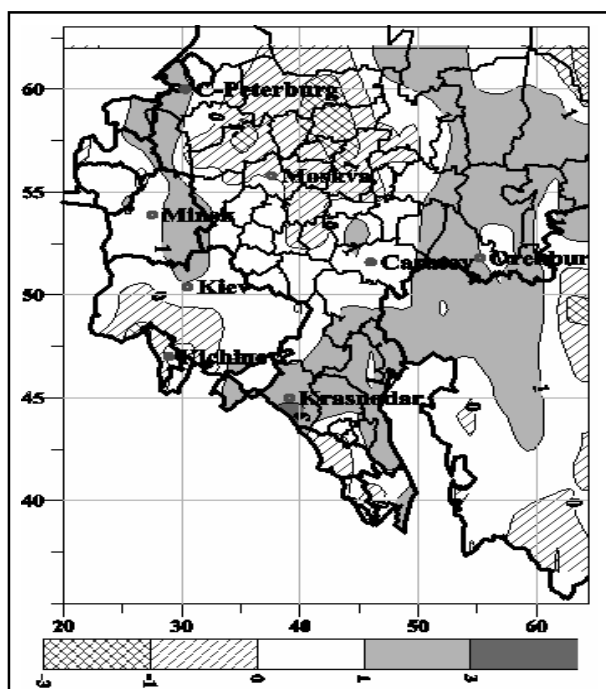


Рис. 3. Влияние климата на изменение средней эффективности применения азотных удобрений под озимые культуры (ц/га) за 1975 – 2004 гг. Рассчитано с использованием данных А.П. Федосеева [4] по базе гидрометеорологических наблюдений 455 станций на территории бывшего СССР за период с 1975 по 2004 г.

зованы для создания равномерной сетки ежегодных оценок урожайности при разной степени окультуренности почв и дозах применяемых удобрений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 07-05-13600.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М : Рос-

- гидромет, 2008. 227 с.
2. Романенков В.А., Сиротенко О.Д. Значение длительных полевых опытов в разработке мер по адаптации агроценозов к изменениям климата // Экологические функции агрохимии в современном земледелии. Материалы Всерос. совещ. М., 2008 г. С. 233-236.
3. Сиротенко О.Д. Имитационная система Климат-Урожай СССР // Метеорология и гидрология. 1991. № 4. С. 67-73.
4. Федосеев А.П. Агротехника и погода. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 240 с.

EXPERIENCE OF GRAIN CROPS PRODUCTIVITY MODELLING FOR THE NONCHERNOZEM ZONE OF RUSSIA ON THE BASIS OF THE GEOGRAPHICAL NETWORK OF EXPERIENCES WITH FERTILIZERS DATA

© 2009 V.A. Romanenkov¹, O.D. Sirotenko², M.V. Belichenko¹, V.N. Pavlova²

¹ The All-Russian scientific research institute of agrochemistry named after D.Prjanishnikov, Moscow, viua@online.ru

² The All-Russian scientific research institute of agricultural meteorology, 2Obninsk, vnp2003@bk.ru

Crop productivity models for winter wheat and spring barley, considering interaction of climatic factors, soil conditions and different rates of mineral fertilizers for the Nizhniy Novgorod, Vladimir, Moscow areas are created. Coincidence of the modeling results on the basis of the different data sources allows using the data of the Geographical network of experiences with fertilizers for calculation of a uniform grid of crop productivity estimates.

Keywords: *model, productivity, fertilizers, grain crops*

УДК 581.526

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВЕДЕНИЯ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА И ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА БАЛАНС БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД

© 2009 В.Н. Шанин¹, А.В. Михайлов¹, А.С. Комаров²

¹УРАН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, аспирант
Российская Федерация, г. Пущино; e-mail: shaninvn@gmail.com; alexey.mikh@gmail.com

²УРАН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино;
e-mail: as_komarov@rambler.ru

Индивидуально-ориентированная система моделей биологического круговорота углерода и азота в лесных экосистемах EFIMOD была использована для имитации динамики лесной растительности в региональном масштабе. В качестве входных данных использовались материалы лесоустройства; был разработан алгоритм генерализации таксационных данных. Имитационный эксперимент проводился при нескольких лесохозяйственных и климатических сценариях. Показано влияние режима лесопользования и значительных климатических изменений на баланс биогенных элементов в системе «лес-почва».

Ключевые слова: *имитационное моделирование, лесное хозяйство, баланс углерода.*

ВВЕДЕНИЕ

В лесах – одном из основных типов растительного покрова Земли – сконцентрировано 92% углерода, содержащегося в наземной растительности. Еще большая масса углерода законсервирована в мертвом органическом веществе лесов (детрите), а также в гумусе почв и торфяных отложениях лесных болот (Уткин и др., 2001). Поэтому прогноз баланса углерода в лесных экосистемах является одной из важнейших задач в экологическом моделировании, которой посвящено большое количество работ. В качестве примеров можно привести работу Д.Г.Замолодчикова с соавторами (2008) по Вологодской области с применением модели углеродного бюджета CBM-CFS и прогноз баланса углерода для одного из лесничеств Костромской области с помощью модели EFISCEN (Verkerk et al., 2006). Данная работа посвящена опыту применения индивидуально-ориентированной имитационной модели, параметризованной на уровне таксационного лесного выдела, для прогноза динамики углерода в лесных экосистемах на уровне лесничества с сохранением высокого уровня пространственной детализации, что, зачастую, недостижимо при использовании более генерализованных моделей регионального уровня.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовалась система моделей биологического круговорота углерода и азота в лесных экосистемах EFIMOD (Komarov et al., 2003; Моделирование динамики..., 2007), которая

служит для анализа динамики почвы и древостоя в лесных экосистемах бореальной и широколиственной 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. Для каждого дерева рассчитывается биомасса ствола, ветвей, листвы/хвои, скелетных и тонких корней. Каждое дерево взаимодействует с соседними, предусмотрены два аспекта взаимодействия: затенение и конкуренция за доступный почвенный азот. Система моделей состоит из четырех основных подмоделей: модели прироста биомассы отдельного дерева, пространственной модели древостоя, модели динамики органического вещества почвы ROMUL (Chertov et al., 2001) и статистического генератора климата, который имитирует изменение климатических показателей (температура, влажность почвы и др.).

Модель динамики органического вещества в почве включает в себя описание следующих пулов углерода и азота: органическое вещество (и соответствующий азот) лесной подстилки, стабильный (разлагающийся за несколько сотен лет) гумус минеральных горизонтов и лабильный (происходящий из корневого опада и разлагающийся за несколько лет) гумус минеральных горизонтов. Входными величинами являются опады древесных компартментов (сухостой и валеж рассматриваются как фракции опада), выходными – (кроме упомянутых пулов) эмиссия CO₂ из почвы и количество азота, доступного для питания растений.

Так как система моделей EFIMOD является индивидуально-ориентированной, она, в первую очередь, предназначена для оценки динамики лесных экосистем на локальном уровне, т.е. процесс моделирования происходит для таксационного выдела, который может иметь и относительно небольшие размеры. Однако при прогнозировании развития лесных экосистем нередко возникает задача моделирования динамики леса на больших территориях (например, лесничества), состоящего из большого количества выделов. Такой пространственно-детализованный подход позволяет, с одной стороны, оценить динамику территории в целом и выявить некие общие закономерности, и, с другой стороны, сохранить высокий уровень детализации, при котором можно анализировать динамику каждого конкретного участка (выдела), что делает возможным сравнительный анализ, а также позволяет использовать результаты моделирования при построении геоинформационных систем и пространственном анализе.

Для работы модели необходима такая информация, как видовой состав древостоя на участке, возраст, средняя высота ствола и диаметр на уровне груди для каждого вида, число деревьев на гектар, характеристики пулов органического вещества и азота 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 были рассчитаны по региональным таблицам хода роста, исходя из запаса конкретного вида и класса бонитета насаждения. Отсутствующие характеристики пулов органического вещества почвы оценивались, исходя из двух имеющихся параметров: типа лесорастительных условий по Воробьеву-Погребняку и доминанта древостоя (глава 5.5 кн. Моделирование динамики..., 2007). Для реализации различных сценариев лесопользования был создан специальный конструктор, позволяющий задавать все возможные типы и параметры лесохозяйственных воздействий: 1) продолжительность периода моделирования; 2) целевые породы в зависимости от типа лесорастительных условий; 3) систему посадок и рубок; 4) возраст рубки для каждого вида; 5) порядок рубки для каждого вида.

Однако моделирование на основе исходных наборов таксационных данных требует больших вычислительных ресурсов, а объемы полученных результатов чрезвычайно велики. Поэтому был разработан алгоритм генерализации данных лесоустройства. Согласно этому алгоритму, все имеющиеся в базе данных записи группировались

сразу по трем признакам: доминанту древостоя, типу лесорастительных условий по Воробьеву-Погребняку и группе возраста. Далее внутри каждой из групп проводилась генерализация характеристик: суммировались площади всех выделов, входящих в группу; 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 (описания 21637 лесоустроительных 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 превысила 11% для запаса органического вещества в древостое и 3% для запаса органического вещества в почве.

В качестве экспериментального объекта был выбран Мантуровский лесхоз Костромской области; использовались материалы лесоустройства 1997 года. На начало моделирования на территории преобладали пионерные сообщества – березняки, сосняки и осинники (86%), и только 14% территории занимали ельники. По возрастному составу территория была представлена молодыми и средневозрастными древостоями, только 16% площади были заняты древостоями старше 70 лет.

Для проведения модельного эксперимента были разработаны 3 лесохозяйственных сценария: 1 – без рубок; 2 – с выборочными рубками; 3 – с рубками ухода и последующими сплошными рубками, а также 2 климатических: 1 – при стационарном климате и 2 – в условиях климатических изменений (прогноз с помощью модели HadCM3, сценарий эмиссии A1Fi (Gordon et al., 2000)). Продолжительность периода моделирования составила 309 лет для сценариев со стационарным климатом и 103 года – для сценариев с изменением климата. Стоит отметить, что в сценариях с рубками рубки применялись ко всем выделам на модельной территории, что в реальной практике не встречается.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Имитационный эксперимент проводился на основе генерализованных данных. Результаты моделирования анализировались по следующим

переменным: 1) динамика запасов углерода в древостое, сухостое и валеже, пулах органического вещества почвы; 2) величина эмиссии углекислого газа; 3) чистая первичная продукция экосистемы; 4) видовой состав древостоя и его возрастная структура. Также проводилась оценка потенциального биологического разнообразия, в качестве которого выступали: 1) число одновременно присутствующих на выделе элементов леса и 2) возрастная структура древостоя. Под элементом леса понималась группа деревьев одного вида и одного класса возраста, обладающих схожими дендрометрическими характеристиками (Желдак, Атрохин, 2003).

Запас углерода в древостое при сценарии 1.1 испытывает долгопериодические (40-50 лет) колебания, связанные с изменением видового и возрастного состава, увеличиваясь к концу периода моделирования до 90-100 т/га (при начальном значении этого показателя около 46 т/га). Увеличение связано с развитием начальных древостоев из молодняков, как было указано ранее. При сценарии 2.1 наблюдаются частые небольшие колебания вследствие выборочных рубок, при общей тенденции к увеличению этого показателя до значений порядка 70-75 т/га. При сценарии 3.1 происходит снижение запаса углерода в древостое до 35-45 т/га. Можно отметить, что динамика запасов углерода в древостое более разнообразна, чем динамика запасов углерода в почве; причем данное разнообразие проявляется как при сравнении разных сценариев, так и при анализе временной динамики для одного сценария, где наблюдаются сильные флуктуации во времени этого показателя.

В сценарии 1.1 (без рубок, стационарный климат) запас углерода в почве сначала незначительно увеличивается, затем происходит его стабилизация на уровне порядка 65 т/га (при начальном уровне около 63 т/га). Возрастает доля стабильного гумуса минеральных горизонтов почвы при уменьшении доли лабильного гумуса минеральных горизонтов и лесной подстилки. В сценарии 2.1 (с выборочными рубками, стационарный климат) также происходит стабилизация запаса углерода в почве к концу периода моделирования, но на более высоком уровне – порядка 70 т/га. При этом наблюдаются частые колебания с небольшой амплитудой, вызванные разложением порубочных остатков. Как и в предыдущем сценарии, возрастает доля стабильного гумуса, но падают доли лабильного гумуса и подстилки. В сценарии 3.1 (с рубками ухода и последующей сплошной рубкой, стационарный климат) происходит снижение общего запаса углерода в почве до величин порядка 60 т/га, в основном за счет подстилки. При этом доля лабиль-

ного гумуса остается постоянной, а доля стабильного, как и в предыдущих сценариях, возрастает. Из вышеизложенного видно, что почвенные пулы органического вещества по-разному реагируют на лесохозяйственные сценарии. Стабильный гумус является буферным компонентом почвы и слабо реагирует на антропогенные воздействия, в отличие от лабильного гумуса и подстилки, количество которых может сильно колебаться вследствие поступления порубочных остатков в процессе рубок.

Если сравнивать реакции экосистем на разные климатические сценарии, можно отметить, что в сценариях с изменением климата (1.2, 2.2 и 3.2), которое выражается, в первую очередь, в повышении среднемесячных температур, происходит повышенное (по сравнению со сценариями со стационарным климатом) накопление углерода в фитомассе и меньшее его накопление в пулах органического вещества почвы.

При сценарии 1.1 формируются разновозрастные хвойно-широколиственные древостои, образованные поздне-сукцессионными видами (в основном елью, дубом и липой); пионерные виды (береза и осина) к концу периода моделирования исчезают практически полностью. Сценарий 2.1 приводит к формированию древостоев сходного состава, но с более высокой долей ели, на которую в данном сценарии направлено ведение лесного хозяйства. Сценарий 3.1 приводит к формированию преимущественно хвойных древостоев, сформированных видами, на которые направлено ведение лесного хозяйства: ели – на богатых почвах и сосны – на бедных. Сравнение со сценариями 1.2, 2.2 и 3.2 показало, что климатические изменения практически не повлияли на динамику видового состава древостоев (лишь в сценарии без рубок наблюдается увеличение доли широколиственных видов, в остальных сценариях влияние климата на видовой состав полностью нивелируется лесохозяйственными мероприятиями). При сценариях 1.1 и 2.1 наблюдается увеличение числа элементов леса и запаса сухостоя и валежа (более значительное в сценарии 1.1), что свидетельствует о возрастании структурного разнообразия растительности; сценарий 3.1 характеризуется постоянным числом элементов леса и небольшим запасом сухостоя и валежа в силу применения сплошных рубок главного пользования. При сценариях 1.1 и 2.1 формируются древостои с полночленными левосторонними возрастными спектрами; при сценарии 3.1 значительно преобладают деревья 1-6-го классов возраста, что также можно объяснить проведением сплошных рубок. Климатические изменения не оказали значительного влияния на видовой состав и возрастную структуру древо-

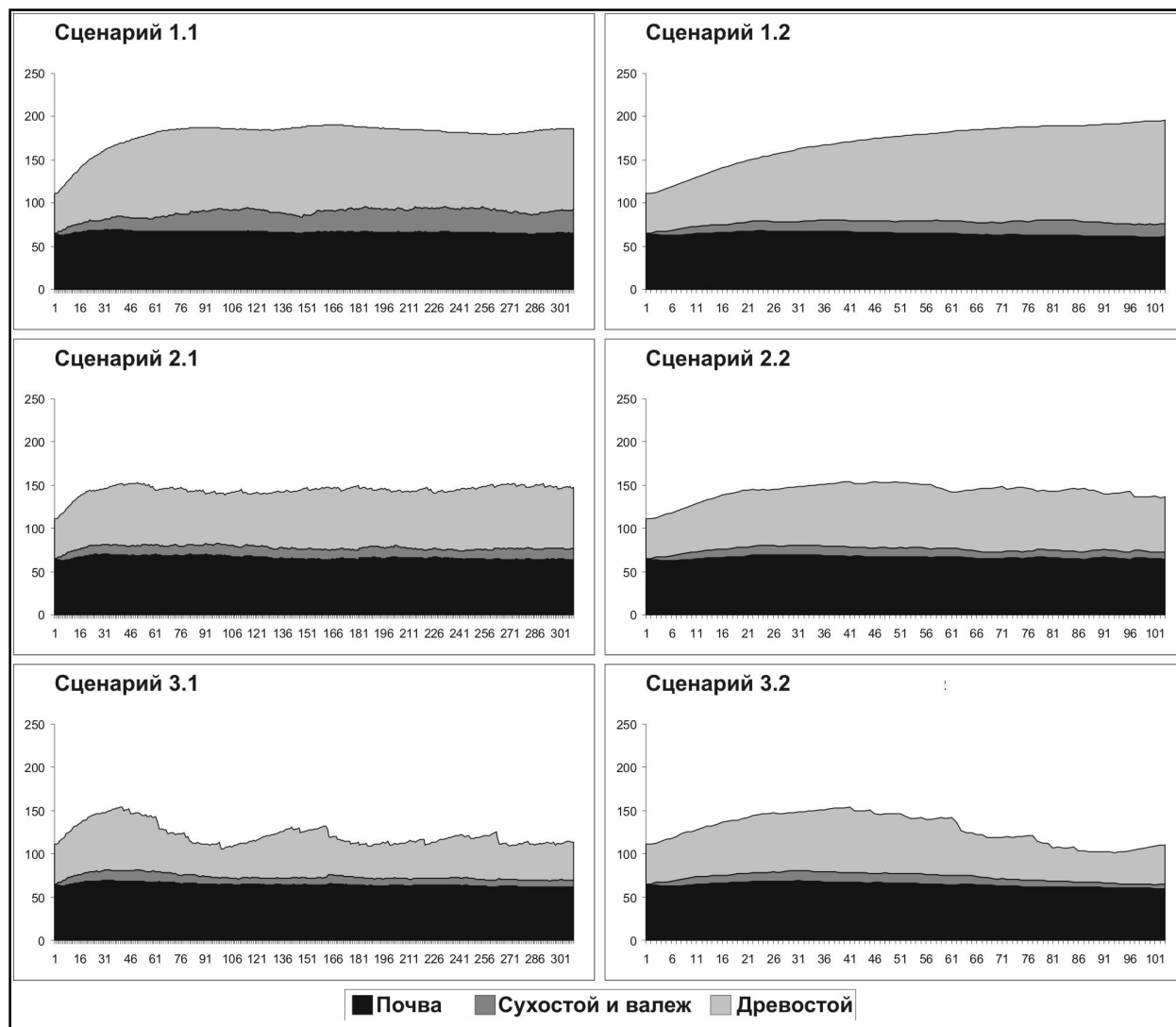


Рис. 1. Динамика запасов углерода в основных депо при различных сценариях лесопользования и при разных климатических сценариях. По оси абсцисс отложен шаг моделирования, по оси ординат - запас углерода (в т/га).

стоев.

Уровень чистой первичной продукции (NPP) может свидетельствовать об интенсивности накопления углерода в экосистеме и, таким образом, является показателем углеродного баланса. При сценариях 1.1 и 2.1 суммы NPP за 103 года практически равны (356 и 347 т/га, соответственно). При сценарии 3.1 значение этого параметра составляет 328 т/га (рис. 2). Практически одинаковые значения NPP для сценариев с рубками и без можно объяснить тем, что при отсутствии рубок происходит старение и, как следствие, начинаются процессы естественного распада древостоев в силу гибели формирующих их деревьев. Сменяющий их подрост до формирования сомкнутого полога характеризуется невысокими абсолютными значениями чистой первичной продукции. В то же время, рубки приводят к изъятию деревьев до того, как начнутся процес-

сы распада древостоев, сокращая, таким образом, продолжительность существования фазы с низкими значениями NPP. Суммарный объем эмиссии углекислого газа снижается от сценария 1.1 к сценарию 3.1. Следует отметить, что уровень эмиссии углекислого газа зависит от количества поступающего на почву опада. Чем меньше органического вещества изымается из системы, тем больше его вовлекается в процессы деструкции. Сравнивая между собой климатические сценарии, можно отметить, что при изменении климата (сценарии 1.2, 2.2 и 3.2) повышается уровень эмиссии углекислого газа вследствие ускорения деструкционных процессов в почве. Как следствие, увеличение количества доступных элементов питания в почве приводит к повышению уровня NPP при сценариях с «глобальным потеплением» (рис. 2).

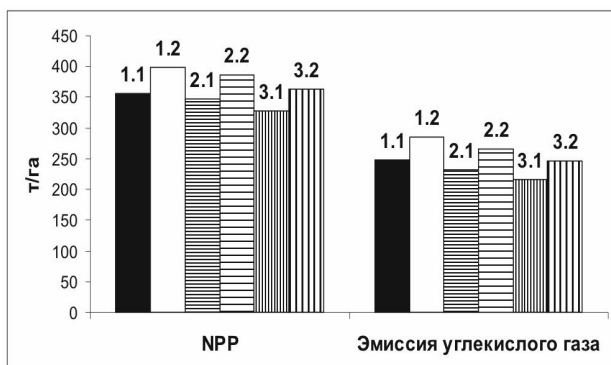


Рис. 2. Чистая первичная продукция экосистемы и эмиссия углекислого газа (сумма за 103 года в пересчете на чистый углерод) при различных сценариях.

Также следует обратить внимание, что количество заготовленной деловой древесины достаточно схоже для обоих сценариев с рубками. Для всей модельной территории за 103-летний период моделирования эта величина составляет: 570,37 млн. м³ для сценария 2.1 и 598,12 млн. м³ для сценария 3.1. Тем не менее, стоит отметить, что при достаточно близких объемах изъятия древесины, эти сценарии приводят к различным запасам углерода в фитомассе и почве, а также к сильно различающимся по видовому составу и возрастной структуре древостоям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была продемонстрирована возможность применения индивидуально-ориентированных моделей лесных экосистем для прогноза динамики лесной растительности на больших территориях с высоким уровнем детализации. Разработанная система позволяет реализовать различные сценарии, имитирующие разные системы ведения лесного хозяйства с возможностью их гибкой подстройки, позволяющей учесть специфику конкретного лесотаксационного выдела. Была разработана методика подготовки входных данных на основе материалов лесоустройства, включающая процедуры восстановления недостающей информации. Пространственно-временной анализ результатов модельного эксперимента при применении разных сценариев лесопользования показал, что наибольшее накопление углерода в лесной экосистеме происходит при сценарии без рубок. Анализ результатов также показал, что повышение среднегодовых температур влияет на перераспределение запасов углерода в органической форме между депо фитомассы и почвы в пользу первого. Показано, что лесохозяйственная практика оказывает решаю-

щее влияние на видовой состав, возрастную структуру и круговорот биогенных элементов в лесных экосистемах, практически полностью нивелируя эффект от климатических изменений. Также был разработан алгоритм генерализации исходных лесотаксационных данных, позволяющий сократить объем вычислений при моделировании без существенного ущерба для точности прогноза.

Работа поддержана Программой 16 Президиума РАН «Изменения природной среды и климата: природные катастрофы» и грантом РФФИ 09-04-01209.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L.* ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // *Ecological Modelling*. 2001. 138. P. 289-308.
2. *Gordon C., Cooper C., Senior C.A., Banks H., Gregory J.M., Johns T.C., Mitchell J.F.B., Wood R.A.* The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments // *Climate Dynamics*. 2000. 16. P. 147-168.
3. *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.
4. *Verkerk, P.J., J. Eggers, M. Lindner, V.N. Korotkov, S. Zudin*, 2006. Impact of wood demand and management regime on forest development and carbon stocks in Kostroma region. Proceedings of the international scientific conference on modern problems of sustainable forest management, inventory and monitoring of forests. St. Petersburg, 2006. P. 370-379.
5. *Желдак В.И., Атрохин В.Г.* Лесоводство: Учебник. Часть I. / М.: ВНИИЛМ, 2003. 336 с.
6. *Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н., Куриц В.А.* Оценка и прогноз углеродного бюджета лесов по канадской модели CBM-CFS // *Лесоведение*. 2008. № 6. С. 3-14.
7. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. / [отв. ред. В.Н. Кудеяров]. М.: Наука, 2007. 380 с.
8. *Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Честных О.В., Коровин Г.Н., Зукерт Н.В.* Леса России как резервуар органического углерода биосферы // *Лесоведение*. 2001. № 5. С. 8-23.

EFFECT OF FOREST MANAGEMENT REGIME AND CLIMATE CHANGE ON NUTRIENTS BALANCE IN FOREST ECOSYSTEMS: MODEL APPROACH

© 2009 V.N. Shanin¹, A.V. Mikhailov¹, A.S. Komarov²

¹Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of RAS, Pushchino;
e-mail: shaninvn@gmail.com; alexey.mikh@gmail.com

²Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of RAS, Pushchino;
e-mail: as_komarov@rambler.ru

The model system EFIMOD was used to simulate forest vegetation dynamics at regional scale. Model inputs were taken from forest inventory data; data generalization procedure has been developed. Simulation was carried out under different climatic scenarios and forest management regimes. It was demonstrated that management has much more significant effect on carbon balance in forest ecosystem than climate change.

Key words: *Imitating modeling, forest management, carbon balance.*

ПОТОКИ КАРТ ПЛАСТИКИ РЕЛЬЕФА – ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

© 2009 И.Н. Степанов, В.И. Степанова, И.П. Баранов, И.Ю. Винокуров

Российской Академии наук, г. Пушкино; e-mail: СЕК-МО@rambler.ru
Владимирский НИИ сельского хозяйства РАСХН (Владимирский ГУ)

Земная (почвенная, 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. Существующий «лоскутный» способ картирования для этой цели не пригоден. Производственные опыты на полях Владимирского ополья показали, что в создании почвенного плодородия принимают участие физические и информационные поля. Переход к новому квантово-механическому пониманию агроэкосистем открывает новую страницу в земледелии, что предполагает возможность управления физическими полями агроэкосистем на базе нанотехнологий. Почвенно-экологические системы, выделяемые на картах методом пластики рельефа, относительно упорядочены, что позволяет приближенно описать их с помощью понятий аппарата теории симметрии.

Ключевые слова: пластика рельефа, агроэкосистемы, симметрия.

ВВЕДЕНИЕ

Многолетний опыт картирования почв и экосистем позволяет нам утверждать, что выделяемые на современных тематических картах формы природных объектов не отражают реальность. Причина – игнорирование горизонталей карт рельефа, которые образуют в форме семи-континуума исходную динамическую структуру земной (почвенно-экологической) поверхности. Отсюда – произвол в проведении границ экосистем, почв и горных пород. Нами предложен метод пластики рельефа, который переводит семи-континуум горизонталей в дисконтинуум, создавая динамические паттерны выпуклые ареалы – потоки на фоне вогнутостей – подложки (инерциальной системе отсчета). Впервые в мировой картографической практике в теорию картографии вводится понятие «механическое движение почвенно-геологических тел-потоков по подложке». Формы движущихся тел-потоков напоминают структуры физических полей, что позволяет переходить от геометрических описаний структуры почвенных поверхностей к информационным и полевым структурам, описываемым методами теории симметрии. Опытами на агроландшафтах в первом приближении установлено влияние физических полей на состояние растений и почв (Винокуров, 2007; Лопачев, 2008).

МЕТОД ФОРМАЛИЗАЦИИ ПОЧВЕННЫХ ГРАНИЦ

Любая тематическая карта создается на основе горизонталей (рис. 1, А). Нами найден спо-

соб их геометрического преобразования, который заключается в том, что на каждой горизонтали выделяются точки нулевой плановой кривизны, которые затем соединяются изолинией – морфо-изографой (рис. 1, В). В результате на карте пластики рельефа создается выпукло-вогнутая поверхность с естественными ареалами – «динамическими потоками» или «паттернами движения», используемые в синергетике. Каждый такой поток имеет начальную точку (репеллер), а его концевые части всегда «устремлены» к самым низким точкам (или линиям) бассейна стока, названным аттракторами. В процессе эволюции потоки ветвятся в точках бифуркации, создавая дискретные уровни организации почв разного возраста и свойства. Метод пластики противопоставлен традиционному «фактологическому» или «рекогносцировочному» методу с элементарными почвенными ареалами (ЭПА) (рис. 1, С), на основе которого построены все ныне существующие почвенные и ландшафтные карты. Если метод пластики (В) обязывает выделять каждое повышение и понижение, фиксированное изгибами горизонталей (А) в виде паттернов движения, то традиционный «фактологический» метод, как видно из рис. (С), не замечает этих различий, произвольно, без правил, объединяя в один выдел все понижения и повышения. Потоки-паттерны отражают движение почвенного вещества, а ЭПА – их статику.

Необычные по красоте естественные древовидные узоры возникли в результате длительного взаимодействия гравитационных, электромагнитных и других полей (рис. 2). По этим структурам простые люди ходят, не замечая их. Но

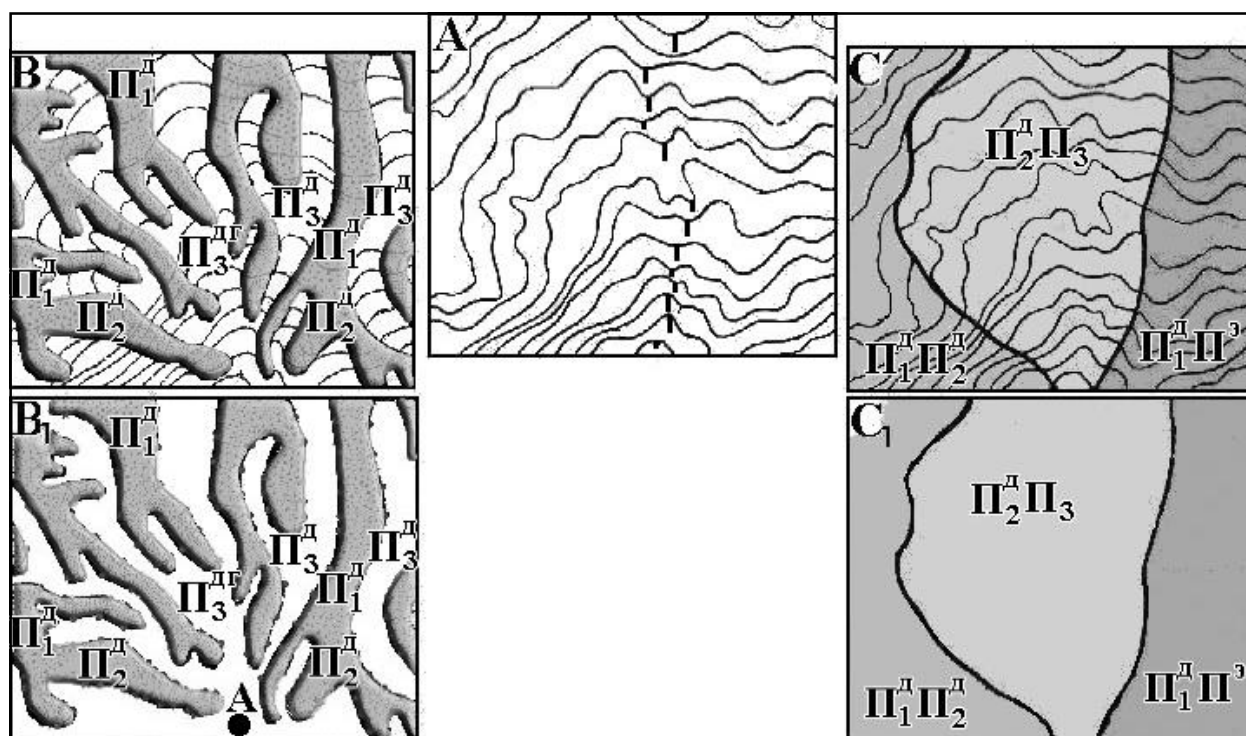


Рис. 1. Сравнение узоров (паттернов движения) двух почвенных карт В и С, выявленных по одним и тем же горизонталям карты рельефа М 1:10 000 (А). В – карта пластики рельефа; С – карта элементарных почвенных ареалов (Методические рекомендации, 1989). На карте А даны горизонтали с бергштрихами. На карте В выпуклости-потоки (закрашены), белый фон – вогнутости. На картах В₁ и С₁ горизонтали сняты, на В₁ сохранены по внешней стороне потоков точки – места пересечения горизонталей, что позволяет восстановить их.

их, к сожалению, не видят картографы, рисуя на «фактологических» картах вместо этих чудесных узоров карт пластики рельефа уродливой формы «лоскуты» и «куски» (рис. 1,С). «Лоскуты» создают искаженное нереальное представление о земной и почвенной поверхности и приводят к применению в науке таких несуществующих форм рельефа, как «равнины», «долины», «холмы» и др. Геометрический анализ горизонталей показывает, что земная кора представлена потоками, сплошь покрывающими материки, дно морей и океанов. Местоположение почвы на том или ином участке потоковой системы становится важным фактором в определении их свойств.

Как видно из рис. 2, в природе нет вымышленных и примитивно представляемых на картах «равнин» и «долин» (рис. 1,С); им суждено оставаться только в эмпирии наук о Земле. В теории же имеют место естественные тела – древовидные потоки, которые образуют наносы, коры выветривания и почвы не только в плане (рис. 2, В, С, D), но и пронизывают ее в мелкоземистых толщах по вертикали на километровые глубины (рис. 2, А), напоминая рост деревьев и ставя загадку в их генезисе. Видимо, подъемы и опускания участков земной коры связаны с повышенным или замедленным ростом «древовидных»

потоков, вызываемых на платформах пликативной тектоникой (Степанов, 1986, 2003, 2006). Экологам следует фиксировать на тематических картах естественные формы потоков, согласно правилам (рис. 1,В), а не придумывать не существующие в природе ареалы (см. рис. 1, С). Потоки приближают нас к точным наукам, так как имеют сходство с диссипативными структурами и фракталами. Потоковые карты составлялись прежде последователями В.В. Докучаева. Например, такая почвенная карта издана в 1923 г. ведущими учеными М.М. Филатовым, С.А. Захаровым, Р.И. Ильиным и другими на территорию Московской губернии (Степанов и др., 2009). Но уже с середины XX в. в России стали издаваться на государственном уровне почвенные карты с «лоскутными» структурами. Причина перехода с «потоковых» карт на «лоскутные» в литературе не обсуждалась.

Выявление древовидных узоров и установление механизма их происхождения, распространения, влияния на эволюцию живого вещества – важная задача экологии XXI в. Она может послужить формализованной опорой для создания сельскохозяйственной информационной системы (СИС), вместо геоинформационной системы (ГИС), исходные уровни организации которой

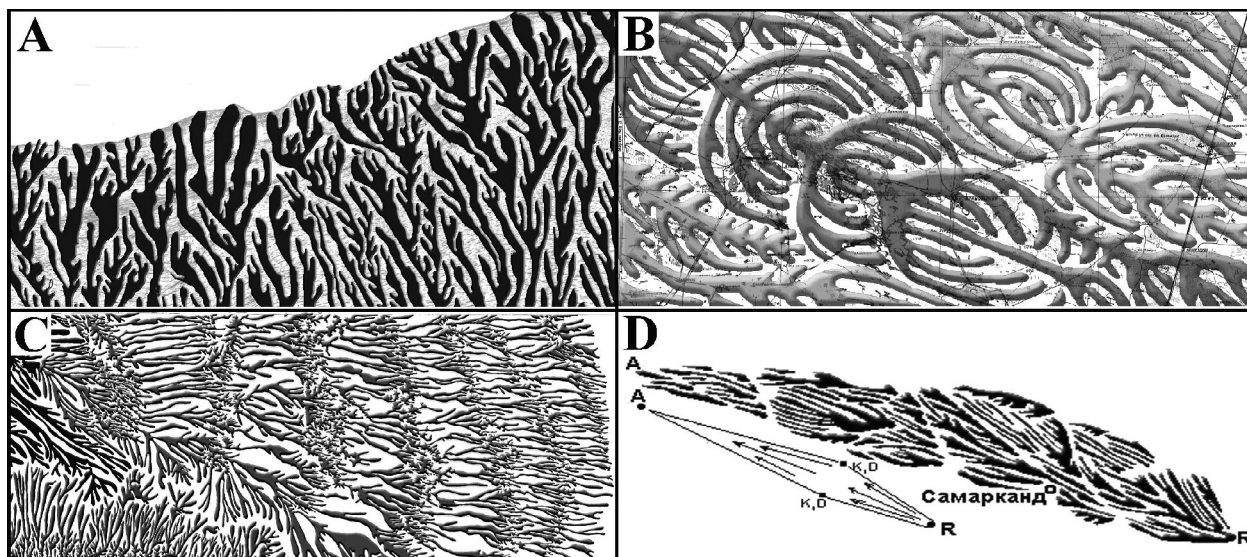


Рис. 2. Древовидные системы на картах пластики рельефа длиной около 100 км (В - Прикаспий, С – долина р. Терек, D – долина р. Зеравшан), а также вертикальный геологический профиль толщи рыхлых отложений Африки (Нигерия) до глубины 3 км (А)

представлены аэрокосмическими снимками и неверно трактуемыми (рис. 1,С) картами рельефа с горизонталями, создающими серию «лоскутных» тематических карт.

СИММЕТРИЗАЦИЯ ПОТОКОВ

Потоки – носители информации о прошлом и настоящем движении земного вещества в поле земного тяготения. Нами они формализованы с помощью теории симметрии (рис. 3) с тем, чтобы как математические символы использовать в программах ЭВМ. Почвоведение ранее основывалось на понятиях «сходство-различие». С 1970 г. вместо этой пары мы стали изучать пару «структура – функция», что резко повысило уровень знания почвоведения. Для этого формы потоков рис. 3 упрощены и скелетизированы (схематизированы) в целях получения абстрактных геометрических структур (показано справа,верху тонкими линиями). Процедура не простая, требует навыка, понимания процесса формализации, который всегда сопровождается упрощением конфигураций, потерей несущественной информации. Скелетизация позволила создать идеализированный образ почвенно-геологического ареала путем отвлечения от деталей и схватывания наиболее существенных черт геометрического строения земной поверхности. При скелетном представлении структуры непрерывно становятся все более тонкими и сглаживаются вплоть до сохранения только элементов, составляющих его «каркас». Информативность скелета определяется тем, что он сохраняет ряд значимых свойств исходного изображения: связность, ориентацию

главной оси и боковых осей, симметрию. Для изучения реальной системы, мы замещаем ее (с точностью до изоморфизма) абстрактной системой с теми же отношениями. Таким образом, задача становится чисто математической, использующей симметрию (рис. 4).

Методы симметрии, изложенные Шубниковым и Копциком (2004), позволили нам формализовать формы потоковых структур. Судя по рис. 4, теперь имеется в почвоведении хотя и небольшой, но все же опыт представления пространственных почвенных, геологических, ландшафтных структур в виде геометрических символов или формул - буквенных индексов-операторов. Эта проблема требует самостоятельного изучения.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПЛАСТИКИ РЕЛЬЕФА В ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ ОПЫТАХ

Анализ опытных данных агроэкосистем Владимирского ополья (Винокуров, 2007) производился по двум схемам, используя крупномасштабные почвенные и агрохимические карты, составленные двумя разными методами. 1- Результаты опытов сопоставлялись с ареалами традиционных карт, которые имели *плоские*, однородные, изотропные и изолированные друг от друга равновесные поверхности; 2 – Те же результаты опытов наносились на карты, составленные методом пластики рельефа, ареалы которых – потоки имели *искривленные*, неоднородные, анизотропные, далекие от равновесия поверхности, каждая точка которых функционально и генетически связа-

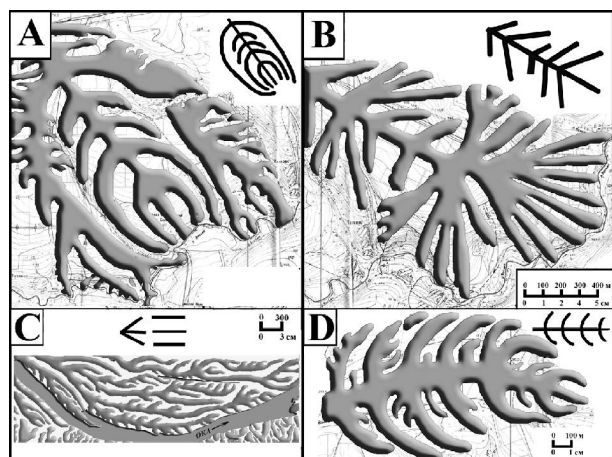


Рис. 3. Почвенно-экологические паттерны движения (поточковые структуры): А, В, Д – бассейн реки Восьма (приток Оки); С – часть поймы Оки в районе Приокско-Террасного заповедника Московской области М 1: 10 000

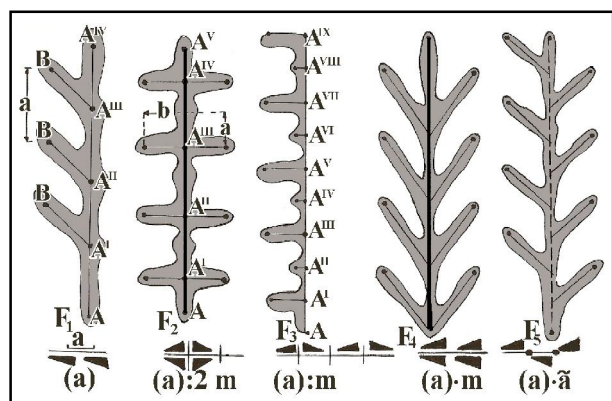


Рис. 4. Пять почвенно-экологических паттернов движения (поточковых структур) ($F_{1,5}$) и характеризующие их символы симметрии в виде сочетания фигур по элементам симметрии и формул симметрии (внизу). Тонкие горизонтальные линии – оси переносов (a); толстые линии – обыкновенные плоскости m, проходящие перпендикулярно к чертежу; штриховые линии – плоскости скользящего отражения g; двоеточие в символах (:) означает перпендикулярность, одна точка (·) – параллельность

на с соседними точками. По этим разным по своей природе ареалам (плоским и искривленным) изучалась кинетика нитрификации серых лесных почв. Кинетику нитрификации удалось описать логистическим уравнением Ферхюльста

$$\frac{dx}{dt} = rx \left(1 - \frac{x}{K} \right).$$

Здесь r константа скорости процесса нитрификации, K – экологическая емкость, x – текущая концентрация нитратов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Было показано, что продуктивности и воспроизводство плодородия для различных органо-минеральных систем удобрений на плоских почвенных системах, хорошо коррелируют с величинами отношения K/r , а константы нитрификации коррелируют с величинами начальных концентраций нитратов для всех плоских ареалов (рис. 5 А). На «искривленных» ареалах (В, С, Д) зависимость $r = f(\lg C_{NO_3})$ теряет линейный характер, который был присущ «плоскому» ареалу (А). 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). 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 (рис. 5 С). Профиль величин продуктивности и величин отношений K/r по элементарным ареалам криволинейной поверхности почвенной системы имеют волнообразный синхронный характер. Такой же характер обнаруживают величины содержания азотобактера (*Chroococcum*).

На рис. 5 приведены лишь некоторые из многих графиков, показывающие различия в протекании тех или иных процессов на «плоских» и «кривых» поверхностях, которые обозначены на новых потоковых картах (пластики рельефа) и отсутствуют на традиционных плоских картах.

Полученные результаты невозможно интерпретировать, опираясь только на законы механики, обуславливающие явления переноса вещества в пространстве. В криволинейных почвенных телах, изображаемых на картах пластики рельефа, необходимо учитывать и влияние физических полей, которые в почвоведении успешно изучаются много лет, но без применения к картографическим потоковым структурам – силовым линиям земного тяготения, и к сельскохозяйственным опытам. Хотя известно о взаимодействии электромагнитных и гравитационных полей в природе.

ВЫВОДЫ

Наше стремление формализовать процедуру составления тематических карт для целей земледелия привело к установлению на новых картах пластики рельефа потоков – реальных физических структур земной поверхности. К их изучению теперь можно привлечь методы приближенной симметрии, а не обозначать произволь-

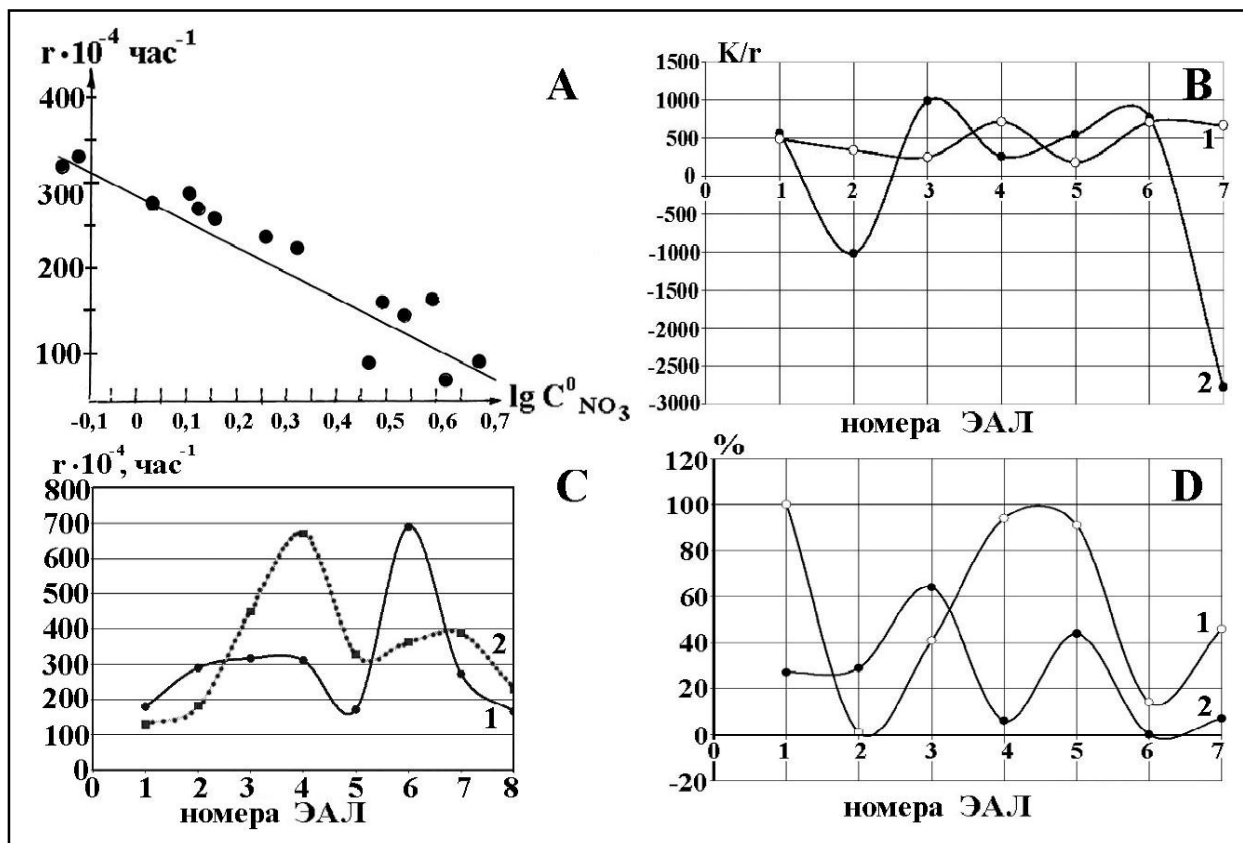


Рис. 5. А - Зависимость константы скорости нитрификации от логарифма начальной концентрации нитратов на «плоских» ареалах; В - Параметры устойчивости для «кривых» ареалов; С - Константы скорости нитрификации на «кривом» ареале: контрольная полоса (ряд 1) и антропогенное наращивание минеральной компоненты $N_{40}P_{40}K_{40}$ на соседней полосе (ряд 2), осень 2004 г.; Д - Содержание азотобактера (*Chroococcum*) на «кривой» поверхности

ные ареалы традиционных карт буквенными индексами или значками, под которыми ошибочно принимают понятие «пространственная структура». По сути, истинными структурами земной поверхности еще никто не занимался. Их установление возможно только на картах пластики рельефа, где структуры являются результатом движения почвенных масс, а не случайных эмпирически обнаруживаемых форм элементарных ареалов (ЭПА) и их общностей (ЭПС), как показано В.М. Фридландом (1972) и его последователями. ЭПА имеют ровную поверхность, одинаковый по всей площади контур состав почв, они изотропны (отсутствует пространственная ориентация, тренд, векторизация), статичны, находятся в состоянии равновесия. Такие безликие «структуры», называемые «фактологическими» или «рекогносцировочными» описывались словами и показывались на картах условными знаками. Они не выявляют ни генезис, ни эволюцию почв. Появление карт пластики рельефа позволило, используя теорию симметрии и теорию физического подобия, не только количественно описать реальные почвенные структуры (рис. 3), но и показать их роль в процессе экологической

дифференциации эволюционирующей почвенной поверхности.

Метод пластики рельефа с выделением паттерн движения использован в сельскохозяйственной практике на полях Владимирского НИИ с.-х. (Винокуров, 2007) и учебного хозяйства Орловского аграрного университета (Лопачев, 2008; Степанова, 2009). Многие века земледелие основывалось на данных о почве как твердотельном образовании, плодородие которого зависело от минералов, органического вещества, воды и воздуха. Все внимание было обращено на поведение этих составляющих. Видимо, наступило время точного (прецизионного) и нанотехнологического земледелия, когда в процесс повышения плодородия агроэкосистем могут быть включены физические и информационные поля.

При проведении опытов наблюдались загадочные явления: внесение удобрений на одном склоне приводило к изменению пространственной структуры продуктивности криволинейной системы на другом склоне, куда удобрения не вносились. Перенос компонентов удобрений с поверхностным или внутрипочвенным стоком с одного склона на другой исключается. Остается

предполагать возможность биогеохимического и физического взаимодействия между почвами указанных агроэкосистем в результате пока еще скрытой от глаз деятельности информационных и физических полей. Для проверки этого феномена нами проведены расчеты данных опытов, показывающие участие физических полей в образовании почв.

Использование точного знания в изложенном выше методе пластики рельефа позволяет использовать карты потоковых структур (паттернов движения) для создания СИС - сельскохозяйственной информационной системы с входящими в нее подсистемами: земледельческой (ЗИС), агрохимической (АИС), почвенной (ПИС) и других, которые ныне представляют банк данных ГИС – геоинформационной системы. В основе ГИС лежат аэрофотоснимки, а в основе СИС – преобразованные горизонталы карт пластики рельефа – физико-математическая основа, высокоточная, наглядная и объективная система отсчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винокуров И.Ю. Эволюция почвенных экосистем: Химическое загрязнение, саморегуляция, самоорганизация, устойчивость. М.: Юркнига, 2007. – 320 с.
2. Лопачев Н.А. Экспериментально-теоретические основы использования потоковой структуры агроэкосистем в прецизионном земледелии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора с.-х. наук. Орел., 2008, 42 с.
3. Методические рекомендации. Составление крупномасштабных почвенных карт с показом структуры почвенного покрова. М., Почвенный институт им. Докучаева, 1989.- 56 с.
4. Степанов И.Н. Формы в мире почв. М., Наука, 1986. – 192 с..
5. Степанов И.Н. Пространство и время в науке о почвах. М., Наука, 2003. – 184 с.
6. Степанов И.Н. Теория пластики рельефа и новые тематические карты. М., Наука. 2006.-230с.
7. Степанов И.Н., Степанова В.И., Баранов И.П., Голубчиков Ю.Н. О малоизвестной почвенной карте Московской губернии М.М.Филатова// «Геоэкология», 2009, №4, с.358-370.
8. Степанова В.И. О новом геоинформационном содержании почвенно-агрохимических карт// «Агрохимия», №7, 2009. с. 81-84
9. Фридланд В.М. Структуры почвенного покрова. М., Мысль, 1972, 424 с.
10. Шубников А.В., Копчик В.А. «Симметрия в науке и искусстве». 2004.

FLOWS PLASTIC RELIEF MAPS - PHYSICAL AND MATHEMATICAL ECOLOGICAL SYSTEMS

© 2009 I.N. Stepanov, I.P. Baranov, V.I. Stepanova, I.Ju. Vinokurov

¹Institute for Biological Instrumentation of the Russian Academy of Sciences (IBI RAS);
e-mail: CEK-MO@rambler.ru

²Vladimir Research Institute of Agriculture of Russia Academy of Agricultural Sciences,
Vladimir State University

The behavior patterns of the soil surface as a physical and mathematical systems for plastic relief maps. We give a characterization based on systems theory, as well as the physical fields.

Key words: *plastic relief, agroecosystems, symmetry.*

УДК 519.6:[574+504.7]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РОЛИ БИОСФЕРЫ В КОМПЕНСАЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ ГЛОБАЛЬНОГО ЦИКЛА ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА

© 2009 А.М. Тарко

Учреждение Российской академии наук Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН,
г. Москва; e-mail: tarco@himki.net

На основе пространственной математической модели глобального цикла двуокиси углерода в биосфере рассчитано поглощение выбросов двуокиси углерода от сжигания органических топлив, вырубки лесов и эрозии почв экосистемами суши, странами и регионами мира. Сделаны расчеты последствий ограничений выбросов CO_2 в атмосферу на основе различных сценариев выполнения Киотского протокола к Рамочной конвенции о стабилизации климата. Показано, что Россия находится в исключительном положении относительно других стран: экосистемы ее территории больше других стран поглощают CO_2 атмосферы, а индустриальные выбросы с ее территории практически равны поглощению.

Ключевые слова: *математическое моделирование, глобальный биогеохимический цикл двуокиси углерода, глобальное потепление, биосфера, чистая первичная продукция, антропогенные воздействия, принцип Ле-Шателье.*

Целью данной работы является математическое моделирование глобального цикла двуокиси углерода и определение роли биосферы в компенсации результатов влияния антропогенных выбросов CO_2 в атмосферу на глобальный климат. Главное внимание уделяется анализу роли экосистем суши, отдельных ее регионов, стран мира и особенно России, в глобальной стабилизации количества CO_2 в атмосфере.

Расчеты динамики биосферных процессов с учетом влияния хозяйственной деятельности для всего мира, стран и регионов были проведены с помощью разработанной автором пространственной математической модели глобального цикла углерода в системе атмосфера - экосистемы суши - океан [3]. В модели территория всей планеты разделена на ячейки размером $0.5 \times 0.5^\circ$ географической сетки (приблизительно 50×50 км). Предполагается, что в каждой ячейке суши находится растительность одного типа согласно мировой классификации [1]. Каждая ячейка характеризуется следующими переменными: количеством углерода в массе растительности, в массе мертвого органического вещества почвы (гумус и подстилка). Происходит обмен углеродом в форме CO_2 с атмосферой, общее количество углерода в которой также является переменной модели. 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 каждой ячейке характеризуется среднегодовой температурой воздуха у поверхности земли и количеством

осадков за год. Значения температуры и осадков для каждой ячейки в зависимости от количества углерода в атмосфере (парниковый эффект) рассчитываются с помощью климатической модели общей циркуляции атмосферы и океана [2]. Модель была дополнена моделью цикла углерода в системе атмосфера - океан [4]. Предполагается, что в отсутствие антропогенных выбросов CO_2 в атмосферу количество углерода в системе атмосфера - растения - почва - океан постоянно и что до начала антропогенных воздействий система была в положении равновесия.

Модель содержит более 100 тысяч дифференциальных уравнений и реализована на ЭВМ. Рассчитанные компьютерные карты годичной продукции растительности суши и количества углерода в мертвом органическом веществе почвы адекватно воспроизводят данные измерений.

Моделировалась динамика биосферы с 1860 г. по 2100 г. Был принят следующий базовый сценарий. Антропогенное поступление CO_2 в атмосферу начинается в 1860 г., оно происходит в результате индустриальных выбросов CO_2 от сжигания ископаемых органических топлив (каменный уголь, нефть, газ) [5], вырубки лесов и эрозии почв. После 2006 г. темпы роста индустриальных выбросов сохраняются такими же, какими были предыдущее десятилетие (1,62% в год). С 1950 г. по 2100 г. идет вырубка и последующее уничтожение тропических лесов. В этот период масса тропических лесов каждый год уменьшается на 0,6%, соответствующее количество CO_2 поступает в атмосферу. Эрозия почв связана, прежде всего, с сельскохозяйственной эксплуа-

тацией земель, соответствующее количество CO_2 также поступает в атмосферу. Эрозия начинается в 1860 г. и составляет в год 0.15%. Территория вырубки и эрозии задается соответствующими пространственными распределениями.

Расчет динамики биосферных параметров на основе принятых допущений (базовый сценарий) показан на рис. 1. Видно, что происходил рост CO_2 в атмосфере, это способствовало увеличе-

нию продуктивности растительности суши и росту фитомассы растений. Экосистемы суши и океан, поглощали излишки CO_2 и в целом замедляли его рост, проявляя компенсаторные свойства биосферы. Количество мертвого органического вещества почвы сначала снижалось, а затем по мере проявления компенсаторных свойств биосферы увеличивалось.

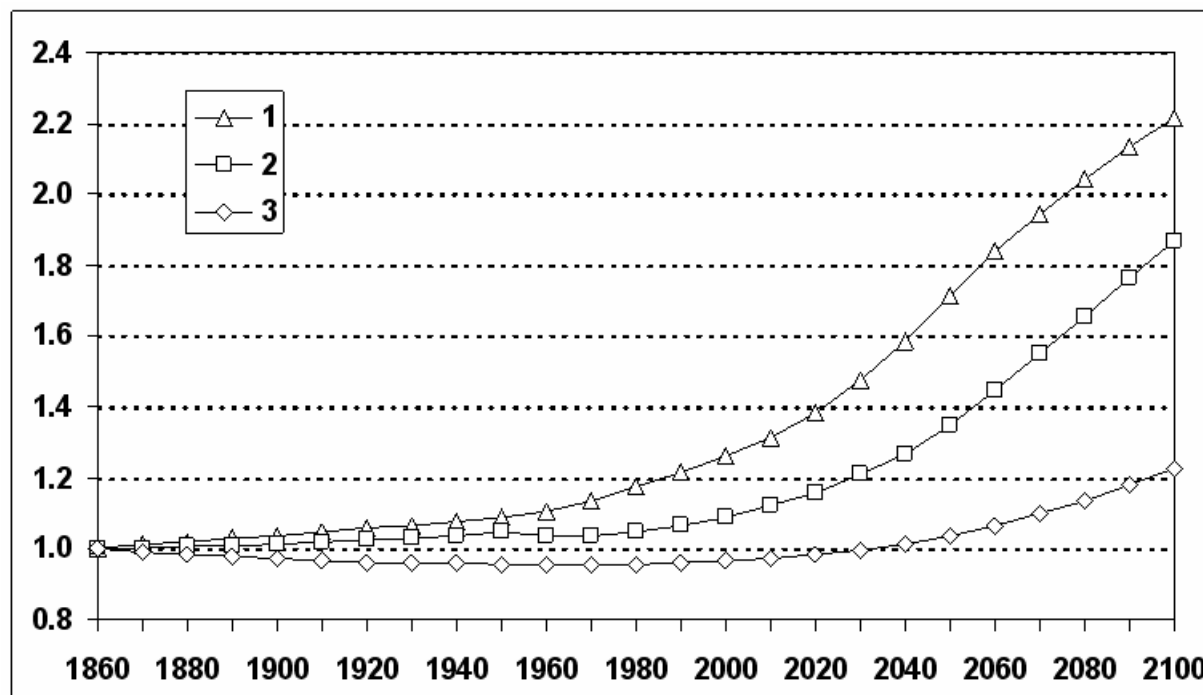


Рис. 1. Расчет динамики относительных значений углерода в атмосфере (1), в фитомассе растений (2), гумусе почв (3) в 1860–2100 гг.

Согласно расчету, к 2100 г. следует ожидать роста концентрации углекислого газа в атмосфере Земли в 2,2 раза и средней температуры атмосферы на $2,7^\circ\text{C}$ по сравнению с их значениями в 1860 г.

Расчеты показывают, что в течение всего индустриального периода экосистемы средних и высоких широт Северного полушария поглощали CO_2 , а в экваториальной - выделяли. Наибольшее поглощение происходило в широтах $53\text{--}65^\circ$ с.ш. Северного полушария, где сосредоточено большое количество лесных экосистем. Если двигаться от высоких и средних широт к экватору, то в целом, чем ближе к экватору была экосистема, тем в меньшей степени она поглощала CO_2 , а, начиная с 22° северной широты и далее до 25° южной широты, происходило выделение CO_2 .

В целом в 2006 г. 38% суммы индустриальных выбросов, выбросов от вырубки лесов и эрозии почв было поглощено экосистемами суши и океаном, при этом поглощение экосистемами суши составило 48,2% от величины выбросов,

океан поглотил 12,5%.

В модели возможно рассмотрение стран, размеры которых превышают пространственное разрешение 50×50 км. Рассмотрим выделение и поглощение двуокси углерода на территории стран. Данные индустриальных выбросов и поглощения экосистемами стран за 2006 г., имеющих наибольшие выбросы, приведены на рис. 2. Видно, что наибольшие индустриальные выбросы были с территории США, Китая, России и Индии. Больше всех стран поглощала CO_2 Россия, за ней идут Канада, Бразилия и Австралия. Поглощение CO_2 превышало индустриальные выбросы в Канаде, Бразилии, Австралии и Швеции, и др.

Проведенные расчеты показывают, что, начиная с 2002 г., для России поглощение CO_2 было примерно равно выбросам. Поглощение увеличивалось в течение всего времени, а выбросы начали слабо расти лишь после 1998 г.

Таким образом, мы можем заключить, что наибольшее возмущение естественной атмосферы происходит от двух наиболее промышленно развитых стран (США, Япония) и двух стран с

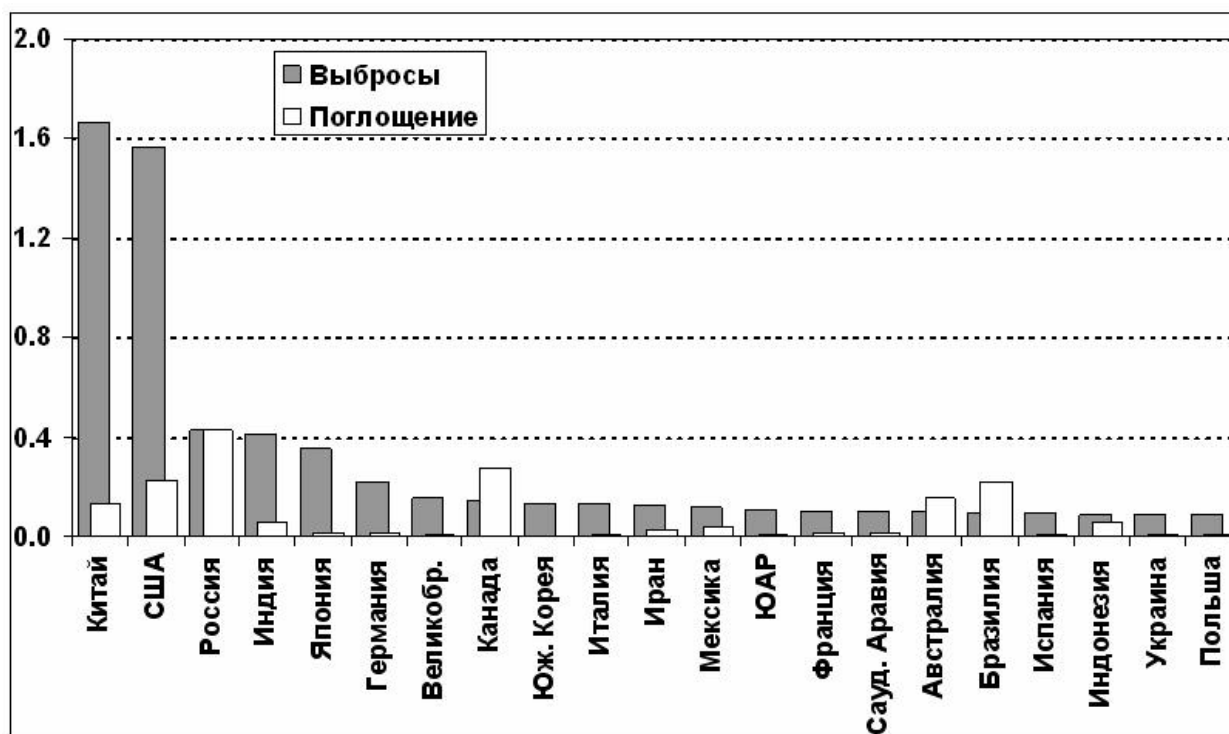


Рис. 2. Сравнение промышленных выбросов и поглощения углерода экосистемами стран в 2006 г. (Гт С в год) крупнейшими странами выделителями CO₂

наибольшим населением (Китай, Индия). В 2006 г эти страны выделили 49% от всех выбросов CO₂. Поэтому именно эти страны, а не Россия, несут главную ответственность за быстрый рост CO₂ в атмосфере

Согласно Киотскому протоколу к Рамочной конвенции ООН об изменении климата страны к 2010 г. должны уменьшить выбросы парниковых газов в атмосферу до уровня на 5% ниже промышленных выбросов CO₂ 1990 г. Не все страны участвуют в выполнении протокола. Выбросы стран, участвовавших в подписании протокола в 1990 г. составляли около 61% всех выбросов CO₂. Как известно, США отказались участвовать в выполнении Протокола, а страны ЕС пообещали к 2020 г. довести свои выбросы до значений на 20% меньше уровня 1990 г.

Отметим, что Протокол содержит конкретные ограничения на выбросы CO₂ лишь для некоторых стран и не предусматривает их для многих других. В девяти активно развивающихся и развивающихся странах с большим населением и высокими темпами роста промышленных выбросов CO₂ высоки и опережают темпы прироста численности населения: Индия – 3,1%; Индонезия – 6,2%; Бразилия – 3,8%; Пакистан – 3,7%; Бангладеш – 5,0%; Нигерия – 7,1%; Мексика – 3,1%; Вьетнам – 9,8%; Филиппины – 3,8%.

Весьма вероятно, что скоро в этих странах рост экономического развития и численность населения станут настолько высокими, что не бу-

дет другой альтернативы кроме развития энергетики и значительного увеличения роста выбросов CO₂. 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 1,4 раза больше суммарного выброса всех стран мира в 2006 г.

Рассчитаем, какой эффект могут дать различные ограничения, приводящие к уменьшению выбросов CO₂. На рис. 3 представлены результаты расчетов динамики двуокси углерода в 1860-2060 гг. Рассматривались следующие сценарии:

- 1 - изложенный выше базовый сценарий антропогенных воздействий,
- 2 - сценарий 1, при этом, начиная с 2010 г., вырубка лесов и эрозия почв прекращаются,
- 3 - сценарий 1, при этом после 2010 г. выполняется Киотский протокол всеми участвующими в нем странами за исключением США (отказ США участвовать в выполнении протокола),
- 4 - сценарий 1, при этом после 2010 г. выполняется Киотский протокол только участвующими в нем странами (Выполнение Киотского протокола).
- 5 - сценарий 1, при этом после 2010 г. всеми странами мира выполняется Рамочная конвенция ООН об изменении климата,
- 6 - сценарий 1, при этом после 2010 г. выполняется Киотский протокол всеми участниками кроме США, при этом рост выбросов CO₂ в упомянутых выше девяти странах каждый год составляет указанные выше рассчитанные значения.

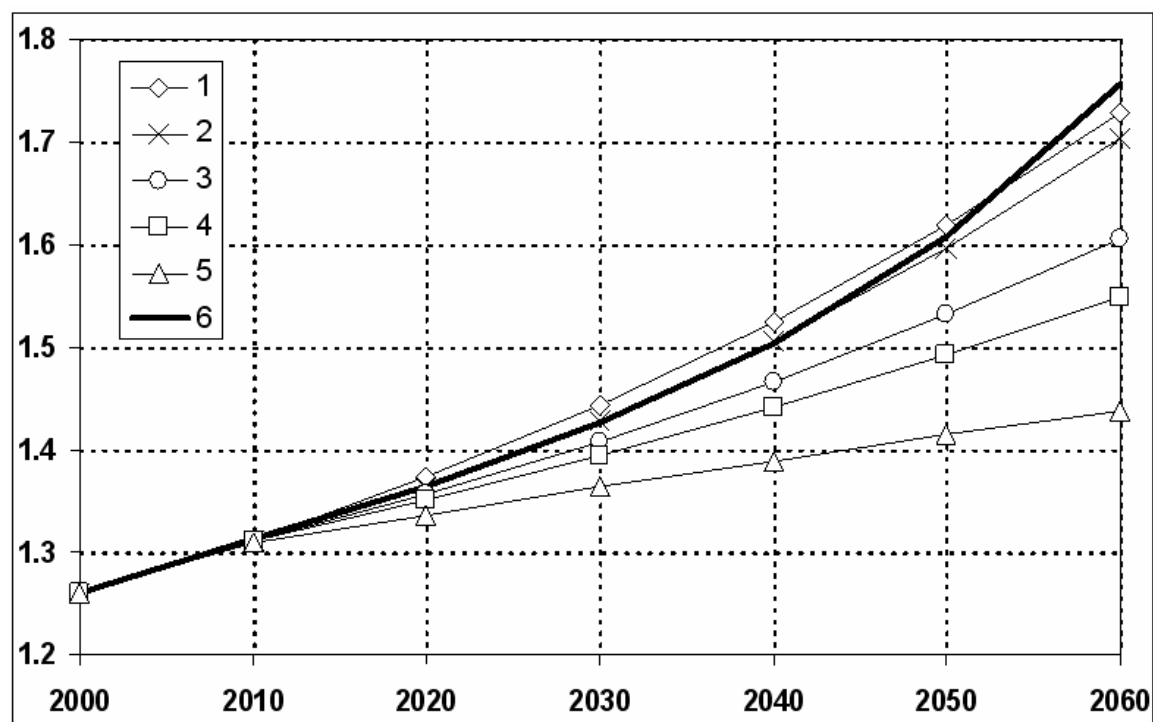


Рис. 3. Расчет изменения относительной (по отношению к величине 1860 г.) концентрации CO₂ в атмосфере при различных сценариях уменьшения выбросов CO₂ в атмосферу. Описание сценариев приведено в тексте

Согласно расчетам в соответствии со сценарием 1 концентрация CO₂ в атмосфере к 2060 г. повысится в 1,73 раза, по сравнению с 1860 г. Влияние прекращения вырубки и эрозии дает самый слабый эффект: рост CO₂ составит 1,70, т.е. сокращение будет на 0,03 меньше, чем по базовому сценарию.

Выполнение Киотского протокола по сценарию 3 приведет к тому, что концентрация CO₂ в атмосфере повысится до значения 1,55 раз, т.е. эффект снижения по отношению к базовому сценарию составит соответственно 0,18 (т.е. спад на 8% по отношению к базовому сценарию к 2100 г.), что не очень велико. Отказ США участвовать в выполнении протокола (сценарий 4) приведет к еще меньшему снижению кривой CO₂ – соответственно до значения 1,61, что на 0,12 ниже базового сценария.

Наиболее сильное влияние на замедление роста CO₂ дало бы выполнение Рамочной конвенции о стабилизации климата всеми странами. В этом случае к 2060 г. концентрация CO₂ повысилась бы в 1,44 раз, т.е. на 0,49 меньше чем при базовом сценарии. Однако этот сценарий мировое сообщество не планирует реализовать.

В случае сценария 6, когда происходит быстрый рост выбросов CO₂ в активно развивающихся и развивающихся странах с большим населением, произойдет увеличение концентрации CO₂ по сравнению с базовым сценарием: к 2060 г. рост

CO₂ составит 1,76, т.е. на 0,03 больше базового.

Для сравнения значения разных сценариев ограничений выбросов, примем за 100 процентов сокращения роста CO₂ («улучшение» по сравнению с базовым сценарием) в случае выполнения Киотского протокола к 2060 г. (сценарий 4). Тогда выполнение Киотского протокола при неучастии США (сценарий 3) дает «улучшение» на 68% сокращения выбросов – видно, что это малая величина, и остается надеяться на то, что США, выполняя свою собственную программу по ограничению выбросов, добьются более заметных успехов. Прекращение вырубки лесов и эрозии почв (сценарий 2) даст лишь «улучшение» на 14% уменьшения концентрации CO₂ по сравнению с базовым сценарием. Это самое малое влияние ограничений выбросов диоксида углерода. Самый сильный эффект давало бы выполнение Рамочной конвенции о стабилизации климата (сценарий 5), при этом «улучшение» - сокращение концентрации CO₂ достигло бы 162%. Неблагоприятный результат показывает учет неконтролируемого роста CO₂ в указанных выше активно развивающихся и развивающихся странах (сценарий 6) – минус 15%, т.е. рост CO₂ больше чем в базовом сценарии.

Проведенные расчеты по сценариям 3, 4 и 5 были дополнены расчетами, в которых страны ЕС сокращали свои промышленные выбросы CO₂ к 2020 г. до значений на 20% меньше уровня

1990 г. Это дало бы самое незначительное снижение роста концентрации CO_2 – к 2100 г. различие соответствующих концентраций составляло бы несколько процентов или долей процента.

В работе на основе математического моделирования были оценены как возможный рост концентрации CO_2 в атмосфере на фоне поглощения биосферой и океаном излишков CO_2 , так и последствия сокращения выбросов двуокиси углерода. Показано, что последнее позволит в небольшой степени уменьшить скорость роста двуокиси углерода в атмосфере. Можно надеяться, что предпринимаемые развитыми странами усилия по преобразованию экономики и увеличению эффективности расходования энергетических ресурсов позволят уменьшить их долю антропогенных воздействий на биосферу и климат без уменьшения уровня жизни населения этих стран. Однако пренебрежение процессами развития стран, находящихся за пределами «золотого миллиарда», может дать противоположный эффект – еще больший рост концентрации в атмосфере и дальнейшие нарушения климата и биосферы. Учитывая особое значение России в поглощении атмосферной CO_2 , можно надеяться, что участие России в выполнении Киотского протокола

принесет ей политические и экономические выгоды.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 08-01-00607).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н.И., Родин Л.Е.* Картограммы продуктивности биологического круговорота главных типов растительности суши, // Изв. Всесоюзного Географического о-ва. 1967. т. 99. № 3. с. 190-194.
2. *Пархоменко В.П.* Верификация климатической модели. М.: ВЦ АН СССР. 1988. 34 с.
3. *Тарко А.М.* Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. М.: Физматлит. 2005, 232 с.
4. *Chan Y.H., Olson J.S., Emanuel W.R.*, Simulation of land-use patterns affecting the global carbon cycle, // Environmental Sciences Division. Publication N 1273, Oak Ridge National Laboratory, 1979. 173 pp.
5. *Marland G., Boden T., and Andres B.* Global CO_2 Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-2004. NDP-030. // Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 2009.

INVESTIGATION OF ROLE OF THE BIOSPHERE IN COMPENSATION OF GLOBAL WARMING WITH THE AID OF THE MODEL OF GLOBAL CARBON DIOXIDE CYCLE

© 2009 A.M. Tarko

Dorodnitsyn Computing Center, Russian Ac.Sc., Moscow; e-mail: tarko@himki.net

With the aid of a spatial mathematical model of the global carbon dioxide cycle there were calculated the absorption of carbon dioxide emissions from fossil fuels burning, deforestation and soil erosion by terrestrial ecosystems, countries and regions of the world. Impacts of CO_2 reductions of emission to the atmosphere based on different scenarios of fulfillment of the Kyoto Protocol to the Framework Convention on Climate Change are calculated. Estimations show that Russia is in a unique position relative to other countries: ecosystem its territory more than other countries absorb atmospheric CO_2 and absorption by its territory almost equal to industrial emissions.

Keywords; *Mathematical modeling, Global carbon dioxide cycle, Global warming, Biosphere, Biota, Net primary production, Anthropogenic impacts, Industrial carbon dioxide emissions, Le Chatelier principle.*

Key words: *soil, thermal diffusivity of soils, mathematical models.*

УДК 57.087

ОЦЕНКА И МИНИМИЗАЦИЯ ОШИБОК ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДЫХАНИЯ ПОЧВЫ ПО ОТКРЫТОЙ СХЕМЕ

© 2009 Ф.А. Татаринов¹, А.Г. Молчанов², А.В. Ольчев¹

¹ Институт проблем экологии и эволюции им. Северцова РАН, Москва, Россия;
e-mail: pedro2005@rambler.ru

² Институт лесоведения РАН, Успенское, Московская область, Россия

Аннотация: Проведена аналитическая и экспериментальная оценка ошибки камерного измерения дыхания почвы по открытой схеме, связанной с подсосом почвенного воздуха в камеру за счет разницы давлений внутри камеры и в окружающем воздухе и приводящей к значительному завышению величины измеряемого почвенного дыхания. Получено, что скорость подсоса почвенного воздуха гиперболически снижается при уменьшении разницы давлений в камере и в окружающем воздухе. В рамках исследования разница давлений регулировалась путем увеличения площади входных отверстий почвенной камеры. Получена оценка минимальной площади входных отверстий камеры, при заданной скорости протока воздуха, необходимая для получения корректных данных по почвенному дыханию при открытой схеме.

Ключевые слова: эмиссия CO_2 , дыхание почвы, камерные методы, открытая схема.

ВВЕДЕНИЕ

Дыхание почвы является одним из важнейших компонентов углеродного баланса экосистемы [3, 7]. Поэтому его корректное измерение является важной задачей в рамках экосистемных исследований. Наиболее распространенными методами измерения почвенного дыхания являются камерные методы, при которых участок почвы накрывается камерой и исследуется динамика концентрации CO_2 внутри нее [4, 6]. Камерные измерения газообмена обычно проводятся по двум схемам: закрытой и открытой. При закрытой схеме (Рис. 1а) не происходит обмена воздуха между камерой и атмосферой. При этом воздух обычно непрерывно прокачивается по замкнутому циклу через камеру и газоанализатор. Такая схема реализована, например, в почвенных камерах фирмы Li-Cor LI-6400 и LI-8100 [5]. Возможен и вариант, при котором не используется помпа для прокачки воздуха. При этом из камеры с определенной периодичностью отбираются пробы воздуха и потом анализируются в лаборатории [1]. При этом дыхание (R) определяется по скорости изменения концентрации CO_2 в камере ($C_{chamber}$):

$$R \sim \frac{V}{S} \frac{\partial C_{chamber}}{\partial t},$$

где V – объем камеры и S – площадь почвы в пределах камеры.

Замкнутая схема является довольно надежной при проведении измерений почвенного дыхания. Однако ее использование для непрерывных измерений сопряжено с необходимостью регуля-

ного проветривания камеры после каждого измерения, что затрудняет организацию непрерывных автоматических измерений в полевых условиях.

При открытой схеме воздух непрерывно прокачивается через камеру, проходит через газоанализатор и выбрасывается в атмосферу, при этом дыхание рассчитывается по формуле:

$$R = F \frac{C_{chamber} - C_{air}}{S}, \quad (1)$$

где C_{air} – концентрация CO_2 в приземном слое воздуха и F – скорость потока воздуха через камеру. Открытая схема удобна тем, что легко позволяет проводить круглосуточные автоматические измерения без участия оператора. Одним из недостатков данной схемы является ошибка измерений, связанная с искусственным подсосом в камеру почвенного воздуха с высокой концентрацией CO_2 . Дело в том, что сопротивление потоку воздуха внутрь камеры через почву обычно многократно превосходит сопротивление воздуху, проходящему через входные отверстия камеры. Учитывая, что насос, прокачивающий воздух в систему, расположен после камеры (т.е. работает на отсос воздуха из камеры), давление воздуха в камере будет несколько ниже, чем в атмосфере. В этом случае воздух будет поступать в камеру двумя параллельными путями, как через входные отверстия камеры, так и через почву. Т.о., к диффузии CO_2 из почвы, соответствующей измеряемому дыханию R , добавляется дополнительный привнос CO_2 из почвы за счет разницы давлений, что ведет к завышению $C_{chamber}$, а соответственно и R [8]. Задача данной

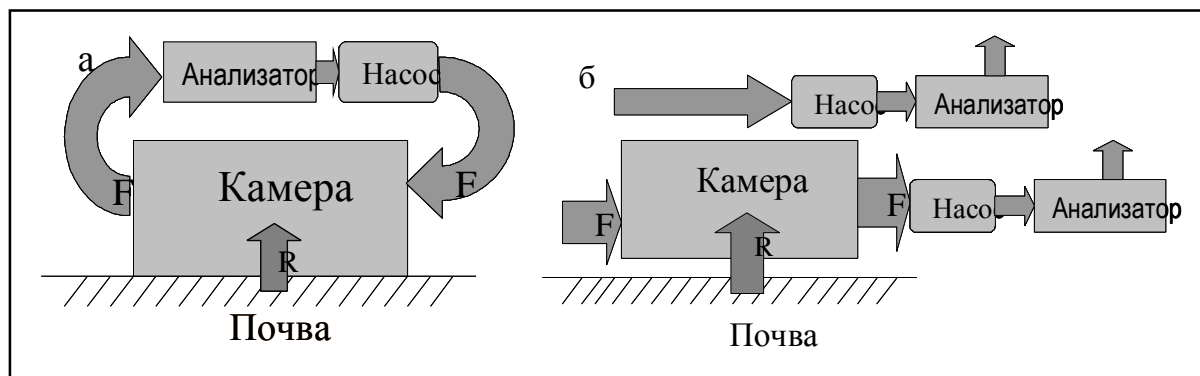


Рис. 1. Схема замкнутой (а) и открытой (б) схем измерения дыхания почвы. F - поток воздуха через камеру, R - эмиссия CO₂ из почвы.

работы – оценить эту ошибку и условия, при которых она не будет превышать допустимых значений.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Рассмотрим камеру, которая установлена на поверхности почвы так, чтобы исключить прохождение воздуха между почвой и краем камеры. В ней имеется n входных отверстий площадью s каждое (т.е. площадь всех входных отверстий $n \cdot s$). Из камеры насосом засасывается воздух в газоанализатор. Взамен в камеру поступает самотеком воздух из атмосферы и из почвы. Сопротивление отверстий в камере и почвы обо-

значим как r_{in} и r_{soil} , причем $r_{in} = \frac{k}{n \cdot s}$, где k – константа. Тогда для потока воздуха в камеру в линейном приближении можем записать:

$$F = (P_{air} - P_{chamber}) \left(\frac{1}{r_{soil}} + \frac{n \cdot s}{k} \right) \quad (2)$$

Запишем также баланс CO₂ на выходе из камеры и на входе в нее:

$$c_{chamber} \cdot F = C_{air} \cdot F + R \cdot S + b \frac{P_{air} - P_{chamber}}{r_{soil}} \quad (3)$$

Здесь b – коэффициент вовлечения дополнительного CO₂ за счет подсоса из почвы. В правой части первый член соответствует притоку CO₂ с атмосферным воздухом, второй – истинному дыханию почвы, и третий – притоку CO₂ за счет подсоса воздуха из почвы. Исключая из (3) разность давлений за счет выражения для потока (2), получаем:

$$(C_{chamber} - C_{air}) = \frac{R \cdot S}{F} + \frac{b}{r_{soil} \cdot \left(\frac{1}{r_{soil}} + \frac{n \cdot s}{k} \right)} \quad (4)$$

Уравнение (4) демонстрирует как убывание концентрации с ростом числа входных отверстий (или их общей площади), так и то, что считая $R = F \frac{C_{chamber} - C_{air}}{S}$, мы переоцениваем дыхание, а увеличение n приводит к более точной оценке. Относительную ошибку измерения, считая точным значением $(C_{chamber} - C_{air})_{true} = R \cdot S / F$, можно оценить так:

$$err = \frac{(C_{chamber} - C_{air}) - (C_{chamber} - C_{air})_{true}}{(C_{chamber} - C_{air})_{true}} = \frac{b \cdot F \cdot k}{R \cdot S \cdot (k + n \cdot s \cdot r_{soil})} \quad (5)$$

Обозначим для краткости $r = R \cdot S / F$, общую площадь отверстий через $S_{in} = n s$ и отношение сопротивлений почвы и отверстия единичной площади $k_r = r_{soil} / k$. Тогда получим:

$$(c_{chamber} - C_{air}) = r + b / (1 + S_{in} \cdot k_r) \quad (6)$$

или

$$(c_{chamber} - C_{air}) = r + b / (1 + n \cdot d) \quad (7)$$

где $d = s \cdot r_{soil} / k$ есть отношение притока воздуха через отверстие и через почву.

Эти дробно-линейные зависимости имеют 3 параметра, которые можно определить с помощью уравнения регрессии, измеряя концентрации CO₂ при разных S_{in} или n .

Согласно уравнению (5), ошибка будет возрастать с уменьшением дыхания R . Параметр b , определяющий приток CO₂ за счет подсоса воздуха из почвы, зависит от распределения CO₂ в почве (что в свою очередь зависит от R), а также от ее аэродинамических свойств, поэтому рассчитать аналитически его практически невозможно. Однако в самом первом приближении можно считать, что $b \sim R / r_{soil}$. Тогда в уравнении (5) R сокращается, т.е. ошибка оказывается независимой от дыхания.

Следует отметить два момента, касающихся вышеприведенных выкладок.

1. Поскольку, если пользоваться электрической аналогией, $\Delta P = F \cdot r_{total}$ и $\frac{1}{r_{total}} = \frac{1}{r_{soil}} + \frac{1}{r_{in}}$,

где ΔP - разность давлений в камере и в атмосфере, то уменьшение r_{in} за счет увеличения S_{in} ведет к снижению ΔP , что является целью ряда усовершенствований открытой схемы [8].

2. Вышеприведенные выкладки предполагают одинаковую концентрацию CO_2 в пределах камеры, т.е. идеальное перемешивание воздуха в камере, что может и не достигаться без дополнительного вентилятора в камере.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИФФУЗИИ CO_2 ПРОТИВ ТОКА ВОЗДУХА

Еще одним возможным источником ошибки является диффузия CO_2 из камеры против тока воздуха. Поскольку концентрация CO_2 в камере выше, чем в воздухе, пойдет диффузия CO_2 из камеры наружу через входные отверстия. Если линейная скорость этой диффузии будет выше, чем скорость входящего воздуха, концентрация CO_2 в камере будет занижена.

Диффузия описывается законом Фика:

$$F_c = -D \frac{dC}{dx} \quad (8)$$

где F_c - это диффузионный поток CO_2 , D - коэффициент диффузии, C - концентрация CO_2 , а x - расстояние.

Коэффициент в общем случае зависит от температуры (T : °C) и давления (P : hPa):

$$D = D_{std} \cdot \left(\frac{T + 273}{273}\right)^{n_1} \cdot \left(\frac{1013}{P}\right)^{n_2} \quad (9)$$

где D_{std} - коэффициент диффузии при стандартных условиях, а n_1 и n_2 - константы [2]. Для CO_2 D_{std} , n_1 и n_2 равны соответственно $1,39 \times 10^{-5} \text{ м}^2\text{с}^{-1}$, 1,75 и 1.

Если взять температуру в 15°C, давление 1013 hPa и градиент концентрации CO_2 в 100 ppm на 5 мм, получим диффузию $0,58 \text{ мг } CO_2 \cdot \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Разделив ее на плотность CO_2 в воздухе (при нормальных условиях и концентрации в 500 ppm она составляет $950 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$), получим линейную скорость диффузии $0,61 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$. В то же время линейная скорость потока воздуха в камеру при $F = 1 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$ и пяти входных отверстиях по 4 мм диаметром с общей площадью $0,63 \text{ см}^2$ составит $0,27 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, т.е. более чем на два порядка выше.

ЭМПИРИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА

В мае и июле 2009 г. в Серебряноборском лесничестве и Центральном-лесном государственном природном биосферном заповеднике (ЦЛГПБЗ) было проведено несколько экспериментов по измерению зависимости $C_{chamber}(S_{in})$. Эксперименты проводились при помощи газоанализатора LI-820 фирмы Li-Cor. В камере было проделано от одного до 11 входных отверстий диаметром 6 мм. Измерения проводились при скорости потока $0,9 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$. Во всех случаях получена очень хорошая аппроксимация зависимости $(C_{chamber} - C_{air})(n)$ по формуле (6) (Рис. 2).

Рисунок показывает, что во всех случаях с ростом количества (или площади) входных от-

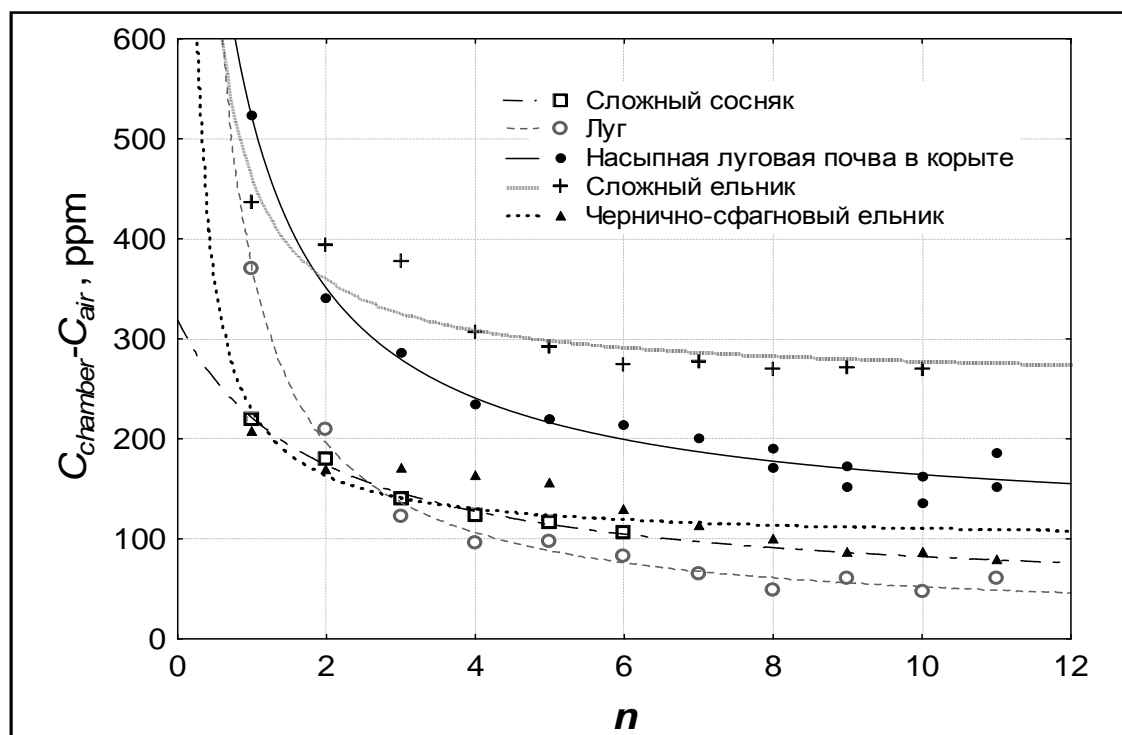


Рис. 2. Зависимость разности концентраций CO_2 в камере и в воздухе от количества входных отверстий (диаметр отверстий 6 мм). Аппроксимация данных по формуле (6).

верстий ($C_{chamber} - C_{air}$) снижается, асимптотически приближаясь к некоторому постоянному уровню, соответствующему реальному почвенному дыханию при данных условиях. Причем во всех случаях, кроме измерений в сфагновом ельнике ЦЛГПБЗ, ($C_{chamber} - C_{air}$) практически стабилизируется в камере с 4-6 входными отверстиями (110-170 мм²). Т.е. в практических целях такую площадь отверстий можно считать достаточной для получения достоверных значений R при скорости прокачивания воздуха через камеру порядка 1 л•мин⁻¹. Продолжающееся до конца эксперимента снижение ($C_{chamber} - C_{air}$) в сфагновом ельнике связано, видимо, с относительно низким r_{soil} в нем. Качество аппроксимации данных уравнением (7) в разных экспериментах колебалось в пределах $0,85 < r^2 < 0,99$, только в сфагновом ельнике оно было $r^2 = 0,67$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показывают, что увеличение площади входных отверстий камеры ведет к снижению ошибки измерения почвенного дыхания за счет подсоса воздуха из почвы. Получено, что при их общей площади больше 170 мм² для камеры площадью около 200 см² и объемом около 2.5 л концентрация CO₂ в камере практически стабилизируется, т.е. данная ошибка становится незначительной. Использование камер с небольшой площадью входных отверстий может привести к многократной переоценке выноса CO₂ с поверхности почвы.

Авторы выражают глубокую признательность Сысоеву Н.Е. за ценные консультации в области механики жидкостей и газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Замолодчиков Д.Г., Кудяров В.Н. Методы количественной оценки потоков диоксида углерода из почв // Методы исследований органического вещества почв. М.: Россельхозакадемия – ГНУ ВНИПТИОУ. 2005. С. 408-425.
2. Campbell G.S. Soil physics with BASIC: transport models for soil-plant systems. Amsterdam: Elsevier, 1985.
3. Grace J., Rayment M. Respiration in the balance. Nature. 2000. V. 404 P. 819–820.
4. LI-COR Biosciences, Application Note 124. Considerations for measuring ground CO₂ fluxes with chambers. LI-COR Biosciences. 1998. Lincoln, NE, USA.
5. Madsen R. A., Demetriades-Shah T. H., Garcia R. L., McDermitt D. K. Soil CO₂ Flux Measurements: Comparisons Between the LI-COR LI-6400 and LI-8100. LI-COR Biosciences. 2006. Lincoln, NE, USA (www.licor.com).
6. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H., Minkkinen K., Vesala T., Niinisto S., Lohila A., Larmola T., Morero M., Pihlatie M., Janssens I. A., Yuste J. C., Grunzweig J. M., Reth S., Subke J. A., Savage K., Kutsch W., Ostreng G., Ziegler W., Anthoni P., Lindroth A., Hari P. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux // Agricultural and Forest Meteorology. 2004. V. 123. P. 159–176.
7. Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils // Global Biogeochem. Cycles. 1995. V. 9. P. 23–36.
8. Rayment M. B., Jarvis P. G. An improved open chamber system for measuring soil CO₂ effluxes in the field // J. Geophys. Res. 1997. V. 102(D24). P. 779–784.

ESTIMATION AND MINIMISATION OF ERRORS OF SOIL RESPIRATION MEASUREMENT USING OPEN SCHEME

© 2009 F.A. Tatarinov¹, A.G. Molchanov², A.V. Oltchev¹

¹Severtsov Institute of Ecology and Evolution Problems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: pedro2005@rambler.ru

²Institute of Forestry of Russian Academy of Sciences, Uspenskoye, Moscow region, Russia

The analytical and experimental estimation of error of chamber measurements of soil respiration using open scheme, caused by the air infiltration into the chamber from soil due to the difference in air pressure inside the chamber and in ambient air. This error may lead to the significant overestimation of measured soil respiration. It was obtained that the air infiltration from soil decreases hyperbolically under decreasing difference of air pressure inside and outside of chamber. Within the frame of the study the pressure difference was regulated by the increase of the area of chamber inlets. The estimation of minimal inlets area under the given air flux necessary for the correct soil respiration measurement with open scheme was obtained.

Key words: CO₂ emission, soil respiration, chamber methods, open path.

УДК 577.4.

СУКЦЕССИИ И БИОТИЧЕСКИЙ КРУГОВОРОТ

© 2009 А.А. Титлянова

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск; e-mail: argenta@issa.nsc.ru

В статье представлены результаты изучения сукцессионных процессов в экосистемах, формирующихся на отвалах угольных разрезов. Сопоставлены сукцессии различных компонентов биоты, показаны особенности сукцессионных процессов при первичной и вторичной сукцессии, проведен анализ связи между экологическими сукцессиями и процессами биотического круговорота, включающими формирование почв.

Ключевые слова: *биота, биотический круговорот, угольные отвалы, самозарастание, сукцессия.*

Сукцессия, понимаемая как направленные во времени изменения отдельных компонентов и всей экосистемы в целом, является одним из главных объектов исследования в экологии. Изучение сукцессий приобрело особое значение в последнее столетие, когда антропогенное воздействие распространилось на все биомы и регионы биосферы. Под влиянием деятельности человека часть климаксовых экосистем была трансформирована в агроценозы, городские и техногенные ландшафты, а из остальных экосистем значительная доля выведена из равновесного состояния и переведена в неравновесное сукцессионное. В настоящее время биогеоценотический покров биосферы представляет собой сложную мозаику антропогенных трансформатов, а также полуприродных и природных экосистем, находящихся на различных стадиях различных типов сукцессий.

Клементс [Clements, 1916] – автор теории сукцессии – считал сукцессию детерминированным, направленным процессом и называл среди факторов, определяющих ее ход, способность видов к распространению семян, трансформацию видами среды их обитания и конкурентные взаимоотношения между видами. Маргалеф [Margalef, 1968] предполагал, что состав сообщества на разных стадиях сукцессии находится под большим влиянием случайных обстоятельств, в связи с чем для пионерных стадий сукцессии характерны не столько направленный тренд, сколько флюктуации. Со временем они играют всё меньшую роль, т.к. гасятся возникающими свойствами самого биотического сообщества. Ю. Одум [1975] в своей концепции сукцессионных и зрелых стадий экосистемы уделил особое внимание изменению количественных соотношений в структуре потоков энергии, биотического круговорота и трофических цепей, а также смене жизненных циклов организмов и их стратегий.

Коннел и Слэйтир [Connel, Slatyer, 1977], сум-

мировав различные точки зрения, предложили три модели сукцессий: модель облегчения (Facilitation), толерантности (Tolerance) и ингибирования (Inhibition). Соответственно первой только определенные раннесукцессионные виды могут оккупировать открытое пространство. Модели толерантности и ингибирования предполагают, что любой вид, достигающий поверхности, может ее колонизировать, т.е. укрепиться на ней на какое-то время. По всем трём моделям ранние поселенцы модифицируют среду так, что она становится неподходящей для нового поселения в ней этих ранних сукцессионных видов. Гипотезы отличаются по механизмам, обеспечивающим появление новых видов на более поздних стадиях сукцессии.

Уиттакер [Whittaker, 1975] рассматривал механизм облегчения как процесс, при котором доминант А так модифицирует почву и микроклимат, что это делает возможным доминирование вида В, который в свою очередь, так меняет среду, что доминирование переходит к виду В и т.д. Развитие экосистемы по модели облегчения характерно для первичных сукцессий, происходящих на бедных субстратах.

Приступая к изучению сукцессий на отвалах угольной промышленности, т.е. на бедных субстратах, мы полагали, что сукцессия растительности будет идти по модели Facilitation, но не прогнозировали типа сукцессий для гетеротрофов. Необходимо отметить, что подавляющее количество экосистем, формирующихся на отвалах, относится к травяному типу. Травяные же экосистемы находятся в непрерывной сукцессии, т.к. их видовой состав и состав доминирующих видов зависят от режима использования экосистемы. Заповедание, сенокосение, выпас, изменение степени пастбищной нагрузки немедленно отражаются в составе и структуре растительности [Титлянова, 2002]. К зрелым экосистемам с травянистой растительностью приложимо поня-

тие субклимакса [Clements, 1916]. Субклимакс – это незавершенная стадия развития, на которой растительность задерживается неопределенно долго, благодаря воздействию факторов, отличных от климата. Таким субклимаксом может многие годы выступать промежуточная стадия пастбищной дигрессии при постоянной по силе и времени пастбищной нагрузке. Субклимакс обычно относят к терминальной стадии сукцессии.

В начале исследования были поставлены следующие вопросы: а) детерминирована ли сукцессия, и какова роль случайных факторов; б) какова связь развивающегося биотического круговорота с возрастом сукцессионной экосистемы; в) имеются ли общие закономерности в сукцессии отдельных компонентов экосистемы (растительность, микроорганизмы, представители почвенного населения).

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились в 1983-1990 гг. на КАТЭКе (Канско-Ачинский топливно-энергетический комплекс), в рамках которого предполагалось построить больше десятка электростанций, работающих на угле. Экспериментальный участок был расположен в лесостепной зоне Назаровской котловины около Назаровского угольного разреза (Красноярский край, Назаровский район).

Объектом изучения были серии самозарастающих отвалов. В первую серию самозарастающих отвалов разного возраста входили неспланированные отвалы, представляющие собой невысокие гряды (рис. 1). На каждом отвале было выбрано три позиции: на вершине – элювиальная (Эль); на склоне – транзитная (Транс); у подножья – аккумулятивная (Ак). Вторая серия размещалась на транспортном отвале, отсыпанном и спланированном в 1957 г. В течение 25 лет самозарастания здесь сформировался злаково-разнотравный луг и образовался тонкий слой «молодой» почвы. При вторичной планировке в 1982 г. верхние 50-70 см грунта были срезаны. Гумусированный слой, надземный и подземный растительный материал оказались беспорядочно перемешанными с грунтом и сосредоточены в верхнем полуметровом слое.

Породы всех отвалов не токсичны и представляют собой третичные и четвертичные супеси, суглинки, глины, алевролиты и аргиллиты.

Кроме отвалов изучалась залежь (заброшенное картофельное поле) и два природных луга, выбранных в качестве экосистем, находящихся в терминальной стадии. Первая - остепненный луг, ранее использовавшийся как сенокос, с 1985



Рис. 1. Пласты угля и отвалы (Назаровский угольный разрез).

г. – заповедный. Растительное сообщество луга, хотя и считалось терминальным, находилось в переходной сукцессии в связи с изменением режима использования. Вторая – мезофитный злаково-разнотравный луг, используемый как пастбище. Пастбищная нагрузка не велика и постоянна по силе.

Таким образом, мы имели:

- а) Отвалы, первично зарастающие – типичная первичная сукцессия, нет ни почвы, ни запаса семян. Сукцессионная серия включала отвалы с возрастом на начало наблюдений 1, 7 и 25 лет.
- б) Отвал, вторично зарастающий – нетипичная вторичная сукцессия, в грунте есть запас семян, но почва отсутствует.
- в) Залежь – типичная вторичная сукцессия, есть запас семян и почва.
- г) Луга – сенокосный и пастбищный, условно терминальные экосистемы, постоянно находящиеся в состоянии колеблющейся или возвратной сукцессии.

Методы исследования сукцессии растительности, сообщества микроорганизмов подробно описаны в книге «Сукцессии и биологический круговорот» [1993].

СУКЦЕССИЯ ВИДОВОГО СОСТАВА РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Проводя ежегодные, трехразовые в сезон описания растительности, мы за шесть лет наблюдений отметили, что динамика отдельных видов резко различна [Титлянова, Миронычева-Токарева, Косых, 1993]. Есть виды, выпадающие из травостоя и далее не появляющиеся в нем и виды, появившиеся в травостое и далее не исчезающие из него. Отнесем эти виды к сукцессионным. Есть виды, то появляющиеся в травостое, то исчезающие из него. Назовем их флюктуирующими. Наконец, есть виды, постоянно присут-

ствующие в сообществе, - устойчивые.

Доли трех выделенных групп видов от их общего числа показаны на рис. 2. Общее число видов, зарегистрированных за шесть лет, изменяется от 66 (зарастающий отвал, вторичная сукцессия) до 91 (сенокос с переменным режимом кошения). Во всех экосистемах есть виды, принадлежащие к трем названным группам. Доля сукцессионных видов максимальна на зарастающем отвале, доля устойчивых достигает половины от общего числа видов на сенокосном и пастбищном лугах.

Среди устойчивых есть 18 видов, которые встречаются во всех изученных нами экосистемах, существующих в режиме вторичной или возвратной сукцессии. Среди них два вида относятся к сорным (*Cirsium setosum*, *Taraxacum officinale*), 9 видов – к залежным (*Elytrigia repens*, *Cerastium arvense*, *Odontites serotina*, *Plantago media*, *Potentilla anserina*, *P. argentea*, *Trifolium pratense*, *T. repens*) и 8 видов – к тер-

минальным, которые входят в травостой естественных лугов и часто доминируют в нем (*Achillea millefolium*, *Agrostis gigantea*, *Festuca pratensis*, *Phleum pratense*, *Poa pratensis*, *Ranunculus submarginatum*, *Stellaria graminea*, *Vicia cracca*). Пятнадцать видов из данного списка входят в растительное сообщество семилетнего и четырнадцать видов – в травостой двадцатипятилетнего отвалов, зарастающих по типу первичной сукцессии.

Как мы видим, имеется характерная совокупность устойчивых видов (терминальных и залежных), постоянно обитающих в данной местности на пастбищах и сенокосах и поселяющихся на свободных поверхностях. Это ядро видового состава существует в сообществе в течение всей сукцессии и остается в нем на терминальной стадии. Следовательно, если привнос семян не ограничен, сукцессия в травяных экосистемах детерминирована и идет в сторону повышения обилия (численности и фитомассы) видов ядра.

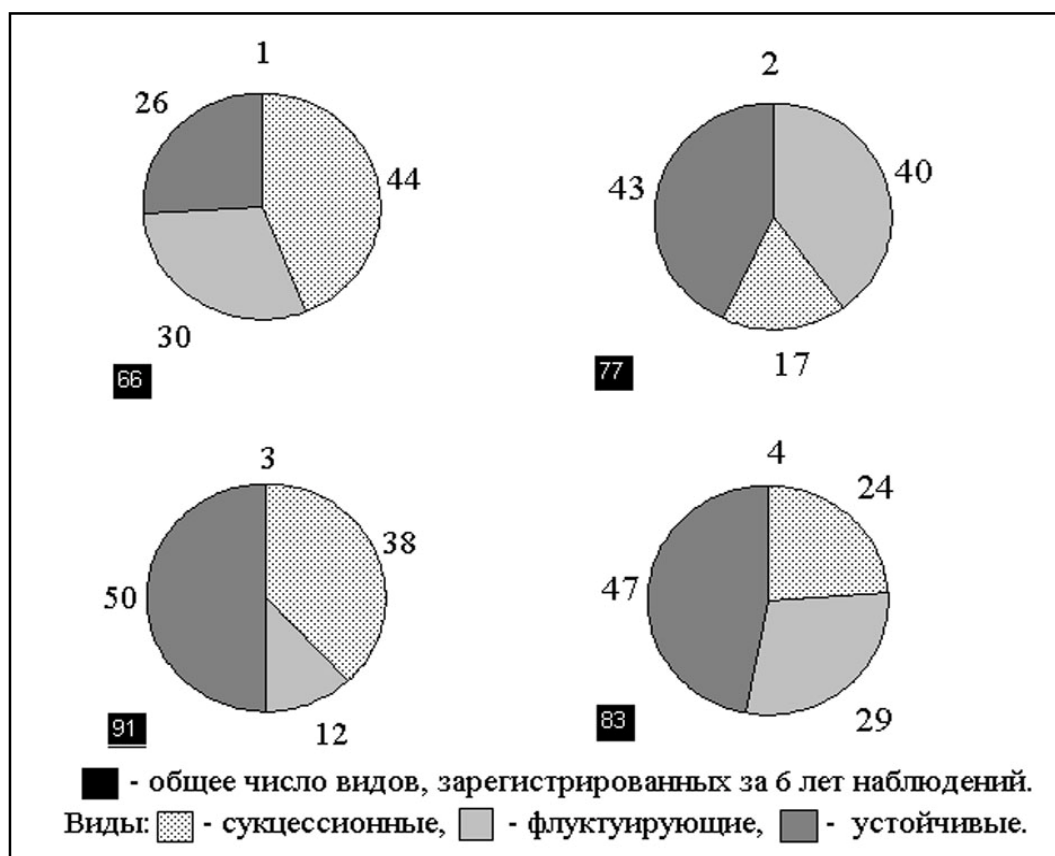


Рис. 2. Фитоценотический состав сукцессионных сообществ.

Сукцессии: 1 – вторичная, на отвале; 2 – вторичная, залежь; 3 – возвратная, сенокосный луг; 4 – колеблющаяся, пастбищный луг.

Однако случайность в сукцессии также существует, т.к. случайно могут меняться тип, частота и интенсивность антропогенного воздействия. Хотя ответ экосистемы на эти случайные факто-

ры будет определенным и повторяющимся при повторяемости фактора, само разнообразие факторов и их нерегулярная частота вызывает непредсказуемые изменения видового состава со-

общества. Следовательно, закономерные ответы на случайные воздействия могут выглядеть случайными и хаотичными. Второе проявление случайности – кратковременные изменения видового состава сообщества, вызванное динамикой флуктуирующих видов. В данном случае вариабельность видового состава определяется прежде всего колебаниями погодных условий и регенерационными циклами индивидуальных видов.

Таким образом, сукцессия в травяных сообществах детерминирована, несмотря на большую роль случайных факторов [Титлянова, Миронычева-Токарева, Косых, 1993а].

КАК РАЗВИВАЕТСЯ БИОТИЧЕСКИЙ КРУГОВОРОТ?

Осадочные породы содержат ископаемые углерод и азот (остатки былых биосфер по Вернадскому) в количестве 260 г С/м^2 и 25 г N/м^2 в слое 0-20 см. Ископаемые С и N – это изначальные фонды питания, которые могут использоваться рядом гетеротрофных организмов. В поднятой с глубины 20 м породе присутствуют бактерии – гетеротрофы, усваивающие растворенные соединения С и N. Следовательно, исходный субстрат содержит и питательные ресурсы и микроорганизмы, способные использовать эти ресурсы. С самого начала сукцессии есть все условия для включения гетеротрофного звена в геохимическую работу. Однако, концентрации бактерий и питательных элементов в свежеекспонированной породе очень низки, а следовательно поверхность отвала свободна для заселения. Ветер приносит на эту поверхность семена (до $2,5 \text{ тыс./м}^2$), клетки и споры бактерий (около $0,4 \text{ г/м}^2$ за сезон) и грибной мицелий (до 3 г/м^2 за месяц). Летят с ветром и простейшие и зародыши других мелких животных.

Таким образом, биотический круговорот (БК) начинается не с нуля, а с низкого старта и не с автотрофов, а с гетеротрофов. Начинается БК с первого месяца экспонирования породы.

Автотрофные процессы включаются после гетеротрофных, но развиваются очень быстро и дают свежий материал для интенсификации гетеротрофных процессов (рис. 3). В течение сукцессии происходит быстрая смена доминирующих видов, что определяет величины надземной (ANP) и подземной (BNP) чистой продукции. В первый год растительный покров на вторично зарастающем отвале был представлен отдельными растениями, их продукция была очень мала. На второй год, стеной поднялся донник (бобовое растение), в связи с чем ANP составила около 8 т/га . Минерализация на второй год была очень

низкой, т.к. мертвая фитомасса (мортмасса) еще не накопилась. На третий год доминировал осот, имеющий мощные корни, в связи с чем резко возросла подземная продукция (BNP); в этот же год интенсифицировался минерализационный и включился гумификационный процессы, началось образование почвенного органического вещества (ПОВ). Четвертый год характеризовался доминированием уже терминального вида (полевицы) и залежного (клевер). Лето было сухим и жарким, ANP и BNP были не велики, резко возросла минерализация мортмассы, накопление ПОВ сменилось его разложением. На пятый год доминировал клевер, интенсивности продуцирования и минерализации выровнялись, шло активное накопление ПОВ. На шестой год сукцессии доминантом в травостое был мятлик – один из характерных доминантов естественных лугов. Произошло увеличение надземной продукции и активизировался процесс минерализации ПОВ.

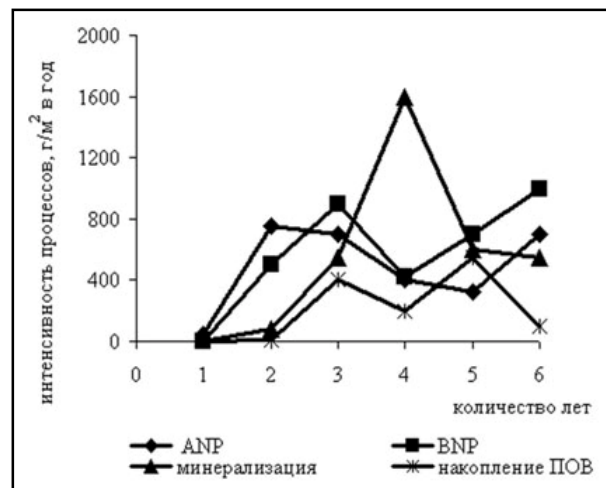


Рис. 3. Развитие процессов углеродного цикла при самозарастании отвала (вторичная сукцессия).

Как показано на рис. 3, биотический круговорот на спланированном отвале (вторичная сукцессия) развивается очень быстро. За шесть лет фитоценозы продуцировали в сумме 67 т/га органического вещества (ОВ). Три основных процесса углеродного цикла – продуцирование ОВ, его минерализация и гумификация, включаясь друг за другом, формируют полный круговорот уже на 3-й год развития экосистемы. За 6 лет достигается зональный уровень NPP и запасов ОВ. За этот срок из всего количества продуцированного органического вещества 37% пошло на образование живой и мертвой фитомассы, 17% - на формирование ПОВ, 2% - на накопление микроббиомассы и 44% было минерализовано до CO_2 .

Первая стадия БК – выход на стационарный уровень подсистемы растения – растительные

остатки длится 6 лет. За это время формируется 30% микроббиомассы и 10% ПОВ от их стационарного уровня. БК характеризуется уменьшением флюктуации запасов фитомассы и мортмассы и накоплением микроббиомассы. Третья стадия будет охватывать длительный период накопления зонального уровня ПОВ и выхода на стационарный уровень (S) подсистемы: растительные остатки > гумификация ПОВ > минерализация ПОВ [Титлянова, Миронычева-Токарева, Косых, 1993б]. Чтобы включилось деструкционное звено и сформировался круговорот N, нужно сообщество микроорганизмов.

СУКЦЕССИЯ СООБЩЕСТВА МИКРООРГАНИЗМОВ

Формирование комплекса микроорганизмов

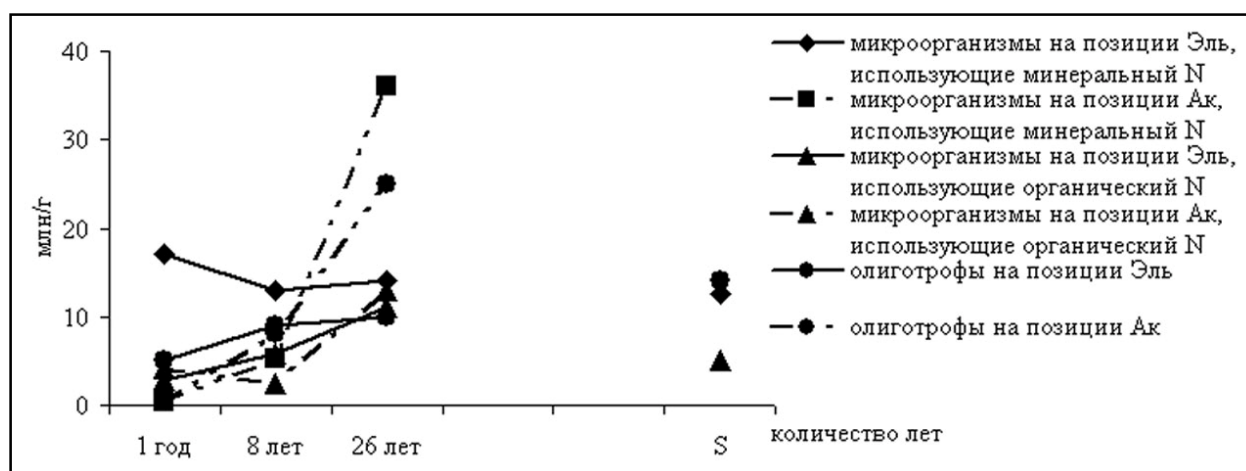


Рис. 4. Формирование комплекса микроорганизмов, первичная сукцессия.

На численность и ее изменение большое влияние оказывает позиция на катене. Через восемь лет сукцессии все три показателя численности выше на элювиальной, через 26 лет они выше на аккумулятивной позиции [Булавко, 1993].

Одним из характерных показателей развития биотического круговорота является запас почвенной микроббиомассы (МБ), которая накапливается довольно медленно (рис. 5). Через 26 лет первичной сукцессии МБ равна 62% от терминальной величины S, через шесть лет вторичной сукцессии на спланированном отвале МБ не превышает 30% от S. В течение сезона часть микроббиомассы отмирает и вновь образуется. Количество МБ, образующееся за год, представляет собой продукцию МБ. Продукция МБ через 26 лет первичной сукцессии (рис. 5) составляет 136% и через шесть лет вторичной сукцессии 52% от продукции МБ сенокосного луга (S). Следовательно, интенсивность процесса – продуцирование МБ – в ходе сукцессии растет быстрее, чем запас МБ.

происходит очень быстро (рис. 4). Уже через год экспонирования породы количество микроорганизмов разных групп, определяемых по количеству колоний, выросших на определенных средах, достигает от 3 до 132% от стационарных величин. Для каждой группы характерна своя динамика. На позиции Эль резко отличаются группы, потребляющие $N_{\text{мин}}$ и $N_{\text{орг}}$. Количество микроорганизмов смов, потребляющих N минеральный, почти постоянно и с первого года сукцессии выше, чем в терминальной экосистеме. На этой же позиции бактерии, использующие органические формы азота, накапливаются медленнее, только через 8 лет их численность сравнима с терминальной. Однако через 26 лет сукцессии численность превышает терминальную в два раза.

При лизисе клеток МБ азот освобождается, при образовании новых клеток – потребляется ими. Количество N, потребленного МБ в течение года для образования новой массы, является потоком N через МБ. Этот поток достигает 51% от S через 26 лет первичной сукцессии и 86% через шесть лет вторичной сукцессии (рис. 5) [Наумова, 1993].

Рост микроббиомассы обеспечивает увеличение интенсивности процессов азотного цикла в ходе сукцессии (рис. 6). Уже в первый год первичной сукцессии на отвалах складывается полный азотный цикл, включающий вход N в экосистему (азотфиксация), метаболизм внутри экосистемы (нитрификация) и выход из экосистемы (денитрификация). Интенсивность входных и выходных потоков N нарастает быстрее внутриэкосистемный потоков. Так через 25 лет первичной сукцессии оба вида азотфиксации составляли половину от S, выходной поток (денитрификация) был выше S в два раза, а интенсивность нитрификации не превышала 40% S. Выход на

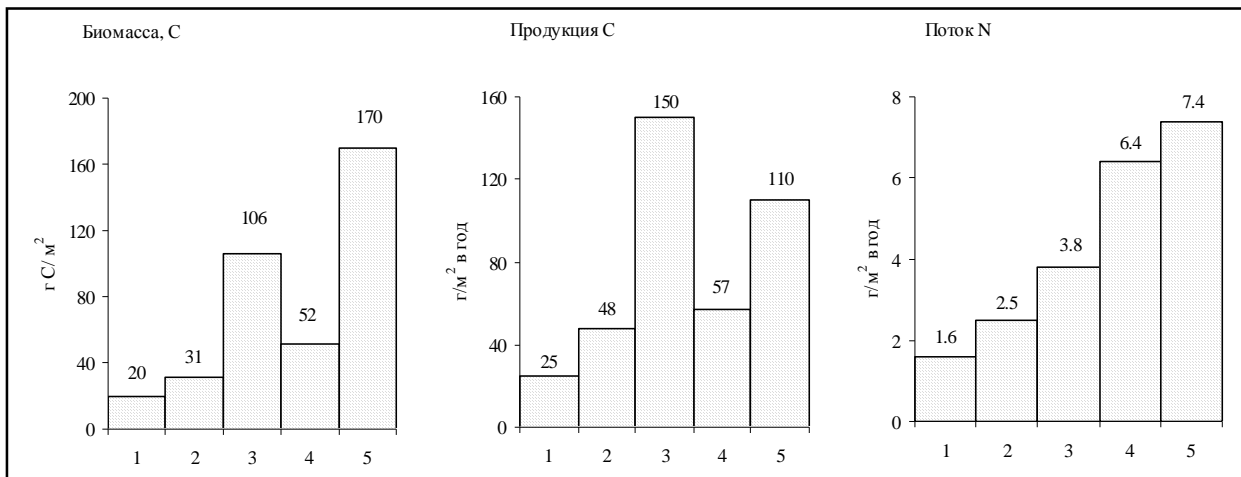


Рис. 5. Формирование микроббиомассы, ее продукции и потока N через микроббиомасу, слой субстрата 0-20 см. 1,2,3 – позиция Эль самозарастающих отвалов: 1 – второй год; 2 – восемь лет; 3 – двадцать шесть лет первичной сукцессии; 4 – отвал, шесть лет вторичной сукцессии; 5 – сенокосный луг.

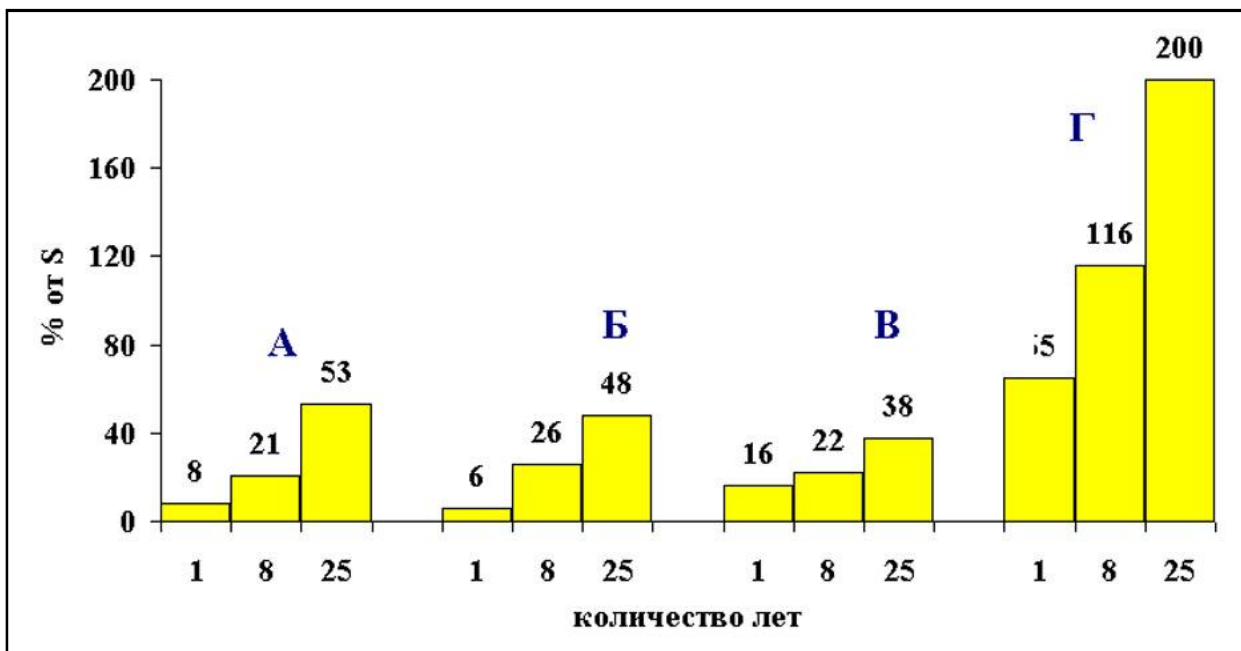


Рис. 6. Интенсивность процессов азотного цикла в % от терминальной величины S (сенокосный луг). А – азотная азотфиксация, Б – анаэробная азотфиксация, В – нитрификация, Г – денитрификация. Первичная сукцессия.

стационарный уровень различных потоков азотного цикла достигается за разное время. Необходимо отметить также, что флюктуационная составляющая азотных потоков в течение сукцессии очень велика [Гантимурова, Косинова, 1993].

Баланс азота был оценен для травяной экосистемы четвертого-пятого годов вторичной сукцессии на спланированном отвале (табл. 1).

Разница между потреблением N растениями+микробной биомассой и поступлением N в экосистему составляет 9-11 г/м²·год. Эта разница

Таблица 1. Примерный баланс азота в экосистемах серии вторичной сукцессии

Требуется	N г/м ² год	Поступает	N г/м ² год
для создания продукции растений	16-20	с азотфиксацией цианобактериями	10-12
для обновления микроббиомассы	6	с азотфиксацией гетеротрофными бактериями	3
Итого:	22-26	Итого:	13-15

покрывается за счет симбиотической фиксации N доминирующими видами бобовых растений (донник, клевер). Уже на четвертый год вторичной сукцессии используется азот, накопленный растениями. Избыток N уходит на образование ПОВ и на денитрификационные процессы.

СУКЦЕССИИ ПРОСТЕЙШИХ И ПАНЦИРНЫХ КЛЕЩЕЙ

Простейшие (жгутиконосцы, амёбы, инфузории) заселяют субстрат отвалов с первых же часов после выноса породы на поверхность. Споры простейших, также как микроорганизмы, изначально присутствуют в породе, находящейся на глубине десятков метров. Суглинистая порода вторично зарастающего отвала уже через двое суток после планирования имеет богатое население простейших (табл. 2).

Уже через двое суток вторичной сукцессии общая численность простейших и число их видов близки к соответствующим показателям терминальной экосистемы. Через две недели достигается пик общей численности и видового разнообразия. В дальнейшем от года к году идет плавное снижение численности и колеблющееся снижение числа видов. Движение к стационарному состоянию у всех трех групп простейших совершается по разным кривым. У жгутиконосцев численность характеризуется двумя пиками, число видов максимально через год. Через четыре года сукцессии оба показателя близки к терминальным. Численность и видовое разнообразие амёб максимальны после 1 года сукцессии. Резкое снижение показателей происходит на третий год сукцессии, на четвертый год численность и число видов увеличиваются, однако численность остается ниже терминальной величины.

Численность инфузورий максимальна через 2 года сукцессии и превосходит терминальную численность в семь раз. На третий год сукцессии и численность и видовое разнообразие снижаются, эти показатели вновь повышаются на четвертый год, не достигая, однако, терминальных величин.

На первых стадиях сукцессии простейших преобладают виды с высокой скоростью метаболических процессов. В дальнейшем идет перестройка видовой структуры сообщества, причем скорость сукцессии простейших особенно велика на пионерном этапе развития экосистемы [Мордкович, 1993].

Развитие сообщества панцирных клещей изучалось в серии экосистем первичной сукцессии (возраст экосистем – 1 месяц, 7 и 27 лет), а также в возрастном ряду экосистем (от 1 до 25 месяцев) вторичной сукцессии [Андреевский, 1993].

В ходе первичной сукцессии заселение одномесячного отвала происходило за счет немногих малочисленных видов. Во второй стадии сукцессии (1 мес.-7 лет) сообщество клещей становилось монодоминантным и развивалось за счет увеличения численности доминирующего вида. В третьей стадии (7-25 лет) происходит переход к полидоминантному сообществу. При вторичной сукцессии динамика численности имеет, несмотря на ее пульсирующий характер, устойчивую тенденцию к росту с увеличением возраста экосистемы. Динамика видового разнообразия на начальном этапе (1-5 месяцев) коррелирует с динамикой численности. Во второй фазе сукцессии (5-13 месяцев) численность возрастает лишь за счет двух наиболее многочисленных видов. На третьем этапе (13-21 месяц) следует качественный скачок и видовое разнообразие вновь начинает увеличиваться. Темпы сукцессий чрез-

Таблица 2. Характеристика сукцессии сообщества простейших

Сукцессионная серия экосистем	число особей, тыс/г	число видов	жгутиконосцы		амёбы		инфузории		биомасса, г/м ²
			1	2	1	2	1	2	
вторичная сукцессия на отвале:									
2 сут.	45,0	10	39	4	6	5	0,02	1	0,3
2 нед.	128,3	19	112	5	16	9	0,05	5	0,5
1 год	118,8	19	7	6	111	10	0,06	3	2,7
2 года	71,6	18	4	4	8	8	4,20	5	3,0
3 года	72,5	6	70	2	2	3	0,06	1	1,7
4 года	33,2	9	2	2	28	4	0,3	3	0,8
первичная сукцессия на отвале:									
25 лет	24,3	11	3	4	51	5	0,2	2	0,8
мезофитный луг, пасбище, S	79,8	13	2	3	77	4	0,6	6	1,3

Примечание: 1 – тысяч/г субстрата; 2 – число видов. По: [Мордкович, 1993].

вычайно медленные. Сообщество, складывающееся в ходе вторичной сукцессии, имеет сходство с луговым сообществом. Сообщество же панцирных клещей в 25-летней экосистеме первичной сукцессии – специфическое образование, мало напоминающее естественной сообщество [Андриевский, 1993].

Таким образом, характер сукцессии простейших резко отличается от картины сукцессии панцирных клещей. Кроме того, различные группы простейших (жгутиконосцы, амёбы, инфузории) демонстрируют разные траектории движения к стационарному состоянию; развитие же сообщества панцирных клещей имеет различную специфику при первичной и вторичной сукцессии.

ВЫВОДЫ

На основе анализа сукцессий растительности, микроорганизмов, простейших, панцирных клещей сделаны следующие выводы:

1. Общие закономерности в сукцессиях отдельных компонентов биоты не улавливаются. Каждое сообщество характеризуется специфическим сукцессионным процессом и траектории перехода определенных параметров к стационарному состоянию в разных сообществах различны.
2. Численность, число видов и масса компонентов биоты достигают стационарного уровня гораздо раньше, чем видовая структура сообщества с ее иерархией доминантов, субдоминантов, часто и редко встречающихся видов.
3. Главнейшим фактором закономерного и направленного развития растительных сообществ является участие в сукцессии с ее первых стадий совокупности видов, принадлежащих к терминальным и залежным и отличающихся высоким обилием в зональных луговых экосистемах.
4. Биотический круговорот С, связанный с сукцессией растительности и микроорганизмов, развивается очень быстро. Основной процесс – фотосинтез – начинается с 1-го года сукцессии. Ко 2-му году происходит отмирание части фитомассы и формируется минерализационный поток, интенсивность которого быстро возрастает. На 3-ий год сукцессии включается процесс образования почвенного органического вещества, на 6-ой год – процесс его минерализации. Через 8 лет сукцессии интенсивность минерализационного потока достигает 50% от NPP.
5. На любой стадии сукцессии доля С в почвенном органическом веществе от общего количества С в экосистеме не падает ниже 50% и возрастает с развитием биотического круговорота до 93% в терминальных экосистемах. В процессе развития биотического круговорота происходит накопление С в основном в инерт-

ной форме (устойчивые к разложению фракции почвенного органического вещества).

6. В ходе сукцессии биотический круговорот становится все более закрытым, а скорость обмена общих запасов С и N все более медленной. Данный вывод совпадает с основными положениями модели Ю. Одума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреевский В.С. Почвенные клещи // Сукцессии и биологический круговорот. Новосибирск: ВО «Наука». Сиб. Отд-ние, 1993. С. 66-77.
2. Булавко Г.И. Первичная сукцессия комплекса почвенных микроорганизмов // Сукцессии и биологический круговорот. Новосибирск: ВО «Наука». Сиб. Отд-ние, 1993. С. 39-44.
3. Гантимурова Н.И., Косинова Л.Ю. Метаболизм азота в техногенных экосистемах // Сукцессии и биологический круговорот. Новосибирск: ВО «Наука». Сиб. Отд-ние, 1993. С. 91-104.
4. Мордкович В.Г. Простейшие // Сукцессии и биологический круговорот. Новосибирск: ВО «Наука». Сиб. Отд-ние, 1993. С. 61-66.
5. Наумова Н.Б. Формирование биомассы почвенных микроорганизмов в ходе первичной сукцессии // Сукцессии и биологический круговорот. Новосибирск: ВО «Наука». Сиб. Отд-ние, 1993. С. 44-52.
6. Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
7. Сукцессии и биологический круговорот. Новосибирск: ВО «Наука». Сиб. Отд-ние, 1993. 157 с.
8. Титлянова А.А., Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П. Сукцессия растительности // Сукцессии и биологический круговорот. Новосибирск: ВО «Наука». Сиб. Отд-ние, 1993а. С. 14-36.
9. Титлянова А.А., Миронычева-Токарева Н.П., Косых Н.П. Продукционно-деструкционные процессы в сукцессии // Сукцессии и биологический круговорот. Новосибирск: ВО «Наука». Сиб. Отд-ние, 1993б. С. 77-84.
10. Титлянова А.А. Сравнительный анализ продуктивности центрально-азиатских и причерноморско-казахстанских степей // Степи Центральной Азии / И.М. Гаджиев, А.Ю. Королюк, А.А. Титлянова и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 174-200.
11. Clements F.E. Plant succession. Washington: Pubs, 1916. 621 p.
12. Connell J.H., Slatyer R.O. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization // Amer. Naturalist. 1977. Vol. 3, N 982. P. 1119-1144.
13. Margalef R. Perspectives in ecological theory. Chicago: Univ. Chicago Press, 1968. 112 p.
14. Whittaker R.H. Communities and ecosystems. N.Y.: MacMillan, 1975. 385 p.

ECOSYSTEMS SUCCESSION AND BIOTIC TURNOVER

© 2009 A.A.Titlyanova

Soil science and agrochemistry institute RAS, Novosibirsk;
e-mail: argenta@issa.nsc.ru

This paper describes primary and secondary revegetation and biotic turnover development on coal-mining spoils. Succession of different components of biota, development peculiarities of plant, microorganism and protist communities in the course of primary and secondary successions, the linkage between ecological successions and biotic turnover are described for different stages of succession with an natural meadow as the steady-state ecosystem.

Key words: *biota, biotic turnover, coal sailings, successions.*

УДК 591.8+517.983

ООГЕНЕЗ ЛЯГУШКИ И КВАЗИ-ПАРЕТОВСКИЙ ЗАКОН НА ОСНОВЕ НОВОЙ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ

© 2009 О.Б. Трубникова¹, Б.А. Трубников²¹ Институт биологии развития им. Н.К.Кольцова РАН, Москва; e-mail: oxtr@mail.ru² Институт ядерного синтеза РНЦ «Курчатовский институт», Москва; e-mail: trubboris@yandex.ru

Исследовано распределение по размерам популяции ооцитов в яичнике травяной лягушки. Представлены результаты применения модели «конкуренентов», отражающей «квази-паретовский закон».

Ключевые слова: закон Парето, теоретическая экология, оогенез.

ВВЕДЕНИЕ

На фоне быстро и успешно развивающегося математического моделирования в биоэкологии все более осязаемой становится потребность в количественных моделях, описывающих популяционные закономерности в оогенезе. Несмотря на значительные успехи в понимании механизмов сложных гормонозависимых процессов, обеспечивающих рост и развитие отдельных ооцитов, описание этих процессов на уровне популяции ооцитов яичника остается одной из нерешенных задач. В эмбриологии млекопитающих она имеет непосредственное отношение к пониманию механизма выделения доминантного фолликула (Ireland et al., 2000), а в репродуктивной медицине - к проблеме сниженного овариального резерва и проблеме отбора эмбриона при осуществлении вспомогательных манипуляций с целью преодоления бесплодия (Никитин, 2005). У низших позвоночных она, по-видимому, связана с определением индивидуального репродуктивного потенциала, оценка которого, например, в рыбоводстве, имеет принципиальное значение при отборе производителей (Goncharov, 2002). К настоящему времени этот аспект оогенеза исследован недостаточно, так как не вполне определены подходы, которые можно применять для его изучения.

Оогенез низших позвоночных включает несколько этапов (деление, рост, созревание ооцитов и овуляцию зрелых гамет) и продолжается длительный период времени. Так, на формирование зрелой яйцеклетки у лягушки требуется три года (Рис. 3), а размеры клетки при этом увеличиваются в десятки тысяч раз (Токин, 1989). Поскольку ткани яичника объединяют развивающиеся ооциты нескольких возрастных генераций, популяцию ооцитов внутри яичника можно рассматривать как пример сообщества, состоящего из большого количества взаимосвязанных

и взаимодействующих элементов. Так как скорость роста клетки, как правило, пропорциональна её массе (Мина, Клевезаль, 1976), то даже если вначале ооциты определенной генерации имели одинаковые массы, влияние различных случайных факторов в процессе их экспоненциального роста, приводит в итоге к их неравномерному распределению по массам.

Целью данного исследования было изучение особенностей распределения совокупности ооцитов по морфометрическим характеристикам с помощью предложенной ранее авторами модели «конкуренентов», основанной на квази-паретовском законе (Трубников, 1993; Trubnikov, Trubnikova, 2005; Трубников, Трубникова, 2007а, 2007б).

Рассмотрим вначале два сходных рисунка, представляющих частотные распределения элементов различных систем. (Рис. 1).

В логарифмических координатах они примерно соответствуют прямым линиям с наклоном в 45°. Это означает, что в линейных координатах они имеют дифференциальные спектры, соответствующие «чисто паретовскому закону», с наклоном правой ветви спектра ($n_k = Ak^{-2}$, где A – нормировочный коэффициент, и k – отличительный признак).

Далее приведём иные примеры (Рис. 2).

Эти графики вероятностных распределений имеют наклоны и в правой и в левой ветвях спектра и описываются иной формулой, которую мы условимся называть «квази-паретовским законом распределения».

МОДЕЛЬ

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. В данной работе рас-

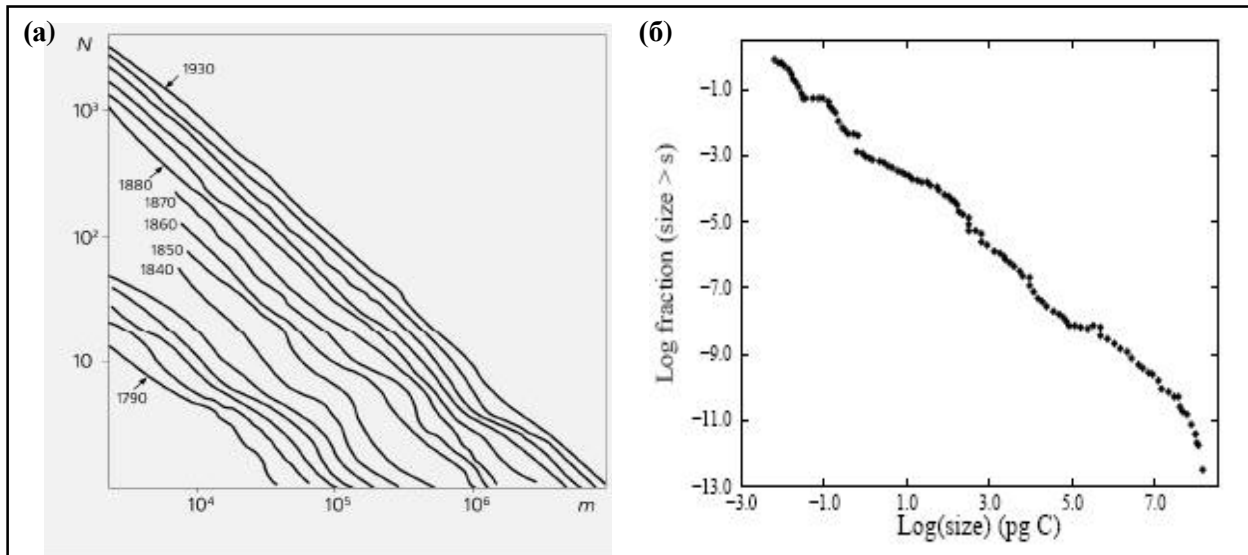


Рис.1. Интегральные спектры различных распределений: (а) - распределение числа городов (США) по числу жителей (Трубников, 1993); (б) – распределение числа организмов океана по массам (Camacho, Sole, 2001).

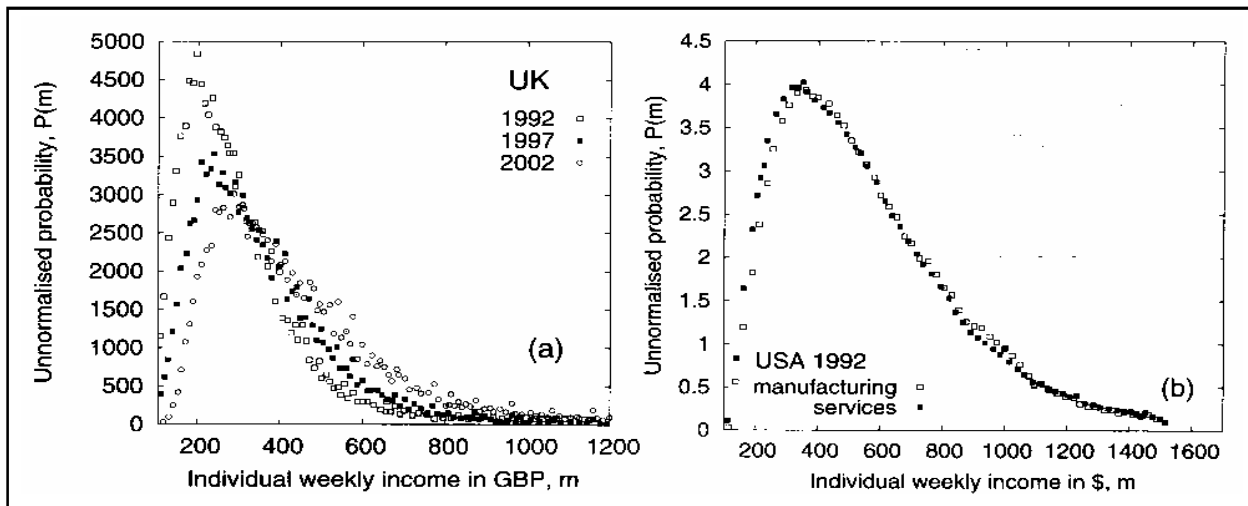


Рис. 2. Распределение относительного числа граждан Англии (а) и США (б) по доходам за неделю (Chatterjee, Chakrabarti, 2007)

сматривается 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 час-

тиц 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 (здесь R_k - доля ресурса, приходящаяся на один кластер k -типа):

$$N = \sum_k N_k = \sum_k n_k k = const, K = \sum_k n_k = const, R = \sum_k R_k n_k = const, \quad (1)$$

Общий статистический вес такого множества, по определению, считается равным

$$\Omega = A_1 / B_1 C_1, \quad \text{где } A_1 = (N-1)!, \quad B_1 = \prod_k (k!)^{n_k} \quad \text{и} \quad C_1 = \prod_k (N_k - 1)!, \quad (2)$$

а энтропия задается логарифмом стат-веса $S = \ln \Omega$.

Для сравнения укажем формулы для стат-весов в статистике Ферми-Дирака для фермионов и статистике Бозе-Эйнштейна для бозонов, где

N – число частиц, K – число возможных состояний частиц (Ландау и Лифшиц, 1964):

$$\Omega_{ФД} = A_2 / B_2 C_2 = K! / N!(K-N)!, \quad (3)$$

$$\Omega_{БЭ} = A_3 / B_3 C_3 = (N+K-1)! / N!(K-1)!.$$

Важно отметить, что статистический вес Ω является квантовой характеристикой множества частиц. Он указывает число всех возможных состояний множества и *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. Подобная процедура лежит в основе всех обсуждаемых квантовых статистик.

Квазиклассическое приближение.

В классическом пределе все факториалы можно заменить формулами Стирлинга, и тогда статистический вес (2) оказывается равным произведению малых стат-весов

$$\Omega = \prod_k \Omega_k, \text{ где } \Omega_k \approx (eN / k^2 n_k)^{N_k} \quad (4)$$

Он уже *не обязан быть целым числом*, а требование максимума энтропии при трех дополнительных условиях (1) приводит к дифференциальному спектру кластеров

$$n_k \approx \frac{N}{k^2} \exp(-\alpha - \frac{\beta + \gamma R_k}{k}) = \frac{A}{k^2} \exp(-\frac{\beta + \gamma R_k}{k}) \quad (5)$$

где α, β, γ - три параметра Лагранжа, и A - множитель общей нормировки системы «конкуренгов».

При больших значениях аргумента k эта формула дает закон Парето $n_k = Ak^{-2}$, а при малых k проявляется влияние «обрезающей» экспоненты в левой части спектра. С учетом этих свойств условимся называть предлагаемую закономерность квази-паретовским законом.

Во многих случаях для ресурса возникает пропорциональная зависимость ресурса от числа объектов в кластере, $R_k \propto k$, тогда параметр γ можно опустить, и в интегральной форме квази-паретовский закон принимает вид:

$$N(> m) = (A / \beta)[\exp(-\beta / m_{max}) - \exp(-\beta / m)] \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки применимости модели к распределению совокупности ооцитов нами были получены морфометрические характеристики развивающихся ооцитов травяной лягушки *Rana temporaria* L. Измерения проводили в программе Photoshop 8.0 по микрофотографиям ткани яич-

ника, сделанных с помощью цифровой камеры с разрешением 10 мега-пикселей (Рис. 3). На основании значений максимальных и минимальных диаметров 150 ооцитов, расположенных в непосредственной близости друг от друга в пределах определенного участка ткани яичника, вычисляли их условный объем и условную массу. Полученные данные аппроксимировали с помощью формулы «квази-паретовского закона». Аналогичным образом были обработаны данные для трех самок.



Рис. 3. Фотография участка яичника; видны окруженные тканями яичника ооциты разных размеров.

На рисунке 4 представлен один из примеров полученных распределений. Видно, что предложенная модель «конкуренгов» весьма хорошо описывает результаты измерений (Рис. 4 б). Наличие в формуле левой «обрезающей» экспоненты обеспечивает соответствие линии регрессии экспериментальным данным в области малых значений аргумента по сравнению с формулой собственно закона Парето (Рис. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ

На основании предложенной статистики нами получена формула распределения объектов множества

$$N(> m) = (A / \beta)[\exp(-\beta / m_{max}) - \exp(-\beta / m)],$$

где величина $N(> m)$ указывает число объектов, массы которых превышают текущее значение m , A является множителем нормировки; m_{max} есть масса самого крупного из них, а «управляющий параметр» β , некоторое её «промежуточное значение». В предельном случае формула принимает вид закона Парето, поэтому она была условно названа квази-паретовским законом. Применение формулы для распределения ооцитов по массам показало ее высокую адекватность в качестве модели.

Мы предполагаем, что квази-паретовский закон описывает явление, известное в популяционной экологии как «конкуренция за ресурс»

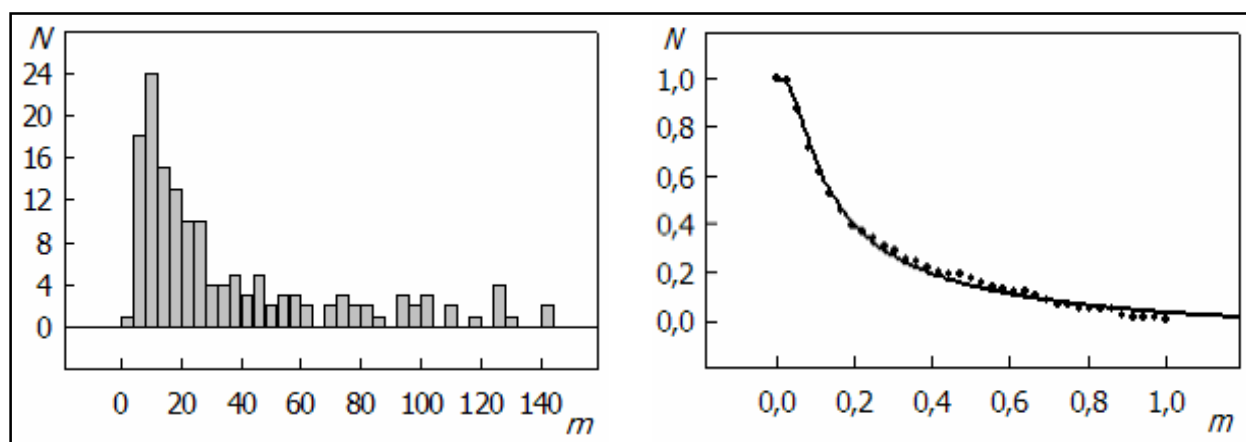


Рис. 4. Дифференциальный (а) и интегральный (б) спектры распределения ооцитов по массам; линия соответствует аппроксимации с помощью формулы квази-паретовского закона.

(Трубников, Трубникова, 2005), а параметры формулы позволяют отслеживать состояние системы. Данное исследование представляет собой начальный этап в осуществлении предлагаемого нами подхода. Однако полученный результат демонстрирует, что этот подход может быть использован в дальнейшем для описания популяции ооцитов яичника в условиях воздействия различных гормональных и экологических факторов.

В математическом моделировании биологических процессов или состояния системы важным элементом является выбор правильного уравнения или системы уравнений наиболее адекватно описывающих изучаемое явление.

Нами получена формула распределения элементов системы, которая хорошо описывает целый спектр различных биологических, социальных и физических систем в широком диапазоне масштабов. Ее преимуществами являются небольшое число параметров, учитывающих интегральный вклад многочисленных воздействующих факторов, а также способность успешно аппроксимировать и правую и левую части размерного спектра.

Таким образом, формула квази-паретовского закона, полученная на основе предложенной новой статистики, может служить удобной моделью не только в дальнейшем изучении динамики репродуктивной системы у низших позвоночных, но и при исследованиях других сообществ и отдельных популяций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин А.И. Некоторые вопросы фолликуло- и оогенеза, оплодотворения при проведении процедур вспомогательной репродукции // Лечение женского и мужского бесплодия. Вспомо-

- гательные репродуктивные технологии (под ред. В.И. Кулакова, Б.В. Леонова, Л.Н. Кузьмичева). М.: МИА, 2005. С. 33-42.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. С. 183.
3. Мина М.В., Клевезаль Г.А. Рост животных. М.: Наука, 1976. С. 21.
4. Токин Б.П. Эмбриология. М.: Мир, 1989. С. 59.
5. Трубников Б.А. Закон распределения конкурентов // Природа. 1993. № 3. С. 3-13.
6. Трубников Б.А., Трубникова О.Б. Распределение конкурентов с тремя параметрами // Матер.межд. конф. «Вперед в будущее», Москва, ИПМ РАН, 2007. URL: <http://nonlin.ru/node/116> (дата обращения 10.09.2009).
7. Трубников Б.А., Трубникова О.Б. Пять великих распределений // Общ. и прикл. ценология. 2007. № 11. С. 13-20.
8. Camacho J., Sole R.V. Scaling and Zipf's law in ecological size spectra // Europhys. Lett. 2001. V.55. P.774-780.
9. Chatterjee A., Chakrabarti B.K. Kinetic exchange models for income and wealth distributions // Europ. Physical. J. B. 2007. V. 60. N 11. P.135-149.
10. Goncharov B.F. In vitro approach to studying the mechanisms of final oocyte maturation in sturgeon: Fundamental and applied aspects // J. Fish. Biol. 2002. V.18. P. 368-374.
11. Ireland J.J., Mihm M., Austin E., Diskin M.G., Roche J.F. Historical perspective of turnover of dominant follicles during the bovine estrous cycle: key concepts, studies, advancements, and terms // J. Dairy Sci. 2000. V. 83. № 7. P. 1648-1658.
12. Trubnikov B.A., Trubnikova O.B. Theory of Competition // Book of abstr.13th Gen. Conf. of the Euro Physical Society. «Beyond Einstein – Physics for the 21st Century».Bern, 2005. P.119.

**FROG OOGENESIS AND THE QUASI-PARETO'S LAW ON
THE BASIS OF NEW QUANTUM STATISTICS**

© 2009 O.B. Trubnikova¹, B.A. Trubnikov²

¹Koltzov Institute of Developmental Biology of Russian Academy of Sciences, Moscow;
e-mail: oxtr@mail.ru

²Russian Research Center “Kurchatov Institute”, Nuclear fusion Institute, Moscow;
e-mail: trubboris@yandex.ru

Research of size distribution of the oocytes population in the common frog ovary conducted. Results of applying the “competitors” model reflecting «quasi-Pareto's law» are presented.

Key words: Pareto's law, theoretical ecology, oogenesis.

УДК 631.432.2.001.573

МЕТОД РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ВЛАГОЗАПАСОВ ПОЧВЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ КРУГЛОГОДИЧНОГО АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

© 2009 С.Е. Варчева

Государственное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии», г. Обнинск;
e-mail: s.varcheva@mail.ru

Представляется математическая модель, описывающая круглогодичную динамику запасов почвенной влаги 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.

Ключевые слова: запасы почвенной влаги, мониторинг климата.

Для целей разрабатываемой в настоящее время в ГУ «ВНИИСХМ» системы круглогодичного мониторинга условий увлажнения посевов сельскохозяйственных культур [1] 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, такими, например, как [2,3], 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 важнейшим 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 [4,5,6].

Предлагаемая схема расчета режима увлажнения посевов сельскохозяйственных культур основывается на использовании балансовых уравнений – для запасов воды в снежном покрове и в метровом слое почвы. Моделируются процес-

сы накопления воды в снежном покрове, интенсивность таяния снега, испарение с поверхности почвы и динамика влагозапасов в метровом слое почвы.

Уравнение, описывающее динамику запасов воды в снежном покрове, представим в виде:

$$V^{j+1} = V^j + (1 - S^{j+1})R^{j+1} - \Delta V_f^{j+1},$$

где V^j , V^{j+1} – запасы воды (мм) в снежном покрове на конец текущей (j) и следующей ($j+1$) декады, R^{j+1} – осадки за декаду (мм), S^j – доля жидких осадков, ΔV_f^j – интенсивность таяния снега (мм).

Интенсивность таяния снега определяется по формуле:

$$\Delta V_f^{j+1} = \begin{cases} \Delta V_p^{j+1}, & \text{если } \Delta V_p^{j+1} < V^j \\ V^j, & \text{если } \Delta V_p^{j+1} \geq V^j, \end{cases}$$

где потенциальное таяние снега ΔV_p^j в свою очередь, вычисляется следующим образом:

$$\Delta V_p^{j+1} = \begin{cases} a \cdot 10 (T^{j+1} + \Delta T), & \text{если } T^{j+1} + \Delta T \geq 0; \\ 0, & \text{если } T^{j+1} + \Delta T < 0; \end{cases}$$

здесь T^j – средняя декадная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), a – коэффициент стаивания (мм/ $^{\circ}\text{C}$), ΔT – константа ($^{\circ}\text{C}$).

В данной расчетной схеме принимается, что доля жидких осадков пропорциональна температуре воздуха:

$$S^{j+1} = \begin{cases} 1, & \text{если } T^{j+1} > T_{\max}; \\ \alpha T^{j+1} + \beta, & \text{если } T_{\min} \leq T^{j+1} \leq T_{\max}; \\ 0, & \text{если } T^{j+1} < T_{\min} \end{cases}$$

где α , β , T_{\max} , T_{\min} – некоторые константы.

Уравнение баланса воды для метрового слоя

почвы (W^j) запишем в виде:

$$W^{j+1} = W^j - \left(\frac{W^j}{W_{1\max}} \right) E_0^{j+1} + \left[1 - \left(\frac{W^j}{W_{\max}} \right) \right] S^{j+1} R^{j+1} + \left[1 - \left(\frac{W^j}{W_{\max}} \right) \right] \Delta V_f^{j+1}$$

Здесь $W_{1\max}$ и W_{\max} - некоторые константы (мм), которые рассчитываются с учетом водно-физических свойств почвы (полной и наименьшей влагоемкости и влажности завядания), E_0^{j+1} - максимально возможное испарение (испаряемость), которое определяется по модифицированной формуле Н.Н. Иванова [7]:

$$E_0^j = 0,06(25 + T^j)^2 \frac{d^j}{E_H^j},$$

где d^j - средний декадный дефицит влажности воздуха (мб), E_H^j - насыщающая упругость водяного пара (мб), зависящая от температуры воздуха:

$$E_H^{j+1} = 6,11 \exp\left(\frac{17,4T^{j+1}}{T^{j+1} + 239}\right)$$

Предполагается, что система численного мониторинга влагозапасов почвы 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 1971-1986 гг. Почвенный покров – тяжело-суглинистый предкавказский чернозем. На рис. 1 представлены результаты двух численных экспериментов, проведенных после предварительной калибровки параметров модели водно-теплого режима. Эти данные позволяют сделать вывод о достаточно высокой сходимости рассчитанных и измеренных значений запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы. В первом эксперименте (рис. 1а) 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 $r = 0,90$).

Во втором эксперименте (рис. 1б) 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 дефицита влажности воздуха – обеспечивает достаточную для практики точность мониторинга влагозапасов в круглогодичном режиме.

Для оценки влияния изменений климата на водно-тепловой режим посевов сельскохозяйственных культур, что входит в круг задач, решаемых с помощью разрабатываемой системы мониторинга, необходимы расчеты динамики влагозапасов почвы на протяжении 30-50 лет. Такой непрерывный численный эксперимент с декадным шагом по времени был осуществлен на материалах наблюдений ГМС Гигант Ростовской области с 1966 по 2006 гг. Расчеты, проведенные за 40 лет (1440 декад), показали хороший результат: коэффициент корреляции между рассчитанными и измеренными запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы равен 0,78. На рис. 2 представлены результаты сопоставления рассчитанных среднемесячных значений влажности почвы с фактическими значениями за период с 1966 по 2006 гг.

Технология мониторинга изменений климата для сельского хозяйства, а также перечень основных агроклиматических показателей для мониторинга приведена в методике [8].

В таблице представлены значения некоторых метеорологических параметров, входящих в систему мониторинга водно-теплого режима

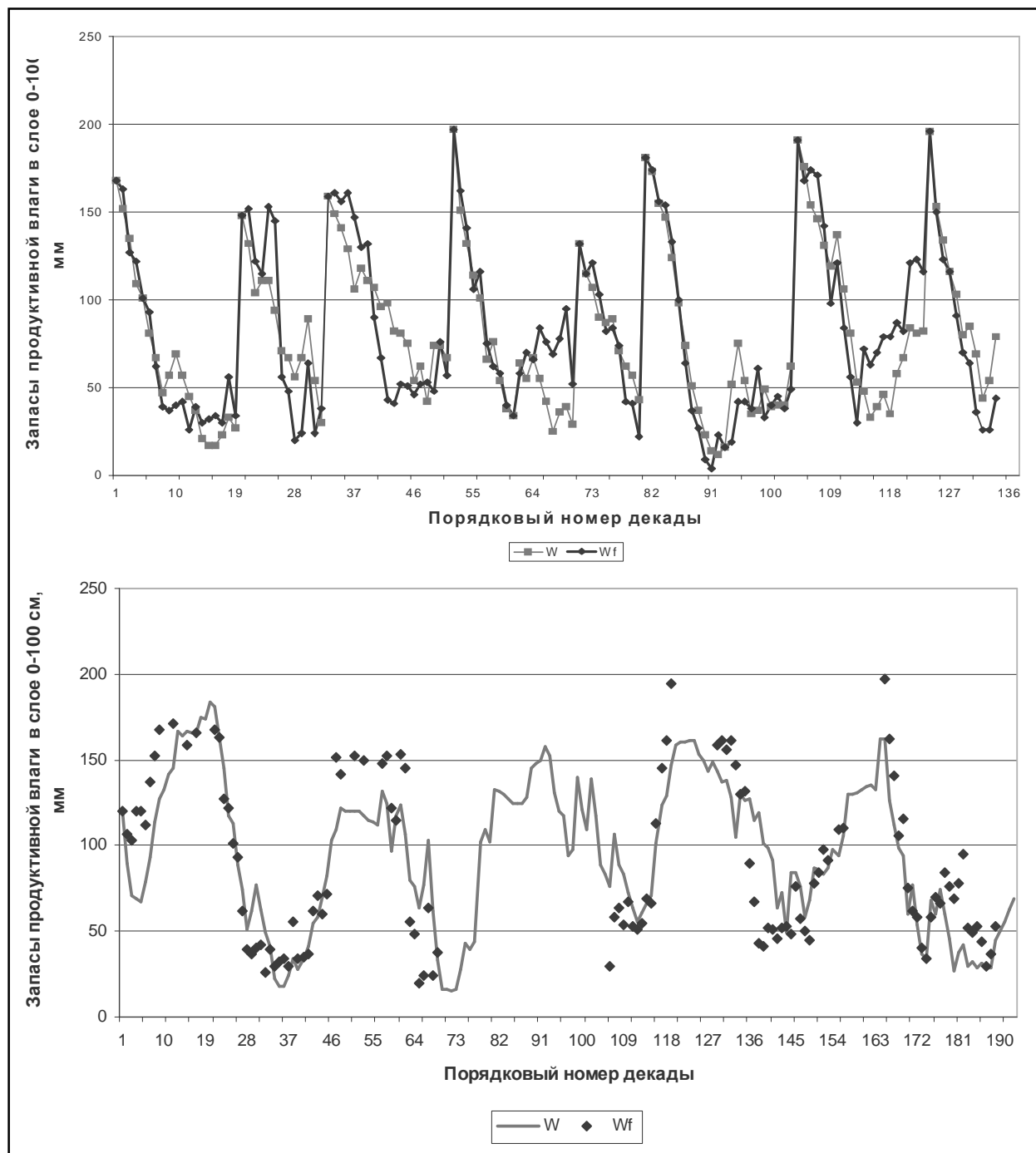


Рис. 1. Сравнение рассчитанных (W) и фактических (W_f) влагозапасов почвы под озимой пшеницей на ГМС Гигант Ростовской обл. с 1971 по 1986 гг.: а) вариант с ежегодным присвоением начальных значений влажности почвы ($N = 134, r = 0,90$); б) вариант без ежегодного присвоения начальных значений влажности почвы ($N = 576, r = 0,86$).

посевов сельскохозяйственных культур: средне-месячная температура воздуха самого теплого и самого холодного месяцев года – июля и января, сумма осадков и запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы за летне-осенние месяцы.

На рис. 3 в качестве примера показателей агроклиматического мониторинга приведена многолетняя динамика запасов продуктивной влаги в слое почвы 0-100 см в марте и в сентябре,

рассчитанных по материалам наблюдений ГМС Гигант с 1966 по 2006 гг. Эти данные позволяют судить о тенденции изменения условий увлажнения посевов сельскохозяйственных культур за последние 40 лет.

Из рис. 3 видно, что на ГМС Гигант, условия которой характерны для юга Ростовской области, обеспеченность посевов влагой весной, на момент возобновления вегетации озимых зерновых культур и осенью, во время сева, не снижа-

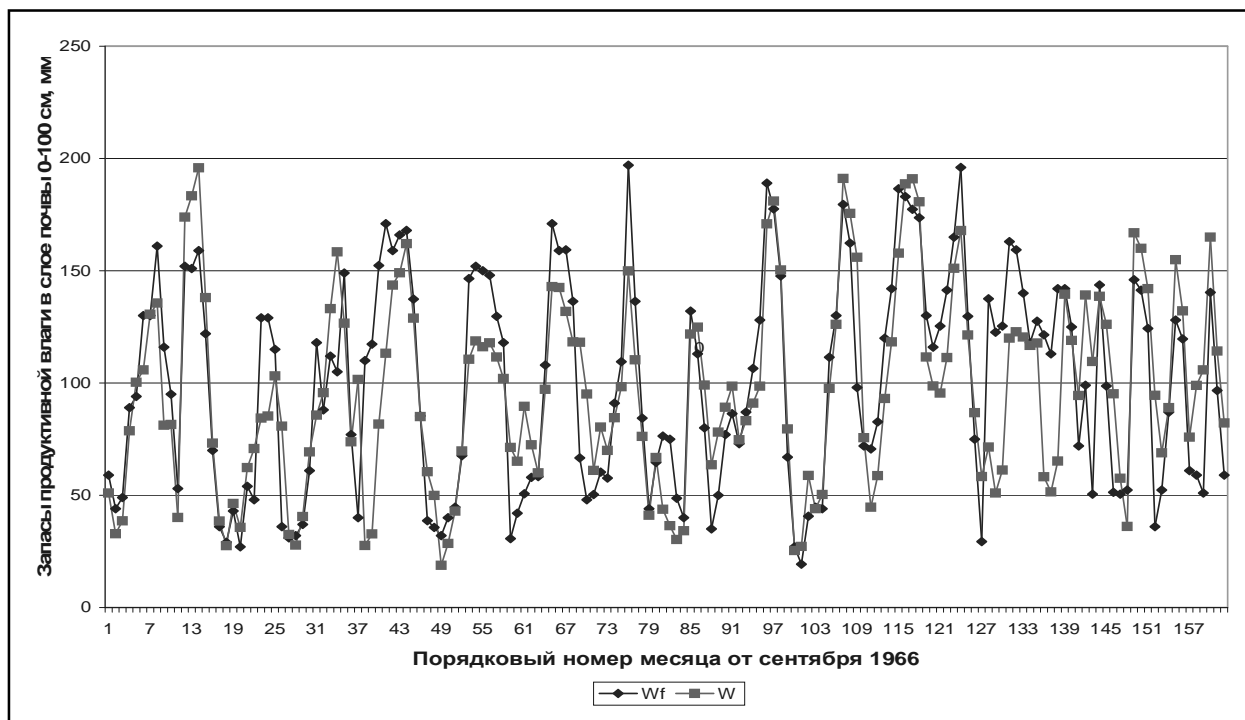


Рис. 2. Многолетняя динамика среднемесячных значений фактических (W_f) и рассчитанных (W) запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под посевом озимой пшеницы на ГМС Гигант Ростовской обл. (1966-2006 гг.)

Таблица. Значения параметров агрометеорологического мониторинга на ГМС Гигант Ростовской области

Год	Температура воздуха, град.		Сумма осадков за месяц, мм			Влагозапасы метрового слоя почвы, мм		
	июль	январь	июнь	июль	сентябрь	июнь	июль	сентябрь
1967	23,0	-3,2	52	14	22	82	40	22
1968	23,5	-4,4	14	23	28	39	28	36
1969	21,6	-10,1	108	25	26	88	81	28
1970	26,1	-3,7	88	36	4	102	44	94
1971	24,9	-1,6	57	28	30	62	51	29
1972	25,5	-14,1	74	52	87	71	65	29
1973	22,1	-8,3	89	37	19	121	95	73
1974	21,9	-6,9	84	67	81	118	95	80
1975	24,2	-1,4	14	104	31	41	67	36
.....								
.....								
.....								
1999	25,9	-0,2	31	88	2	49	63	30
2000	25,1	-2,0	121	24	44	119	78	73
2001	27,5	-0,2	77	4	72	116	48	58
2002	26,6	-4,3	77	41	65	71	46	72
2003	22,5	-1,3	56	65	45	47	66	73
2004	22,0	0,5	51	56	21	97	79	80
2005	24,0	1,5	24	37	80	71	52	42
2006	22,5	-9,9	69	33	39	100	60	50

ется. Более детальные оценки изменения степени аридности климата требуют дальнейших исследований.

Таким образом, многолетнее круглогодичное моделирование гидрологического цикла открывает возможность реального учета наблюдаемых

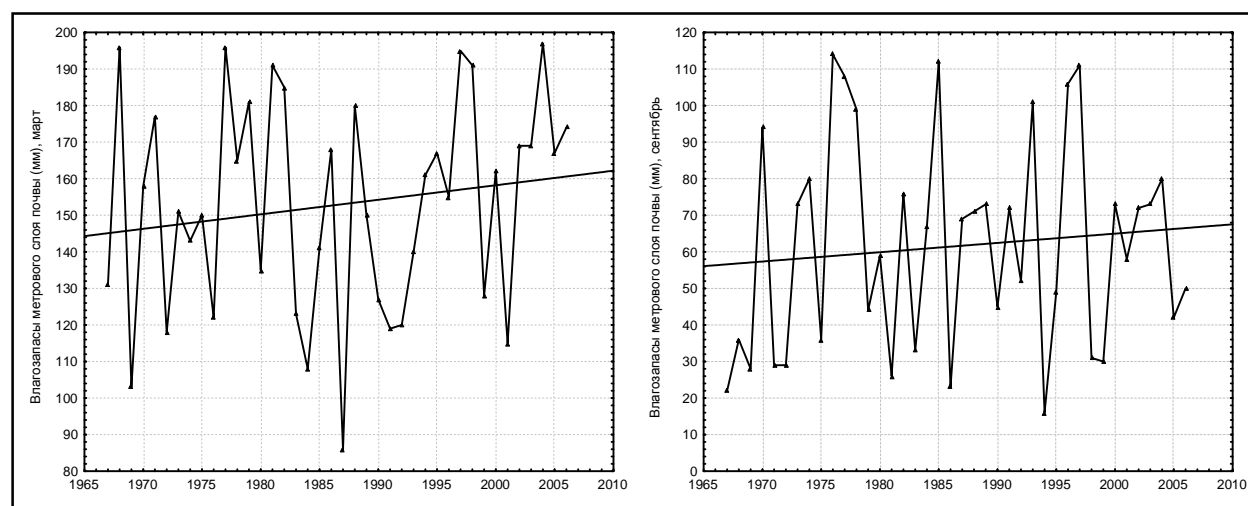


Рис. 3. Динамика среднемесячных запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под посевом озимой пшеницы на ГМС Гигант Ростовской области в марте и в сентябре

и ожидаемых в ближайшие десятилетия изменений климата при разработке стратегии развития агропромышленного комплекса России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Варчева С.Е. Расчетные методы определения влагозапасов почвы: опыт внедрения, проблемы и перспективы // Труды ГУ «ВНИИСХМ», 2007. Вып. 36.
3. Шумова Н.А. Оценка точности модели для расчета динамики запасов воды в почве // Метеорология и гидрология. 2003. № 10.
4. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
5. Палагин Э.Г. Математическое моделирование агрометеорологических условий перезимовки озимых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
6. Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэкосистемы. Л.: Гидрометеиздат, 1991.
7. Иванов Н.Н. Мировая карта испаряемости. Л.: Гидрометеиздат, 1957.
8. Сиротенко О.Д. Методы оценки изменений климата для сельского хозяйства и землепользования. Методическое пособие. М., 2007.

METHOD OF CALCULATION OF THE SOIL MOISTURE SUPPLIES DYNAMICS FOR THE SYSTEM OF THE YEAR-ROUND AGROMETEOROLOGICAL MONITORING

© 2009 S.E. Varcheva

Federal State Institution «National Research Institute of Agricultural Meteorology»:
e-mail: s.varcheva@mail.ru

The mathematical model describing the year-round dynamics of stocks of soil moisture on a scale of agricultural field with decade step on time is represented. Comparison of the calculated water-supplies in a meter layer of soil with those measured at the agrometeorological station is conducted. It is shown that the numerical scheme using the standard agrometeorological information provides sufficient for practice accuracy of monitoring moisture supplies in the year-round regime.

Key words: *stocks of a soil moisture, climate monitoring.*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СООБЩЕСТВ АНАЭРОБНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

© 2009 В.А. Вавилин

Институт водных проблем РАН, Москва;
e-mail: vavilin@aqu.laser.ru

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.

Ключевые слова: сообщество анаэробных микроорганизмов, аккумуляция изотопа в микробной клетке, имитационная модель.

ВВЕДЕНИЕ

При отсутствии кислорода в разложении органических веществ участвует целое сообщество микроорганизмов. 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” [1], позволяющую оценить скорость разложения органического вещества в анаэробных условиях. Это была 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 [2], 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. В статье приводится пример использования математического моделирования как метода изучения динамики сообщества мезофильных анаэробных микроорганизмов, разлагающих метанол.

СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ

Согласно SSCP (Single Strand Conformation Polymorphism) и FISH (Fluorescent In Situ Hybridization) анализов [3, 4], микроорганизмы, относящиеся к роду *Pseudomonas*, выполняют синтрофное окисление метанола вместе с водородотрофными метаногенами *Methanoculleus* sp., превращающих H₂/CO₂ в CH₄. Одновременно осуществляется превращение H₂/CO₂ в ацетат гомоацетогенными микроорганизмами рода *Clostridia*. Основной группой ацетикластических метаногенов, превращающих ацетат в метан, являются кокки *Methanosarcina* sp., образующие колонии.

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.)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Четыре группы микроорганизмов представлены в модели (метанол-окисляющие и гомоацетогенные бактерии, ацетикластические метаногены *Methanosarcina* sp. и водородотрофные метаногены *Methanoculleus* sp.). Метанол-окисляющие бактерии рассмотрены как автотрофы, использующие CO₂ для роста биомассы. Соответствующие функции Моно с одним или двумя субстратами применяются для описания процессов утилизации субстрата, образования продукта и роста биомассы:

$$\begin{aligned}
 \frac{d CH_3OH}{dt} &= -\rho_{mbacaut} B_{bacaut} \frac{CH_3OH}{K_{CH_3OHbacaut} + CH_3OH} \\
 \frac{d H_2CO_3}{dt} &= \rho_{mbacaut} B_{bacaut} \frac{CH_3OH}{K_{CH_3OHbacaut} + CH_3OH} \\
 &+ (1 - Y_{sar}) \rho_{msar} B_{sar} \frac{CH_3COOH}{K_{CH_3COOHsar} + CH_3OH} - 0.5 \rho_{mhom} B_{hom} \frac{H_2}{K_{H_2hom} + H_2} \frac{H_2CO_3}{K_{H_2CO_3hom} + H_2CO_3} \\
 &- 0.25 \rho_{mcul} B_{cul} \frac{H_2}{K_{H_2cul} + H_2} \frac{H_2CO_3}{K_{H_2CO_3cul} + H_2CO_3} \\
 &- 5 \mu_m bacaut B_{bacaut} \frac{H_2CO_3}{K_{H_2CO_3bacaut} + H_2CO_3} \frac{CH_3OH}{K_{CH_3OHbacaut} + CH_3OH} - K (H_2CO_3 - H_2CO_3_{sat}) \\
 \frac{d H_2}{dt} &= 3 \rho_{mbacaut} B_{bacaut} \frac{CH_3OH}{K_{CH_3OHbacaut} + CH_3OH} - \rho_{mcul} B_{cul} \frac{H_2}{K_{H_2cul} + H_2} \frac{H_2CO_3}{K_{H_2CO_3cul} + H_2CO_3} \\
 &- \rho_{mhom} B_{hom} \frac{H_2}{K_{H_2hom} + H_2} \frac{H_2CO_3}{K_{H_2CO_3hom} + H_2CO_3} \\
 \frac{d CH_3COOH}{dt} &= 0.25 \rho_{mhom} B_{hom} \frac{H_2}{K_{H_2hom} + H_2} \frac{H_2CO_3}{K_{H_2CO_3hom} + H_2CO_3} - \rho_{msar} B_{sar} \frac{CH_3COOH}{K_{CH_3COOHsar} + CH_3OH} \\
 \frac{d CH_{4_{tot}}}{dt} &= Vol * [0.373 ((1 - Y_{sar}) \rho_{msar} B_{sar} \frac{CH_3COOH}{K_{CH_3COOHsar} + CH_3OH} \\
 &+ 2.8 (1 - Y_{cul}) \rho_{mcul} B_{cul} \frac{H_2}{K_{H_2cul} + H_2} \frac{H_2CO_3}{K_{H_2CO_3cul} + H_2CO_3}] \\
 \frac{d B_{bacaut}}{dt} &= \mu_m bacaut B_{bacaut} \frac{H_2CO_3}{K_{H_2CO_3bacaut} + H_2CO_3} \frac{CH_3OH}{K_{CH_3OHbacaut} + CH_3OH} - k_{dbacaut} B_{bacaut} \\
 \frac{d B_{hom}}{dt} &= Y_{hom} \rho_{mhom} B_{hom} \frac{H_2}{K_{H_2hom} + H_2} \frac{H_2CO_3}{K_{H_2CO_3hom} + H_2CO_3} - k_{d_{hom}} B_{hom} \\
 \frac{d B_{sar}}{dt} &= Y_{sar} \rho_{msar} B_{sar} \frac{CH_3COOH}{K_{CH_3COOHsar} + CH_3OH} - k_{d_{sar}} B_{sar} \\
 \frac{d B_{cul}}{dt} &= Y_{cul} \rho_{mcul} B_{cul} \frac{H_2}{K_{H_2cul} + H_2} \frac{H_2CO_3}{K_{H_2CO_3cul} + H_2CO_3} - k_{d_{cul}} B_{cul}
 \end{aligned} \tag{1}$$

где CH_3OH , CH_3COOH , H_2CO_3 , H_2 - концентрации метанола, ацетата, карбоновой кислоты и водорода; $H_2CO_3_{sat}$ - насыщающая концентрация карбоновой кислоты; B_{bacaut} , B_{hom} , B_{sar} , B_{cul} - концентрации автотрофных метанол-окисляющих и гомоацетогенных бактерий, ацетикластических метаногенов *Methanosarcina* sp., и водородотрофных метаногенов, соответственно; $CH_{4_{tot}}$ - полный объем продуцируемого метана; $\rho_{mbacaut}$, ρ_{mhom} , ρ_{msar} , ρ_{mcul} - максимальные удельные скорости утилизации метанола, H_2/CO_2 и ацетата соответствующей группой микроорганизмов; $K_{H_2CO_3hom}$, $K_{H_2CO_3cul}$, $K_{H_2CO_3bacaut}$, $K_{CH_3COOHsar}$, K_{H_2hom} , K_{H_2cul} , $K_{CH_3OHbacaut}$ - соответствующие константы полунасыщения; μ_m - максимальная скорость роста биомассы метанол-окисляющих бактерий; $k_{dbacaut}$, $k_{d_{hom}}$, $k_{d_{sar}}$, $k_{d_{cul}}$ - удельные скорости распада биомассы соответствующих микроорганизмов;

Y_{hom} , Y_{syn} , Y_{cul} - соответствующие экономические коэффициенты роста биомассы; K - коэффициент массообмена для CO_2 в жидкой и газовой фазе; Vol - объем жидкой фазы.

При вычислениях учитывалось, что из-за взятия проб жидкости объем ее в реакторе уменьшается. Метан вычислялся в литрах. Для вычисления концентраций в весовых единицах (g/l) учитывались также молекулярные веса соответствующих химических компонентов (62: CH_3OH , 32: H_2CO_3 , 2: H_2 , 60: CH_3COOH , 113: биомасса). Численные расчеты были проведены с использованием пакета МАТЛАБ. Критерием, отражающим точность модели, является:

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{LN - K} \sum_i^L \sum_j^N \left[1 - \frac{S_{ij}^c}{S_{ij}^m} \right]^2 \right\}^{1/2}$$

где S_{ij}^m, S_{ij}^c - измеряемые и вычисляемые переменные; i, j - порядковые номера переменных и их величин, измеренных в определенное время; L, N - общее число переменных и их измеренных значений; K - общее число коэффициентов модели. Для ускорения минимизации σ_{\min} осуществ-

лялась визуальная калибровка, когда все переменные и измеренные значения выводились на экран компьютера ($CH_3OH, CH_3COOH, TIC, TOC, CH_4$, и ^{13}C в ацетате, TIC и биомассе). Основные коэффициенты модели представлены в таблице.

Таблица. Параметры микроорганизмов, участвующих в мезофильном разложении метанола

Микроорганизмы	Реакция	$B_0, \text{ г л}^{-1}$	$\mu_m = \rho_m Y, \text{ сут}^{-1}$	$K_S, \text{ г л}^{-1}$	$Y, \text{ г г}^{-1}$	$k_d, \text{ сут}^{-1}$
Метанол-окисляющие	1	0,01	0,09	0,1(H ₂ CO ₃)	-	0,01
Гомоацетогены	2	0,2	1,6	0,000008(H ₂)	0,08	0,01
<i>Methanoculleus</i> sp.	3	0,01	1,5	0,000002(H ₂)	0,05	0,01
<i>Methanosarcina</i> sp.	4	0,0015	0,2	1(CH ₃ COOH)	0,08	0,01

В ходе анаэробного процесса субстрат превращается в продукт и частично переходит в биомассу: Субстрат (S) → Продукт (P) + Биомасса (B). Для описания аккумуляции ^{13}C мы предложили следующие уравнение [5]:

$$\frac{df^P}{dt} = \frac{1}{P} \frac{d^{13}CP}{dt} - \frac{^{13}CP}{P^2} \frac{dP}{dt} = \frac{dP/dt}{P} \left\{ \frac{d^{13}CP/dt}{dP/dt} - f^P \right\} \quad (2)$$

$$\frac{df^{Bio}}{dt} = \frac{1}{B} \frac{d^{13}CB}{dt} - \frac{^{13}CB}{B^2} \frac{dB}{dt} = \frac{dB/dt}{B} \left\{ \frac{d^{13}CB/dt}{dB/dt} - f^{Bio} \right\} \quad (3)$$

$$f^P = \frac{^{13}CP}{P} \text{ и } f^{Bio} = \frac{^{13}CB}{B} - \text{доли } ^{13}C \text{ в продуктах}$$

и биомассе, которые, в свою очередь, зависят от

$$\text{доли } ^{13}C \text{ в субстрате } f^S = \frac{^{13}CS}{S}; \frac{dP}{dt} - \text{скорость}$$

аккумуляции продукта (если P одновременно является и субстратом в других реакциях, утилизация P не учитывается);

$$\frac{dB}{dt} - \text{скорость роста биомассы (распад биомас-$$

сы не учитывается). В случае единственного лимитирующего субстрата L, уравнение (3) можно записать в виде

$$\frac{df^{Bio}}{dt} \approx f(L) \{ f^S - f^{Bio} \} \quad (4)$$

$$\text{где } f(L) = \frac{\mu_m L}{K_L + L} - \text{функция Моно, } \mu_m = Y \rho_m$$

- максимальная удельная скорость роста биомассы. Согласно (4), чем выше доля ^{13}C в субстрате, тем выше и аккумуляция ^{13}C в биомассе. Скорость аккумуляции зависит от удельной скорости роста биомассы, которая, в свою очередь,

зависит от максимальной удельной скорости утилизации субстрата ρ_m и экономического коэффициента Y. Чем выше они, тем больше скорость аккумуляции изотопа.

Уровень насыщения содержания изотопа в клетке не превышает этого уровня в субстрате. Измеряя ^{13}C в отдельной микробной клетке (NanoSIMS: Nano Secondary Ion Mass Spectrometry – In Situ Hybridization [3]), можно уточнить механизм процесса. Модель дает возможность получать абсолютные концентрации меченой (тяжелой) и немеченой (легкой) биомассы различных микроорганизмов i:

$$B_{iheavy} = B_i \times \frac{^{13}C}{C} Bio \quad (5)$$

$$B_{ilight} = B_i \times \left(1 - \frac{^{13}C}{C} Bio \right) \quad (6)$$

Общая динамика системы показана на Рис. 1. Молекулярно-биологические анализы SSCP и FISH, также как и NanoSIMS были учтены при моделировании. В модели предполагалось, что часть органического вещества является биологически не разлагаемой (см. значения TOC, показанные на Рис. 1b). В мезофильных условиях наблюдается двух-стадийный процесс продукции метана. Если на первом этапе метан образуется из H_2/H_2CO_3 , то на втором этапе он образуется из ацетата. Скорость лимитирующей реакцией на первом этапе является реакция 1, тогда как реакция 4 лимитирует общую скорость образования метана на втором этапе. Эти реакции осуществлялись медленно растущими метанол-окисляющими бактериями и ацетикластическими метаногенами *Methanosarcina* sp., которым свойственны низкие μ_m , равные $0,09 \text{ сут}^{-1}$ и $0,2 \text{ сут}^{-1}$ соответственно (Табл. 1). С увеличением

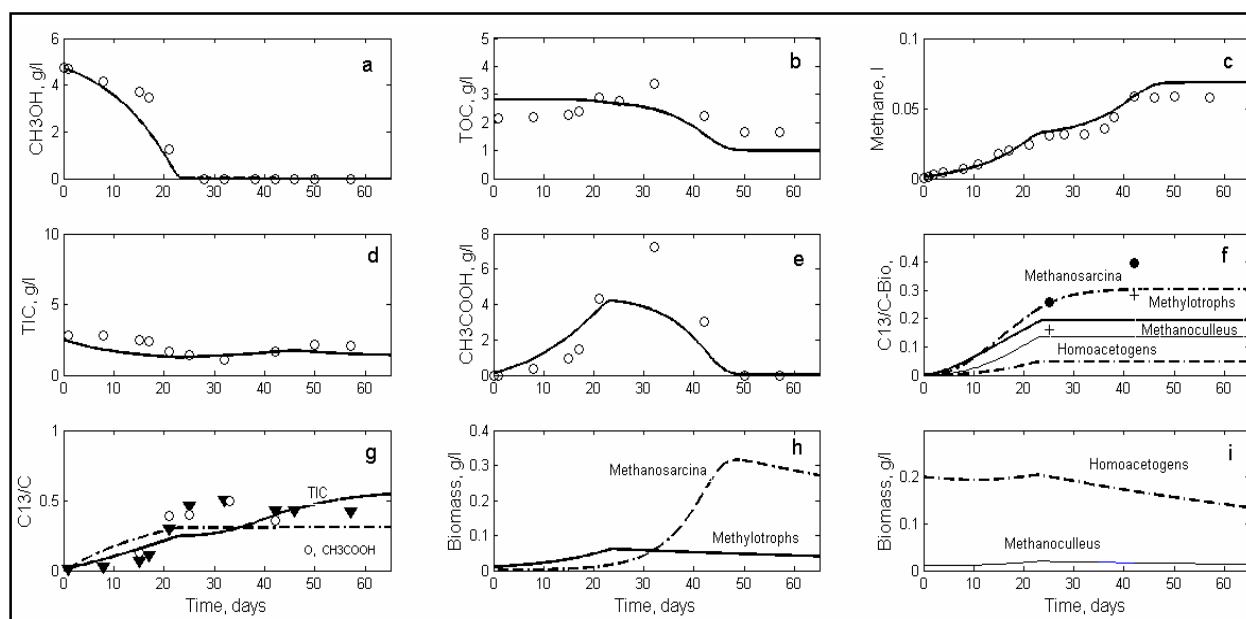


Рис. 1. Символы - эксперимент [3], кривые - динамическая модель. TIC и TOC - общая концентрация неорганического и органического углерода.

концентрации метанол-окисляющих бактерий (Рис. 1h) скорость потребления метанола также увеличивается (Рис. 1a). Согласно реакции 1, в процессе трансформации метанола образуется водород и угольная кислота, которые в дальнейшем превращаются в ацетат (Рис. 1e). Когда весь метанол исчезает (Рис. 1a) концентрации метанол-окисляющих и гомоацетогенных бактерий, также как и концентрация водородотрофных метаногенов начинают уменьшаться вследствие распада биомассы (Рис. 1h и 1i). Это происходит одновременно с исчезновением водорода (не показано на рисунке).

Концентрации водорода и метанола являются “быстрой” и “медленной” переменными, соответственно. Водород образуется из метанола метанол-окисляющими бактериями и его уровень

быстро подстраивается под текущую концентрацию метанола. Водородотрофные метаногены и гомоацетогены являются быстро растущими микроорганизмами. Величина μ_m равна $1,6d^{-1}$ и $1,5d^{-1}$ для *Methanoculleus* sp. и гомоацетогенов, соответственно (Табл. 1). В итоге эти микроорганизмы конкурируют за одинаковые субстраты (в основном водород).

Концентрация ацетата увеличивается до 23-х суток (Рис. 1e). С повышением концентрации ацетокластических метаногенов (Рис. 1h) скорость роста изъятия ацетата увеличивается (Рис. 1e). В этот период происходит и увеличение TIC (Рис. 1d). Процесс распада биомассы ацетокластических метаногенов начинается с 48-х суток (Рис. 1h), когда весь ацетат исчезает (Рис. 1e).

Гистограммы меченой (тяжелой) и немеченой

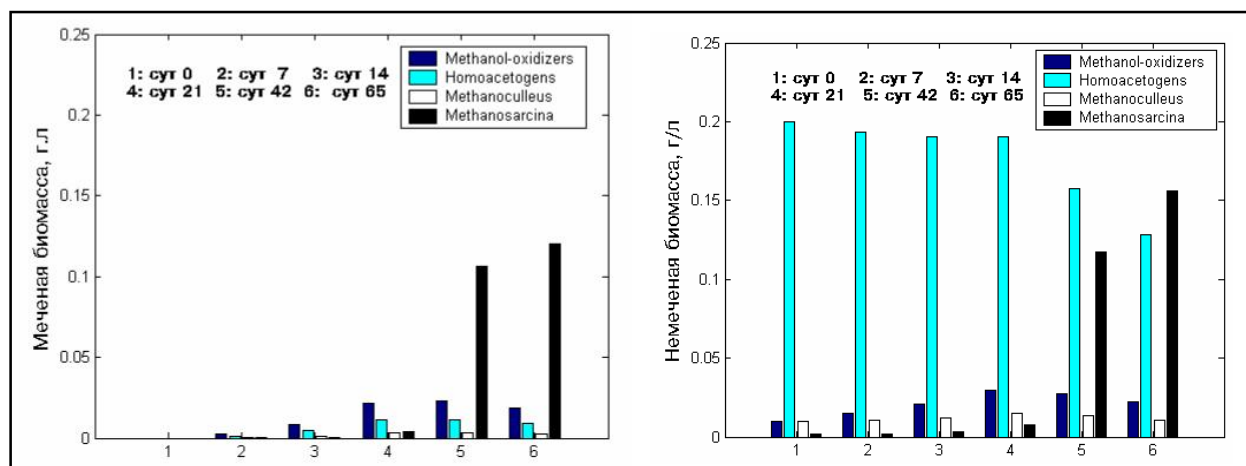


Рис. 2. Гистограммы абсолютных концентраций меченой (тяжелой) и немеченой (легкой) фракций биомассы микроорганизмов, рассмотренных в модели (1).

ной (легкой) фракций биомасс различных групп микроорганизмов, участвующих в процессе (Рис. 2) показали, что биомасса гомоацетогенных бактерий доминировала. Согласно рис. 1, начальная концентрация их равнялась $0,2 \text{ гл}^{-1}$. Поскольку в модели коэффициенты полунасыщения по угольной кислоте ($0,1 \text{ гл}^{-1}$) были существенно меньше, чем текущая концентрация ГИС (1 гл^{-1}), то концентрация H_2CO_3 , в отличие от концентрации H_2 , не лимитировала скорость роста гомоацетогенов и водородотрофных метаногенов. В легкой фракции лишь после 42-х суток биомассы *Methanosarcina* sp. и гомоацетогенных бактерий стали сравнимыми. В тяжелой фракции вклад *Methanosarcina* sp. был более значителен. Эти результаты подтверждаются качественными PCR-SSCP анализами [3]. В соответствии с экспериментом, модель показала, что аккумуляция ^{13}C в биомассе *Methanosarcina* sp. выше чем для метанол-окисляющих бактерий. Модель подтвердила, что метанол-окисляющие бактерии являются автотрофными микроорганизмами, т.е. они растут за счет H_2CO_3 , а не непосредственно за счет CH_3OH .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилин В.А., Васильев В.Б., Рытов С.В. Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов. - М.: Наука, 1993.
2. 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.
3. 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.
4. Li T., Vavilin V.A., Wu T.-D., Mazeas L., Dabert P., Shu A., Chapeleur O., Grossin-Debatista J., Leblon G., Guerquin-Kern J.-L., Bouchez T. Deciphering functional network of uncultured microbes in complex ecosystems (in preparation).
5. 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 ^{13}C fractionation // Proc.: 3rd International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills". Braunschweig, Germany, 10-13 March 2009, Session B, 1-10.

DYNAMICS OF ANAEROBIC MICROORGANISMS COMMUNITY: EXPERIENCE IN MATHEMATICAL MODELING

© 2009 V. A. Vavilin

Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow;
e-mail: vavilin@aqua.laser.ru

It is shown that a traditional chemical kinetics, the new methods of molecular biology as well as isotopic composition analysis made possible to consider new constraints concerning degradation of organic matter and microbial dynamics. The equation was developed to describe isotope fractionation in microbial cells.

Key words: anaerobic microbial community, isotope fractionation, simulation model.

УДК 579.242:579.243:51-76

НЕЛИНЕЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ЧИСЛЕННОСТИ *PSEUDOMONAS FLUORESCENS* В СУБСТРАТ-БАКТЕРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

© 2009 Н.И. Воробьев¹, А.М. Семенов², А.А. Шаталов²,
А.Х.К. Ван Бругген³, О.В. Свиридова¹

¹ГНУ ВНИИ сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург;
e-mail: vorobyov@arriam.spb.ru

²Московский государственный университет, Москва;
e-mail: amsemenov@list.ru

³Emerging Pathogens Institute and Plant Pathology Department, IFAS, University of Florida, USA;
e-mail: ahcvanbruggen@ufl.edu

Создана математическая модель субстрат бактериальной системы (СБС) в нише с ограниченным питательным ресурсом на примере волнообразной динамики популяции *Pseudomonas fluorescens* 32 *gfp* в поздней стационарной фазе. Модель представлена системой нелинейных дифференциальных уравнений и описывает переходы клеток из активного состояния в состояние покоя, лизис с высвобождением субстрата или глубокий анабиоз. Функциональной и параметрической верификацией модели определены кинетические параметры бактериальной популяции. Анализ системы дифференциальных уравнений показал, что модель СБС обладает особой точкой - «неустойчивый фокус», что доказывает возникновение автоколебания в СБС.

Ключевые слова: гетерогенность в моновидовой популяции *Pseudomonas fluorescens*, автоиндукция колебаний численности в условиях голодания, анализ устойчивости субстрат-бактериальной системы на основе математической модели.

ВВЕДЕНИЕ

Твердо установлено, что микробные популяции, как и другие биологические объекты, развиваются волнообразно [1, 2]. При периодическом культивировании такая волнообразная динамика наиболее четко проявляется в поздней стационарной фазе при частом отборе проб и учете в пробах численности клеток. Было высказано предположение о том, что волнообразная динамика является фундаментальным следствием взаимодействия потребителя и субстрата [3-6].

Хотя концепция роста и отмирания микроорганизмов лишь частично объясняет их волнообразную динамику развития, поскольку она не учитывает многие другие процессы, такие как переход части клеток популяции при голодании в состояние покоя или даже анабиоза, реактивацию клеток или их гибель. Такие процессы крайне трудно исследовать на физиолого-популяционном уровне. Однако используя математическое моделирование можно рассчитать потоки углерода и численности клеток, находящихся в разном физиологическом состоянии, тем самым подтверждая или опровергая соответствующие гипотезы, объясняющие волнообразную динамику популяций. С этой целью были созданы многочисленные модели, имитирующие осцилляционную динамику микробных популяций [7-10].

Используются различные подходы при моделировании колебательной динамики организмов

в зависимости от причин вызывающих такие колебания. В системе с двумя или более видами организмов колебания могут быть следствием обратной связи между разными видами, например, между хищником и жертвой или продуцентом и потребителем или разрушителем субстрата [11-15]. Обратная связь может включать также использование одними организмами продуктов метаболизма других микроорганизмов, в результате чего может иметь место волнообразная динамика развития обеих популяций [8, 14].

В генетически однородной культуре бактерий колебания иногда моделируют, используя задержку в метаболических процессах, например, дисбаланс между поглощением субстрата и его метаболизмом [16, 17] или дисбаланс между поглощением субстрата и выделением CO₂ в связи с образованием запасных веществ [18]. Однако даже в моновидовой популяции чистой культуры клетки не гомогенны с точки зрения физиолого-биохимического состояния [19]. При голодании функциональная гетерогенность популяции существенно усиливается [20]. В связи с этим для достижения колебательной динамики при моделировании моновидовой популяции иногда использовали подразделение популяции на две взаимно сменяющихся субпопуляций [16], морфологически меняющиеся [21], получающие энергию путем дыхания либо брожения [22] или растущую и отмирающую популяции следствии отравления собственным метаболитом [23-25].

Целью работы являлось создание и анализ относительно простой нелинейной математической модели субстрат-бактериальной системы (СБС), описывающей следующие изменения функционального состояния бактериальных клеток: переход клеток из активного состояния в покоящееся состояние при голодании, сопровождаемое выделением CO_2 ; возврат части покоящихся клеток в активное состояние после обогащения ниши субстратом; отмирание и лизис части покоящихся клеток и переход активных клеток в состояние глубокого анабиоза. Модель должна учитывать возникновение функциональной гетерогенности в генетически однородной популяции *Pseudomonas fluorescens* и представляться в форме системы дифференциальных уравнений, удобной для математического анализа устойчивости и характера автоколебаний численности бактерий при ограничении питательного ресурса.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Использовали генетически модифицированную бактерию *Pseudomonas fluorescens* шт. 32, синтезирующую зеленый флуоресцирующий белок (*gfp*) и устойчивую к рифамицину и канамицину. Микроорганизм выращивали на среде, содержащей (г/л): K_2HPO_4 - 1,5; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ - 1,5; пептон - 2; глицерин 15 мл/л; канамицин - 50 мг/л; рифамицин - 50 мг/л. Вода - дистиллированная. pH – 7 – 7,2. Антибиотики стерилизовали фильтрацией через мембранный фильтр с размером пор 0,22 мкм. При высеве на чашки в жидкую среду добавляли агар в концентрации 18 г/л. Посевной материал выращивали при 25°C в течение 48 ч. Затем в каждую из трех 3-х трехлитровых колб, содержащих по 1 л стерильной жидкой среды, вносили по 1 мл клеток ($1\text{-}2 \cdot 10^9$). Культивирование осуществляли в стационарных условиях (при 25°C) с энергичным перемешиванием в течение минуты раз в сутки перед отбором проб. Пробы из каждой колбы отбирали через день и в них учитывали количество колоний образующих единиц (КОЕ) на агаризованной среде при освещении чашек коротким голубым светом (рис. 2 А), количество клеток под люминесцентным микроскопом (450 – 480 нм) (рис. 2 Б), и количество растворенного органического вещества (РОВ) бихроматным методом после фильтрации суспензии через нейлоновый бактериальный фильтр (рис. 2 В). Длительность эксперимента 60 дней.

Экспериментальные данные были проанализированы методом математического моделирования. При построении математической модели использована система нелинейных дифференци-

альных уравнений. С помощью модели численным методом рассчитывались динамики численностей бактерий и концентрации растворимого в воде углерода. Для функциональной и параметрической верификации математической модели использовали метод «наименьших квадратов» для минимизации отклонений модели от экспериментальных данных.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СБС

В результате последовательной функциональной верификации математической модели мы пришли к выводу, что клетки в течение своего жизненного цикла направленно меняют свои физиологические состояния по схеме, представленной на рис. 1.

X-состояние соответствует активным клеткам, характеризующихся тем, что в этом состоянии они активно потребляют питательный субстрат (S) и делятся. На следующей стадии жизненного цикла бактерии переходят в пассивное Z-состояние, которое характеризуется приостановкой программы размножения. В Z-состоянии клетками используются питательные вещества в количестве, достаточном только для поддержания работоспособности жизненно важных систем, а ферментативный аппарат, необходимый для клеточного деления не функционирует и даже деградирует. Среди части Z-клеток на последующей стадии запускаются процессы аутолиза, что приводит к пополнению пула питательных веществ (S) за счет высвободившихся компонентов клетки. Параллельно с изменением этих физиологических состояний часть X-клеток необратимо переходит в Z_0 -состояние – глубокий анабиоз. В глубоком анабиозе у клеток законсервированы все жизненные процессы, а оболочка клетки уплотняется в результате чего клетка становится более устойчивой к внешним воздействиям по сравнению с активной клеткой. Z_0 -клетки не взаимодействуют с остальными клетками и не влияют на протекающие в популяции динамические процессы. Кроме этого предполагается, что часть питательного субстрата (C_H) остается недоступной для клеток и поэтому его количество не меняется со временем.

С переходами клеток из одного состояния в другое связаны два типа потоков углерода (рис. 1). Поток клеточного углерода пропорционален количеству углерода, присутствующего в клеточных структурах перемещающихся клеток, и обратно пропорционален времени перемещения этого количества углерода. Поток субстратного углерода пропорционален количеству углерода, находящегося в составе внеклеточных органичес-

ких молекул и поглощаемого/выделяемого клетками при смене физиологических состояний, и обратно пропорционален времени поглощения/выделения этого количества углерода.

Связь углеродных потоков с численностями бактерий (X, Z, Z_0) и концентрацией питательного субстрата (S) задается логистическим уравнением [26] и формулой Моно [26].

$$J_{Z_0} = \eta_{Z_0} \cdot Z_0 \cdot \left(1 - \frac{Z_0}{d}\right) - \text{поток клеточного}$$

углерода, связанного с переходом активных клеток в состояние глубокого анабиоза. $0 < Z_0 < 1$ – количество клеток (в углеродном эквиваленте), находящихся в глубоком анабиозе и деленное на C_0 . $0 < d < 1$ – доля Z_0 -клеток (в углеродном эквиваленте) в конце переходного процесса. $\eta_{Z_0} > 0$ – постоянная времени перехода клеток в состояние глубокого анабиоза, деленная на τ . τ – постоянная времени размножения активных клеток в фазе экспоненциального роста.

$$J_A = \frac{X \cdot S}{S + k_s/R(v)} - \text{поток субстратного угле}$$

рода, связанный с питанием активных клеток. $0 < s < 1$ – масса субстратного углерода, деленная на начальное количество субстратного углерода (C_0) в колбах. $0 < k < 1$ – количество активных клеток (в углеродном эквиваленте), деленное на C_0 . $k_s > 0$ – константа ингибирования для J_a -потока.

$R(v) = (1-d) \cdot \exp(-\eta_{CO_2} \cdot v)$ – коэффициент, учитывающий потери углерода в системе, связанные с J_{CO_2} -потоком. $h_{CO_2} > 0$ – постоянная времени убывания углеродного ресурса ниши, связанные с J_{CO_2} -потоком, деленная на t . p – время, деленное на t .

$$\begin{cases} \frac{dX}{dv} = \frac{S \cdot X}{S + k_s/R(v)} - \left[\eta_x \cdot \frac{X \cdot (1-X-S)}{1-X-S+k_x/R(v)} - \eta_z \cdot \frac{X \cdot (1-X-S)}{X+k_z/R(v)} \right] \\ \frac{dS}{dv} = \eta_L \cdot \frac{(1-X-S) \cdot S}{S+k_L/R(v)} + \beta \cdot \left[\eta_x \cdot \frac{X \cdot (1-X-S)}{1-X-S+k_x/R(v)} - \eta_z \cdot \frac{X \cdot (1-X-S)}{X+k_z/R(v)} \right] - \frac{S \cdot X}{S+k_s/R(v)} \end{cases} \quad (1)$$

где p – время, деленное на t ; $Z = 1 - X - S$ Динамика численности Z_0 -бактерий рассчитывается по формуле: $Z_0 = d \cdot [1 - \exp(-\eta_{Z_0} \cdot v)]$.

Реальные численности активных бактерий ($M_A(t)$), пассивных бактерий ($M_H(t)$), бактерий в глубоком анабиозе ($M_{H'}(t)$) и концентрации субстратного углерода ($C(t)$) вычисляются по следующим формулам:

$$M_A(t) = \frac{C_0}{m_A} \cdot X(v \cdot \tau) \cdot R(v \cdot \tau);$$

$$M_D(t) = \frac{C_0}{m_D} \cdot Z(v \cdot \tau) \cdot R(v \cdot \tau);$$

$$J_{CX} = \eta_x \cdot \frac{X \cdot (1-X-S)}{1-X-S+k_x/R(v)} \cdot (1-\beta),$$

$$J_{SX} = \eta_x \cdot \frac{X \cdot (1-X-S)}{1-X-S+k_x/R(v)} \cdot \beta - \text{потоки}$$

клеточного и субстратного углерода, связанные с переходом клеток из активного состояния в пассивное. $0 < Z < 1$ – количество пассивных клеток (в углеродном эквиваленте), деленное на C_0 .

$$\beta = \frac{m_A - m_D}{m_A}, m_A, m_D - \text{углеродные массы } X-$$

и Z -клеток. $k_x > 0$ – константа ингибирования J_{CX} - и J_{SX} -потока. $\eta_x > 0$ – постоянная скорости J_{CX} - и J_{SX} -потока, деленная на τ .

$$J_{CZ} = \eta_z \cdot \frac{(1-X-Z) \cdot X}{X+k_z/R(v)} \cdot (1-\beta),$$

$$J_{SZ} = \eta_z \cdot \frac{(1-X-S) \cdot X}{X+k_z/R(v)} \cdot \beta - \text{потоки клеточ}$$

ного и субстратного углерода, связанные с переходом клеток из пассивного состояния в активное. $k_z > 0$ – константа ингибирования J_{CZ} - и J_{SZ} -потока. $\eta_z > 0$ – постоянная скорости J_{CZ} - и J_{SZ} -потока, деленная на τ .

$$J_L = \eta_L \cdot \frac{(1-X-S) \cdot S}{S+k_L/R(v)} - \text{поток субстратного}$$

углерода, связанный с аутолизисом клеток. $k_L > 0$ – константа ингибирования J_L -потока. $h_L > 0$ – постоянная скорости J_L -потока, деленная на t .

Из условия углеродного баланса системы получаем математическую модель в форме следующей системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$M_H(t) = \frac{C_0}{m_{Z_0}} \cdot Z_0(v \cdot \tau);$$

$$C(t) = C_0 \cdot S(v \cdot \tau) \cdot R(v \cdot \tau) + C_H.$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛИ СБС

Функциональная и параметрическая верификация модели СБС позволила определить параметры популяции бактерий (таблица 1).

Таблица 1. Вычисленные параметры математической модели.

$C_0 = 4.42$ мг С / мл	$\eta_{z0} = 0.040$
$C_H = 3.31$ мг С / мл	$k_S = 0.00044$
$m_A = 3.7 \times 10^{-9}$ мг С / клетка	$\eta_X = 11.6$
$m_D = 0.19 \times 10^{-9}$ мг С / клетка	$k_X = 0.60$
$m_{z0} = 4.7 \times 10^{-9}$ мг С / клетка	$\eta_Z = 0.78$
$\tau = 0.309$ сутки (~7 часов)	$k_Z = 0.44$
$d = 0.460$	$\eta_L = 0.173$
$\eta_{CO_2} = 0.0040$	$k_L = 0.675$

С помощью этих параметров можно вычислить любые интегральные характеристики популяции бактерий. Например, константа Михаэлиса рассчитывается следующим образом:

$$K_S = k_S \cdot (1 - d) \cdot C_0 = 0,00044 \cdot (1 - 1,46) \cdot 4,42 \text{ мг С/мл} = 1,05 \text{ мг С/мл.}$$

Анализ системы (1) на устойчивость показал, что она имеет особую точку «неустойчивый фокус», то есть СБС является неустойчивой системой и в ней возможно возникновение автоколебаний численностей бактерий. Координаты особой точки не остаются постоянными. Из-за CO_2 -потерь ее координаты дрейфуют к началу координат. При этом рабочая точка описывает сходящуюся спираль вокруг дрейфующей особой точки (рис. 3). В связи с этим, амплитуда колебания численностей бактерий постепенно убывает.

Автоколебания в СБС вызваны закономерными переходами клеток: активное состояние \rightarrow покоящееся состояние \rightarrow лизировавшиеся клетки (субстрат) \rightarrow активное состояние \rightarrow и т.д. Параллельно этому циклическому процессу часть активных бактерий, переходит в состояние глубокого анабиоза. Все эти явления демонстрируют высокую приспособленность бактериальных популяций к стрессовым условиям, включая длительное выживание в нишах с ограниченным питательным ресурсом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов АМ (2001) Осцилляции микробных сообществ в почвах. Труды Всероссийской конференции к 100-летию со дня рождения академика Е.Н. Мишустина. Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. 22.02.2001. М. МАКС Пресс. С. 57-72.
2. Семенов АМ (2005). Трофическое группирование и динамика развития микробных сообществ в почве и ризосфере. Автореф. дис. на соискание уч. степени док. биол. наук в виде научн. докл. М.: МГУ. с. 66.
3. Semenov A.M, van Bruggen AHC, Zelenev VV (1999) Moving waves of bacterial populations and total organic carbon along roots of wheat. *Microbial Ecology*. V. 37. P. 116-128.
4. Van Bruggen AHC. Semenov AM, Van Diepeningen AD., de Vos OJ., Blok WJ. (2006). Relation between soil health, wave-like fluctuations in microbial populations, and soil-borne plant disease management. *Europ. J. Plant Path.* V. 115. P. 105-122.
5. Zelenev VV, van Bruggen AHC, Leffelaar PA, Bloem J, Semenov AM (2006) The simulation model "BACWAVE-WEB" *Soil Biol Biochem* 38: 1690-1711.
6. Я.П.Худяков. Периодичность микробиологических процессов в почве. 1958. Тр. Инст. микробиологии АН СССР. Т.5. С. 150-160.
7. Kennedy CR, Aris R (1980) Traveling waves in a simple population model involving growth and death. *Bull Mathem Biology* 42: 397-429.
8. Ghosh D, Sarkar AK (1998) Stability and oscillations in a resource-based cycling model of two interacting species with nutrient cycling. *Ecol Model* 107: 25-33.
9. Petrovskii SV, Malchow H (2001) Wave of chaos: New mechanism of pattern formation in spatio-temporal population dynamics. *Theoret Populat Biol* 59: 157-174.
10. Hui C, Li Z, Yue D (2004) Metapopulation dynamics and distribution, and environmental heterogeneity induced by niche construction. *Ecol Modelling* 177:107-118
11. De Angelis DL (1982) Dynamics of nutrient cycling and food webs. Chapman and Hall. London.
12. Smith OL (1982) Food webs. Charman and Hall, London. UK.
13. Sarkar AK, Roy AB. (1993) Oscillatory behaviour in a resource-based plant/herbivore model with random herbivore attack. *Ecol. Model.* V. 68. P. 213-226.
14. Sarkar AK, Mitra D, Roy AB (1990) Stability of partially closed producer consumer system via decomposer. *Ganit L. Bangladesh Math. Soc.* V.10. P. 21-27.
15. Sarkar AK, Mitra D, Ray S, Roy AB. (1991). Permanence and oscillatory co-existence of a detritus-based prey-predator model. *Ecol. Model.* V. 53. P. 147-156.
16. Skichko AS., Kol'tsova E.M. 2006. Mathematical model for describing oscillations of bacterial biomass. *Theoret Found Chem Engin* 40: 503-513.
17. Zeng A-P, Menzel K, Deckwer W-D (1996) Kinetic, dynamic and pathway studies of glycerol metabolism by *Klebsiella pneumoniae* in anaerobic continuous culture: II. Analysis of metabolic rates and pathways under oscillation and steady-state conditions. *Biotechnol Bioeng* 52: 561-571.
18. Cornet JF, Favier L, Dussap CG (2003) Modeling stability of photoheterotrophic continuous cultures in photobioreactors. *Biotechnol Prog* 19: 1216-1227.
19. Davidson CJ, Surette MG (2008) Individuality in bacteria. *Annu Rev Genet* 42: 253-268.

20. Wilhelm R, Heller O, Bohland M, Tomaschewski C, Klein I, Klauth P, Tappe W, Groeneweg J, Soeder CJ, Jansen P, Meyer W (1998) Biometric analysis of physiologically structured pure bacterial cultures recovering from starvation. *Can. J. Microbiol.* V. 44. P. 399-404.
21. Kelly AF, Park F, Bovill R, Mackey BM (2001) Survival of *Campylobacter jejuni* during stationary phase: Evidence for the absence of a phenotypic stationary-phase response. *Appl. Environ. Microbiol.* V. 15. P. 53-57.
22. Satroutdinov AD, Kuriyama H, Kobayashi H (1992) Oscillatory metabolism of *Saccharomyces cerevisiae* in continuous culture. *FEMS Microbiol Lett* 98: 261-268
23. Cornejo OE, Rozen DE, May RM, Levin BR (2009) Oscillations in continuous culture populations of *Streptococcus pneumoniae*: population dynamics and the evolution of clonal suicide. *Proc R Soc B* 276: 999-1008
24. Ghommidh C, Vaija J, Bolarinwa S, Navarro JM (1989) Oscillatory behavior of *Z. mobilis* in continuous cultures: A simple stochastic model. *Biotechnol Lett* 11: 659-664
25. Keulers M, Suzuki T, Satroutdinov AD, Kuriyama H (1996) Autonomous metabolic oscillation in continuous culture of *Saccharomyces cerevisiae* grown on ethanol. *FEMS Microbiol Lett* 142: 253-258
26. П.В.Фурсова, Л.Д.Терлова, Г.Ю.Ризниченко. Математические модели в биологии. Учебное пособие.-М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2008. 108 с.

NONLINEAR MODELLING OF SELF-OSCILLATIONS OF *PSEUDOMONAS FLUORESCENS* POPULATION IN THE SUBSTRATE-BACTERIAL SYSTEM

© 2009 N.I. Vorobyov¹, A.M. Semenov², A.A. Shatalov², A.H.C. van Bruggen³, O.V. Sviridova¹

¹State Scientific Institute All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, Saint-Petersburg;
e-mail: vorobyov@arriam.spb.ru

²Moscow State University, Moscow; e-mail: amsemenov@list.ru

³Emerging Pathogens Institute and Plant Pathology Department, IFAS, University of Florida, USA;
e-mail: ahcvanbruggen@ufl.edu

The mathematical model a substrate-bacterial system (SBS) in a niche with the limited nutritious resource on an example of wave-like dynamics of *Pseudomonas fluorescens* 32 *gfp* population in a late stationary phase is created. The model is presented by system of the nonlinear differential equations and describes transitions of cells from an active condition in dormant state, lyses with release of a substrate or deep anabiosis. By functional and parametrical verification of model kinetic parameters of a bacterial population were calculated. The analysis of the system of the differential equations has shown, that SBS possesses a special point - «unstable focus» due to what self-oscillations in SBS arises.

Keywords: heterogeneity in monospecific population *Pseudomonas fluorescens*, an autoinduction of fluctuations of number in the conditions of starvation, the analysis of stability a substratum-bacterial of system on the basis of mathematical model.

УДК 57+51-7

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАК СЦЕНАРИИ В СЕТЕВОЙ БИБЛИОТЕКЕ ВЫЧИСЛИМЫХ МОДЕЛЕЙ. ПРИМЕР ПУБЛИКАЦИИ И РАСЧЕТОВ ДВУХФАЗНОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

© 2009 А.В. Воротынцев

Вычислительный центр им А.А.Дородницына Российской академии наук, Москва;
e-mail: avv_alexv@mail.ru

Описываются элементы архитектуры сетевой библиотеки вычислимых моделей, порядок работы пользователя на примере сценария расчета модели течения почвенной влаги.

Ключевые слова: *сетевая библиотека; перенос почвенной влаги.*

Насущна проблема создания в сети Интернет сетевых библиотек численных методов и прикладных вычислимых моделей, предназначенных для хранения множества численных методов и моделей, их расчета и использования прикладными специалистами и другими пользователями. Как и обычные библиотеки, такие библиотеки будут создаваться для хранения и получения проверенных знаний. Хотя таким библиотекам предстоит еще неизбежное становление и развитие, уже сейчас можно реализовать библиотеку с удобным легким доступом, представляющую в сети широкий спектр численных методов и полезных вычислимых моделей, решаемых итерациями.

В качестве сетевой библиотеки рассмотрим 1-ю версию системы Нива на рис. 1 и поясним ее архитектуру на примере расчета модели течения почвенной влаги (1).

Чтобы обеспечивать работу с библиотекой Нива практически любому пользователю, минимально достаточный интерфейс и набор операций были выбраны предельно простыми и надежными. Возможности пользователя представлены сценариями – графами работ ГиперМодели (ГМ). Скрывая детали, система показывает пользователю лишь то, чем он сможет управлять при расчетах: структурой графа ГМ и данными его узлов – МодОбъектов (МО), рис. 2. В этой версии Нивы изменять функциональность сценария мож-

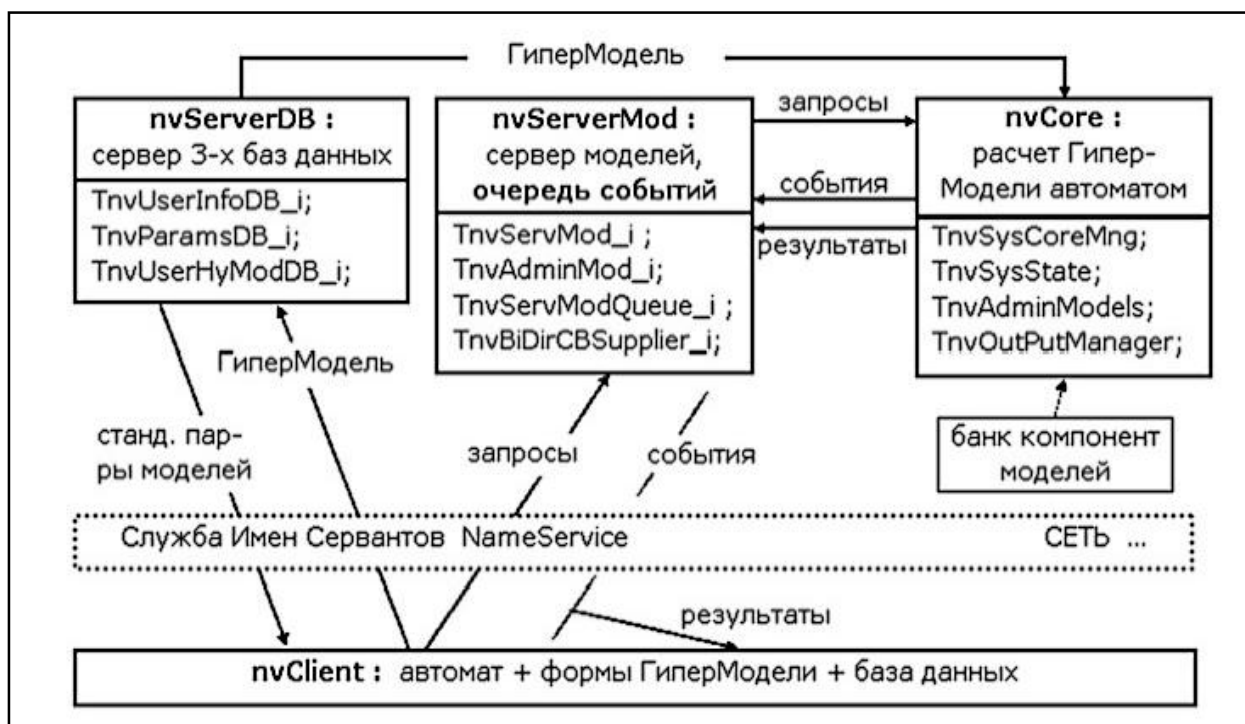


Рис. 1. Обобщенная структура системы Нива

но, только конструируя иной граф. Иными словами, удаленный пользователь может: а) конструировать сценарий расчета из заданного набора работ с этими МО; б) циклами итераций выполнять расчеты сценария на сервере, используя свои или стандартные данные МО; в) получать результаты.

Нива состоит из 3-х больших программ: а) сервера моделей *nvServerMod*, на котором хранится банк моделей в исполняемом коде; б) сервера *nvServerDB* трех баз данных, на котором хранится база данных *nvParamsDB* стандартных параметров МО моделей, база данных *nvUserHyModelsDB* параметров МО моделей, отредактированных пользователем, и база данных *nvUserInfoDB* информации о пользователях Нивы, а также с) из программы *nvClient*, размещенной на компьютере удаленного пользователя.

Программа пользователя *nvClient* и программа каждого сервера, размещенные на различных удаленных друг от друга компьютерах, связаны взаимным обменом данными по сетевым коммуникациям Интернет. На рис. 1 коммуникации изображены прямоугольником с названием `СЕТЬ...`.

Сетевой обмен данными осуществляется специальными сетевыми функциями, реализованными в сервантах, - на рис. 1 их имена заканчиваются `_i`. Особенность сетевой функции в том, что она реализована и исполняется сервантом на одной стороне, а вызывается в программе на другой стороне сетевой коммуникации. Вызывающая сторона задает параметры функции и получает результат ее исполнения. На рис. 1 стрелка «запрос» указывает на сторону, где исполняется функция. Пример «запроса» - запуск пользователем цикла итераций ГМ на сервере.

Серванты создаются при запуске серверов *nvServerMod*, *nvServerDB*. Чтобы серванты оказались доступными программе *nvClient*, ссылки на них регистрируются в службе *NameService*, IP-адрес которой известен *nvClient*. Получив ссылку на сервант, *nvClient* может исполнять его сетевые функции. Служба *NameService* дает возможность расширять Ниву на несколько серверов, а также в перспективе работать несколькими пользователями.

Ключевыми для концепции Нивы являются понятие МодОбъекта и понятие ГиперМодели. ГиперМодель представляется композицией именованных МодОбъектов *[modelName][objName]*, где *[modelName]* – имя модели, функциональность которой обозначим через F_i , *[objName]* – имя набора данных D_i , достаточных для расчета мо-

дели F_i .

Таким образом, содержательно i -й МодОбъект – это пара $M_i = \{D_i, F_i\}$.

ГиперМодель графически представляется графом работ с ее МодОбъектами. Граф ГиперМодель конструируется удаленным пользователем из МодОбъектов, заранее откомпилированных и хранимых в базе *nvParamsDB* сервера. МодОбъект может иметь программный код неограниченной сложности и быть не только моделью, но и, например, численным методом, интерпретатором, графом и т.д.

Так, например, систему дифференциальных уравнений можно представить композицией МО, реализующих части этой системы. Это позволяет пользователю создавать функционально различные конфигурации ГиперМодели. Понятие МО позволяет естественно объединять в ГМ модель и численный метод ее расчета. На рис. 2 для примера в ГиперМодель включен подграф из 2-х МО разной функциональности – численного метода Рунге-Кутты-Мерсона *[RKM][standard]* и модели *[TrophicChain3][standard]* трофической цепи 3-х популяций.

На рис. 2 показан другой пример МО, которые имеют одинаковую функциональность – модель движения почвенной влаги *Water_Air_01*, но отличаются набором данных для подслоев почвы *Loamy sand*, *Loam*, *Silt loam* различного механического состава. Это позволяет легко конструировать расчет влагопереноса в нужном почвенном профиле.

Направленный граф ГМ показывает последовательность выполнения работ над ее МО. Работа заключается в исполнении реализованной в МО заданной функции. Отметим, что работа может не иметь интерпретации, физически содержательной с точки зрения модели.

Как выполняются работы в водной ГМ? Получив фокус управления программой, МодОбъект - численный метод *meth_BDF_for_Water_Air* - исполняет работы над подчиненными ему МодОбъектами *[Loamy sand]*, *[Loam]*, *[Silt loam]*, вызывая в них заданную функцию в последовательности, указанной стрелками. Функция рассчитывает правую часть, а также матрицу A_{SPi} для всех точек i той части почвенного профиля, которая представлена данным МодОбъектом. Если результат расчета не удовлетворяет заданному критерию точности, численный метод в цикле будет повторять ту же последовательность работ, но для другого теста численной схемы. Когда результат окажется удовлетворительным, фокус управления выйдет из цикла и будет передан в *[RKM][standard]*.

Заметим, что ошибочно полагать, будто сначала полностью рассчитывается МО *[Loamy*

sand], затем [Loam] и т.д. Используемая здесь численная схема совпадает с обычной схемой расчета этой задачи без участия графа.

МО обычно имеет именованные интерфейсные параметры, доступные другим МО по имени. Интерфейсные параметры позволяют без перекомпиляции связывать различные МО в ГиперМодель, например, старые численные методы и добавленные в систему МО новые модели. Интерфейсные параметры также обеспечивают МО быстрый обмен данными, что позволяет рассчитывать модели в частных производных за время сопоставимое с расчетом обычными программами.

Нива хранит на сервере не просто модель, а множество именованных откомпилированных ее МодОбъектов с разными значениями набора данных и возможно вариациями функциональности, для которых проверено функционирование модели. Это сравнимо с хранением обычной фун-

кции в табличной форме.

МодОбъекты иначе называются здесь ситуациями. Нива может хранить миллионы ситуаций. И хотя такой «табличный» способ представления моделей на первый взгляд кажется слишком ограничивающим, он дает сетевой библиотеке необходимое качество – надежность использования моделей.

Поясним структуру Нивы на рис. 1, описывая работу пользователя. Она включает 7 основных стадий: а) регистрация или проверка регистрации пользователя; б) получение списка ГМ пользователя; в) получение нужной ГМ или создание новой ГМ, если ее нет в списке; г) проверка ГМ на сервере nvServerMod, сохранение ГМ на сервере nvServerDB; д) инициализация ГМ в памяти nvServerMod; е) расчет ГМ циклами итераций, получение результатов; ж) закрытие сеанса и программы nvClient.

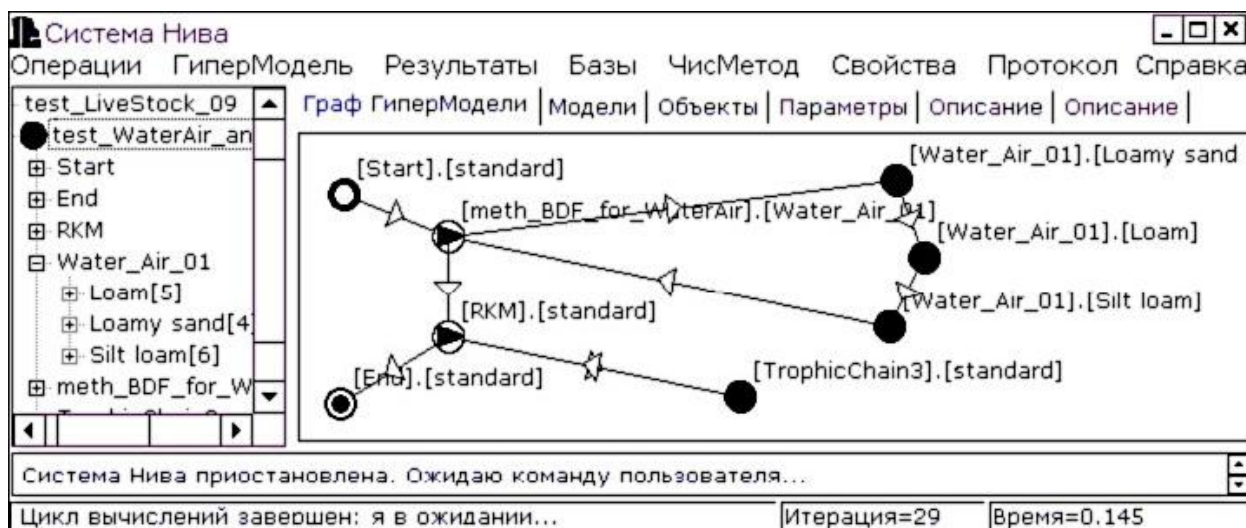


Рис. 2. Граф сценария (ГиперМодели) расчета водной модели (1).

После запуска пользователем программы nvClient на своем удаленном компьютере, перед ним появляется главная форма с набором вкладок, рис. 2. Форма показывает последнюю ГМ, с которой работал пользователь в предыдущем сеансе. Одной из команд главного меню “Операции” пользователь проверяет свою регистрацию на nvServerDB. Если проверка прошла успешно, для данного пользователя автоматически создаются на nvServerMod индивидуальные серванты, перечисленные на рис. 1 в прямоугольнике nvServerMod, а также инициализируется ядро nvCore, которое будет выполнять вычислительные и другие полезные работы с ГМ. Отметим, что ядро nvCore обособлено от собственно сервера nvServerMod, выполняющего лишь доставку запросов к nvCore и передачу удаленному пользователю событий, в том числе результатов

расчета, возникающих в nvCore. На рис. 1 это указано соответствующими стрелками.

Далее пользователь получает нужную ГМ либо создавая ее, либо запрашивая с сервера nvServerDB. Чтобы запросить ГМ, он получает список всех ранее созданных им ГМ (см. на рис. 2 слева), в списке выделяет нужную ГМ, затем щелчком требует переслать себе ее граф с nvServerDB. В итоге в правой части формы на вкладке `Граф ГиперМодели` рис. 2 появится граф ГМ. Вместе с графом будут получены значения входных параметров и начальные значения переменных для компонент ГМ, а также их разнообразные описания. Это показано на рис. 3.

Если нужной ГМ нет, пользователь создает ее. Он запрашивает каталог всех МО в базе сервера и просто перетаскивает мышкой нужные МО на вкладку `Граф ГиперМодели`, соединяя затем

их стрелками.

Командой меню, вызванного правым щелчком по полю вкладки `Граф ГиперМодели` полученный граф надлежит проверить с помощью анализатора сервера nvServerMod и специальных

грамматик [3]. Если проверка не оказалась успешной, граф ГМ придется реконструировать. Если проверка успешна, можно задавать входные данные и приступать к расчету ГМ.



Рис. 3. Изменения значений параметров МодОбъекта ГиперМодели

Пользователь может рассчитать ГМ на своих данных, изменив стандартные значения параметров и переменных МодОбъектов на вкладках `Модели`, `Объекты`, `Параметры` рис. 2 и 3, если изменение было разрешено автором. Пользователь также может выбрать переменные для вывода на графики/ряды/слайды (см. слева на рис. 2 узлы, окрашенные желтым).

Теперь командой `Создать` из меню, вызванного правым щелчком по полю вкладки, правильный граф ГМ отсылается на сервер nvServerMod в ядро nvCore, которое загружает в свою память исполняемый код компонент ГМ из банка компонент (см. на рис. 1 справа), инициализирует ком-

поненты ГМ заданными значениями параметров, дополнительно проверяет правильность этих значений, затем, следуя графу, выполняет сборку ГМ из МодОбъектов и исполняет заданный начальный цикл расчета ГМ. Если все успешно, пользователь увидит графики. Например, весьма скоро увидит профиль матричного (капиллярного) потенциала IPsiC (это переменная Ψ_c в (1.11)) влаги в почве для ГМ на рис. 4. Слева на рис. 4 видно раскрытое поддерево описаний выводимых переменных для слоя суглинка [Loam]. Отметим, что была рассчитана весьма сложная нелинейная модель в частных производных для 3-х слой-



Рис. 4. Результаты расчета модели влагопереноса в частных производных

ной пористой почвы на сетке в 150 узлов, сведенная к системе 300 обыкновенных дифференциальных уравнений.

Той же командой можно продолжать циклы итераций столько, сколько нужно. Число итераций в цикле и шаг расчета и вывода результатов пользователь может изменять.

После расчета ГМ, командой `Операции/Выход` пользователь разрушает ГМ в памяти nvServerMod и прекращает работу своей программы nvClient. При этом автоматически перезагружаются серверы, участвовавшие в сеансе.

ДВУХФАЗНАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ

Двухфазная модель совместного капиллярно-го и гравитационного переноса фаз плотности ρ_α и концентрации θ_α воды ($\alpha = w$) и воздуха ($\alpha = a$) в слое почвы представлена системой уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w \theta_w) = -\text{div} \mathbf{j}_w - \tilde{e};$$

$$\mathbf{j}_w = -K_w \nabla(\psi_{G,w} - \rho_w \mathbf{g}); \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_a \theta_a) = -\text{div} \mathbf{j}_a;$$

$$\mathbf{j}_a = -K_a \nabla(\psi_{G,a} - \rho_a \mathbf{g}); \quad (1.2)$$

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

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

$$K_\alpha = K_s \frac{\rho_\alpha}{\rho_{w0}} \frac{\mu_w}{\mu_a} g^{-1} k_{r\alpha}(S_e); \quad \alpha \in \{w, a\}; \quad (1.5)$$

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

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

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

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.

В системе уравнений (1) искомыми являются функции – термодинамические потенциалы воды $\psi_{G,w} \equiv \psi_{G,w}(t, z)$ и воздуха (пневматический потенциал) $\psi_{G,a} \equiv \psi_{G,a}(t, z)$ дж/м³-Н₂О. Матричный потенциал $\psi_{G,ms}(\theta_w)$ является заданной функцией ОГХ Ван Генухтена от объемной влажности почвы θ_w м³-Н₂О/м³-почвы, определяемой выражениями (1.4).

Здесь: θ_{wr} - остаточная (гигроскопическая) влажность, θ_{ws} - влажность насыщения почвы; θ_p , м³-Н₂О/м³-почвы, - пористость почвы, т.е. доля объема, не занятая почвенным скелетом; K_α , сут, - коэффициент проводимости фазы α , K_s , м/сут, - коэффициент фильтрации, μ_α , м²/сек - кинематическая вязкость воды и воздуха; \tilde{e} , - сток в корневую систему растений. $g, n, m, \mu_\alpha, \rho_{w0}, \beta, W, RT$ - константы.

Разделив (1.3) на $g\rho_{w0}$, получим соотношение для напоров $\psi_w = \psi_a - \psi_c$,

$$\text{где } \psi_{G,ms} = -\psi_c g \rho_{w0}, \text{ м-Н}_2\text{О} \quad (1.11)$$

На границе слоев потенциалы $\psi_{G,w}$ и $\psi_{G,a}$, потоки j_w и j_a должны быть непрерывными, а влажности θ_w и θ_a могут быть разрывными.

Слой $[0, H_s]$ разбивается на контрольные объемы V_i толщины $\tilde{h}_i, i = 0, 1, \dots, N-1, N, V_0 = V_N = 0$.

В центры V_i поместим узлы z_i сетки. Интегрируя (1) по каждому V_i , получим относительно $\theta_w, \psi_w = \psi_{G,w} / (g\rho_{w0})$ систему ОДУ для каждого узла z_i :

$$A_{SP,i} \begin{Bmatrix} \dot{\psi}_{w,i} \\ \dot{\theta}_{w,i} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} O_{dw,i} \\ O_{da,i} \end{Bmatrix} = 0,$$

$$\text{где } A_{SP,i} = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_w & \theta_w \frac{\partial \hat{\rho}_w}{\partial \psi_w} \\ \theta_a \frac{\partial \hat{\rho}_a}{\partial \psi_a} \frac{\partial \psi_c}{\partial \theta_w} - \hat{\rho}_a & \theta_a \frac{\partial \hat{\rho}_a}{\partial \psi_a} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$O_{da,i} \equiv -\tilde{h}_i^{-1} (\tilde{J}_{\alpha,i+1/2} - \tilde{J}_{\alpha,i-1/2}), \quad \hat{\rho}_\alpha = \rho_\alpha / \rho_{w0},$$

$$\alpha = \{w, a\}, i=1, 2, \dots, N-1.$$

Система (4.2.3) имеет малые коэффициенты перед производными $\dot{\psi}_w$, т.е. относится к числу сингулярно-возмущенных систем. Ее детерминант в i -ой точке равен

$$\det A_{sp} = \hat{\rho}_a \theta_w \frac{\partial \hat{\rho}_w}{\partial \psi_w} + \hat{\rho}_w \theta_a \frac{\partial \hat{\rho}_a}{\partial \psi_a} - \theta_a \theta_w \frac{\partial \hat{\rho}_w}{\partial \psi_w} \frac{\partial \hat{\rho}_a}{\partial \psi_a} \frac{\partial \psi_c}{\partial \theta_w} \quad (3)$$

Для насыщенной водой точки $\theta_a = 0, \theta_w = \theta_{ws}$ и $\det A_{sp} = -\hat{\rho}_a \theta_w \partial \hat{\rho}_w / \partial \psi_w$, а для сухой точки $\theta_w = 0, \theta_a = \theta_p$ и $\det A_{sp} = -\hat{\rho}_w \theta_a \partial \hat{\rho}_a / \partial \psi_a$.

Поэтому отличная от 0 сжимаемость $\partial \hat{\rho}_\alpha / \partial \psi_\alpha$ воды и воздуха обеспечивает невырожденность системы (2).

Жесткая система (2) решается численным методом «формулы обратного дифференцирования» [4].

В заключение автор благодарит всех обсуждавших концепцию сетевой библиотеки и, предполагая иных также заинтересованными, приглашает высказать по avv_alexv@mail.ru замечания и участвовать в наполнении библиотеки своими моделями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буч Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения. Пер. с англ. М.: Конкорд, 1992. 539 с.
2. Воротынцева А.В. К концепции сетевых информационно-вычислительных библиотек // Моделирование и обработка информации. Сборник научных трудов МФТИ. М.: 2008.
3. Воротынцева А.В. О графическом интерфейсе сетевых информационно-вычислительных библиотек // Моделирование и обработка информации. Сборник научных трудов МФТИ. М.: 2008.
4. 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.

ECOLOGICAL MODELS AS SCENARIOS IN THE NETWORK LIBRARY OF COMPUTABLE MODELS. THE EXAMPLE OF PUBLICATION AND CALCULATIONS OF TWO PHASE SOIL MOISTURE FLOW MODEL

© 2009 A.V. Vorotintsev

Dorodnitsyn Computing Center, Russian Ac.Sc., Moscow;
e-mail: avv_alexv@mail.ru

The elements of architecture of network library of computable models, the order of user work are described by the example of computing scenario of the model of the soil water flow.

Key words: *network library; soil water flow.*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ МУРАВЬЕВ НА ЧИСЛЕННОСТЬ ИКСОДОВЫХ КЛЕЩЕЙ В ЭКОСИСТЕМАХ ЕВРАЗИИ

© 2009 О.А. Вшивкова

Международный научный центр исследований экстремальных состояний организма при Президиуме Красноярского научного центра СО РАН; e-mail: oavshivkova@mail.ru

Предложена математическая модель влияния муравьев – важного компонента лесных биоценозов, на численность популяции иксодового клеща. В работе рассматривается возможность управления численностью популяции иксодовых клещей вплоть до их элиминации в экосистемах Евразии.

Ключевые слова: муравьи, иксодовый клещ, динамика популяции.

Муравьи – важнейший компонент лесных, степных и пустынных биоценозов. Широко известна их положительная роль как эффективных энтомофагов, уничтожающих многих хвоегрызущих вредителей. Жизнедеятельность муравьев немаловажна в естественных процессах почвообразования и расселения растений. С 1963 года в СССР начали проводиться всесоюзные мир-мекологические симпозиумы, посвященные использованию муравьев в защите леса. Так, работы по сохранению и расселению полезных лесных муравьев проводились лесоводами Эстонии, Латвии, Белоруссии, Российской Федерации как часть программы по повышению продуктивности леса и охране окружающей среды. Большое количество муравейников было одной из главных причин отсутствия вспышек массового размножения хвое- и листогрызущих вредителей в Полесском заповеднике (рыжие лесные муравьи эффективно уничтожали этих вредителей, предотвращая возникновение вспышек) [1].

Многие авторы в своих работах отмечают активное влияние муравьев на растительный покров, на численность и видовой состав беспозвоночных вблизи муравейников [2-5]. Однако большинство исследований направлено на выявление связей между муравьями и их конкурентами, муравьями и их жертвами, муравьями и их хищниками. Практически не уделяется внимания исследованию сосуществования популяций муравьев и популяций мелких млекопитающих, птиц, ведущих приземный образ жизни, – основных прокормителей иксодового клеща, не исследуется и влияние муравьев непосредственно на популяции иксодового клеща.

Муравьи начинают оказывать серьезное влияние на биоценоз при условии, что численность их достаточно велика. Например, популяции этих насекомых могут создавать препятствия для перемещения по территории мелких млекопитающих и птиц в виде муравьиных дорог. Возможно

также, что в экосистеме при активном воздействии муравьев на химический состав почвы, могут создаваться неблагоприятные условия для существования грызунов.

Пусть плотность популяции муравьев - m , а плотность популяции мелких млекопитающих - n , тогда сосуществование этих популяций в экосистеме можно охарактеризовать кривой, представленной на рис. 1.

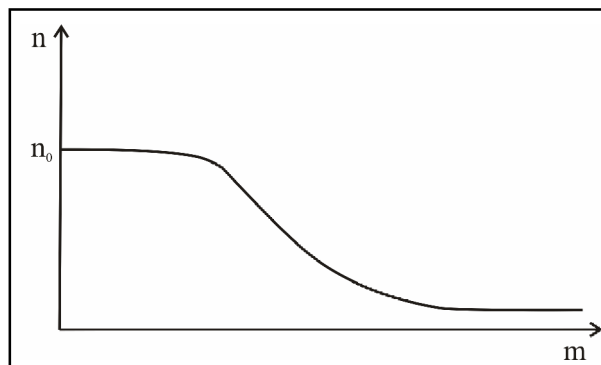


Рис. 1. Схема влияния муравьев на плотность популяции мелких млекопитающих

Из рисунка 1 следует, что, начиная с некоторой плотности популяции муравьев, плотность популяции грызунов снижается. Точно также должна снижаться и плотность популяции гнездящихся птиц. Снижая таким образом численность грызунов можно опосредованно контролировать и численность прокармливаемых ими иксодовых клещей.

Исследуем возможность прямого воздействия популяции муравьев на популяции иксодовых клещей. Для этого необходимо рассмотреть жизненный цикл клеща. Известно, что самка клеща откладывает около 2000 -5000 яиц в надпочвенную подстилку экосистемы. Яйца превращаются в личинки. Для перехода в следующую фазу (нимфы) личинки должны питаться кровью животных, в основном, мелких грызунов. Образовав-

шиеся нимфы поднимаются по стеблям растений на высоту порядка нескольких сантиметров, прикрепляются к телу животных, напиваются их кровью и уходят в подстилку, где после зимовки переходят в следующую стадию, имаго.

На последнем этапе метаморфоза нимфы превращаются в имаго, а часть из них – в самок, которые особенно опасны в случае, если в экосистеме присутствуют возбудители энцефалита, болезни Лайма и др. Взрослой половозрелой самке клеща уже недостаточно крови мелких млекопитающих для пропитания и откладки яиц, и поскольку имаго поднимаются по стеблям растений сравнительно высоко – до полуметра, – они «нападают» на более крупных млекопитающих, в том числе и на человека. Напившись кровью, самка отпадает и, попав в подстилку, откладывает яйца. Схема жизненного цикла иксодового клеща представлена на рис.2.

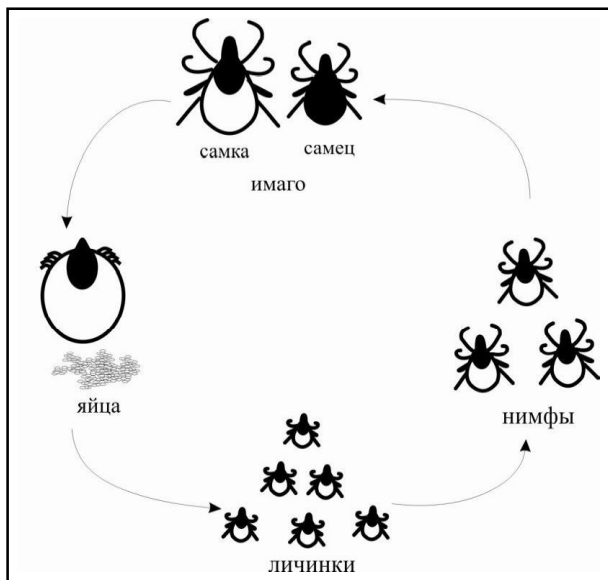


Рис.2. Жизненный цикл иксодового клеща

Известно, что на насекомых многочисленных видов муравьи «охотятся» целенаправленно, а нападение на представителей других видов определяется вероятностью встречи муравья с «жертвой», зависящей от численности муравьев. «Жертвой» муравья-фуражира может стать и иксодовый клещ на начальных стадиях развития (яйцо, личинка, нимфа) (рис.3).

Математическую модель прямого воздействия популяций муравьев на плотность популяции иксодового клеща можно построить в виде разностных уравнений, основываясь на имеющейся модели взаимодействия популяций иксодовых клещей и мелких млекопитающих [6].

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-нимфа», $\eta_i(n)$ - вероятность пе-

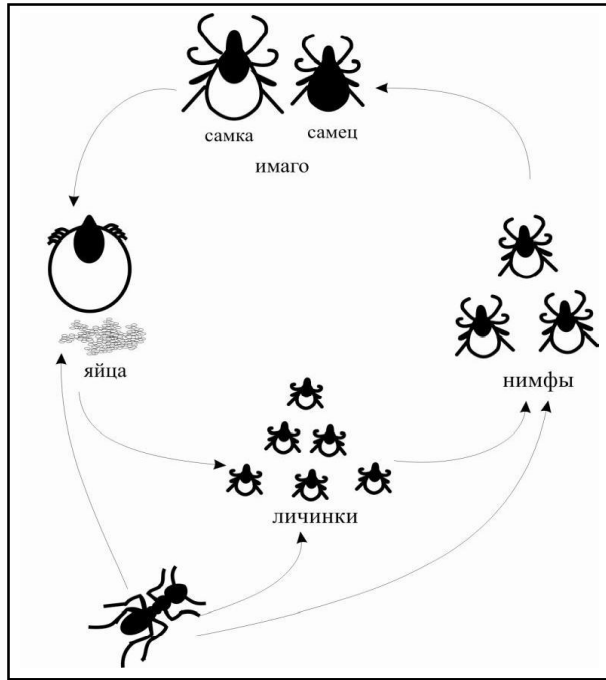


Рис.3. Влияние муравьев на жизненный цикл иксодового клеща: жертвой муравья-фуражира могут стать яйца, личинки и нимфы иксодового клеща

рехода «нимфа-маго», где i в зависимости от экологических условий местности, равно 4 или 5 ($0 < \eta_i < 1$). Тогда $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - соответственно, доли яиц, личинок, нимф, съеденных муравьями ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 < 1$).

Наличие и отсутствие иксодового клеща в экосистеме определяется мальтузианским параметром.

$$\alpha = \varphi(m, n, y_1, y_2, \dots, y_v) \tag{4}$$

где m - плотность популяции муравьев.

Если γ - доля самок в популяции клеща, то при заданных значениях y_v и n :

$$j = j(n) = N\gamma\eta_1\eta_2\dots\eta_i \tag{5}$$

$j' = j(n, m) = N\gamma\eta_1(1 - \alpha_1 m)\eta_2(1 - \alpha_2 m)\eta_3(1 - \alpha_3 m)\dots\eta_i$ (6) где j - мальтузианский параметр размножения клеща в отсутствие влияния муравьев, j' - мальтузианский параметр размножения клеща в условиях прямого влияния муравьев; $j' < j$ (рис.4).

Тогда, увеличивая численность муравьев в экосистеме, можно снижать значение мальтузианского параметра размножения иксодовых клещей. На графике это выглядит следующим образом: вся кривая опускается ниже, вследствие чего область, в которой мальтузианский параметр меньше 1, расширяется вплоть до смещения всей кривой α (см. рис.4) ниже прямой $\alpha = 1$ - и, следовательно, популяция клещей элиминируется из экосистемы.

Совместно прямое и опосредованное (через прокормителей) воздействие муравьев на экосистемы, в которых присутствуют популяции иксо-

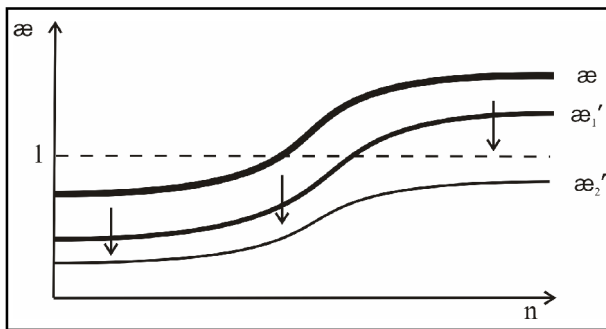


Рис. 4. Влияние наличия популяции муравьев в экосистеме на значение мальтузианского параметра популяции клещей при различных значениях плотности мышевидных грызунов: α – в отсутствие влияния муравьев, α'_1 , α'_2 – в условиях влияния муравьев. По оси абсцисс – плотность популяции грызунов, по оси ординат – мальтузианский параметр размножения клеща

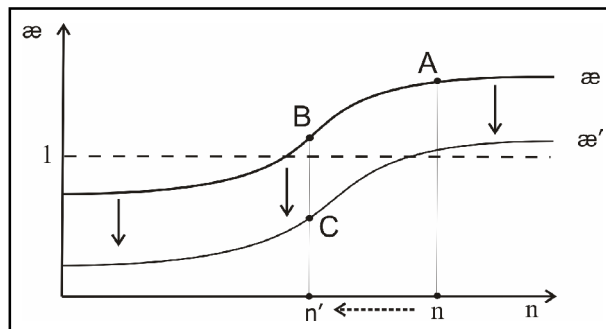


Рис. 5. Пути влияния популяций муравьев на мальтузианский параметр размножения иксодовых клещей

дового клеща, можно охарактеризовать уравнением:

$$j' = j(n(m), m) = N\eta'_1(1-\alpha_1 m)\eta'_2(1-\alpha_2 m)\eta'_3(1-\alpha_3 m)\dots\eta'_i, \quad (7)$$
 где $\eta'_1, \eta'_2, \eta'_3, \dots, \eta'_i$ – вероятности переходов «яйцо – личинка», «личинка – нимфа», «нимфа – имаго», при прямом воздействии муравьев на прокормителей клеща.

Рисунок 5 иллюстрирует влияние наличия муравьев на величину мальтузианского параметра размножения популяции иксодового клеща.

Как следует из рисунка 5, при опосредованном (через прокормителей) воздействии муравьев плотность популяции прокормителей уменьшается от n до n' , а значение мальтузианского параметра размножения иксодовых клещей переходит по кривой j опускается до j' , и значение мальтузианского параметра из точки В кривой j переходит в точку С кривой j' .

При этом экосистема практически не подвергается деформации, поскольку клещ не является существенным звеном в экосистемах, обитателем которых он оказывается, а численность популяции муравьев периодически модулируются.

Исходя из условий каждой конкретной экоси-

стемы (плотности популяции грызунов, биотических и абиотических компонентов экосистемы) и варьируя значения численности популяции муравьев, можно управлять численностью популяции иксодовых клещей вплоть до их элиминации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биологические основы использования полезных насекомых. М. 1988.
2. *Голосова М.А., Захаров А.А.* Эффективность воздействия муравьев *Formica rufa* на дубовую листовёртку // Лесоведение. 1974. № 1. С. 37-42.
3. *Бугрова Н.М., Пиенцица Л.Б.* Трансформация пространственной структуры травяного покрова вокруг гнезд *Formica aquilonia* // Успехи современной биологии. Москва, 2003. Т. 123. №3. С. 273-277.
4. *Козак В.Т.* Возможности использования рыжих лесных муравьев для защиты леса // Матер. 8 Всес. мирмекол. симп. «Муравьи и защита леса». Новосибирск, 1987. С. 35-38.
5. *Марченко Я.И.* Эффективность муравьев в ограничении численности пяденицы и методы ее оценки // Матер. 8 Всес. мирмекол. симп. «Муравьи и защита леса». Новосибирск, 1987. С. 42-45.
6. *Новиков В.Н., Вшивкова О.А., Круглик О.В., Моргулис И.И., Хлебопрос Р.Г.* Элиминация популяций иксодового клеща из экосистем // ДАН. 2008. Т. 420, №6. С. 1-2.

MATHEMATICAL SIMULATION OF ANT INFLUENCE ON THE IXODE TICKS NUMBER IN EURASIAN ECOSYSTEMS

© 2009 O.A. Vshivkova

International Scientific Centre for the Organisms Extreme States Research attached to Presidium of Krasnoyarsk Scientific Centre, Siberian Federal University, Krasnoyarsk; e-mail: oavshivkova@mail.ru

Mathematical simulation of the influence of ants on ixode ticks number is developed. Forest ants population is one of the important components in ecosystems. The possibility of ixode ticks number control including their elimination from Eurasian ecosystems is described.

Key words: ants, ixode ticks, population dynamics.

УДК 57.055

ИЗМЕНЕНИЯ СООТНОШЕНИЯ РЕАЛИЗОВАННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НИШ РАСТЕНИЙ В СООБЩЕСТВАХ ПРИ СУКЦЕССИИ

© 2009 Е.В. Зубкова

Учреждение Российской академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, старший научный сотрудник
Российская Федерация, Московская область, г. Пущино, ул. Институтская, д. 2.
Тел.: 8-4967-73-39-06, e-mail: elenazubkova@rambler.ru

С помощью экологических шкал растений показаны разные реакции сообществ растений на изменение факторов в процессе экологической сукцессии. Результаты получены с помощью программной системы специализированной обработки геоботанических описаний и могут быть использованы при разработке моделей динамики лесного напочвенного покрова.

Ключевые слова: экологические шкалы, моделирование, экологические факторы, увлажнение почвы, богатство почвы

ВВЕДЕНИЕ

Лесные сообщества – развивающиеся многовидовые многоярусные длительно существующие системы, состоящие из организмов, способных к росту, размножению и имеющие конечный срок жизни. Постепенное увеличение в почве содержания и изменение состава органических и неорганических веществ (в том числе по причине изменения физико-химических свойств почв), а также изменение режимов освещенности (как следствие роста и развития древесных видов и изменения ярусной структуры растительного сообщества) приводит к постепенному изменению ресурсной базы данного местообитания и, как следствие, к изменению видового состава данного местообитания. Это свойство растительных сообществ было названо Ф. Клементсом первичной сукцессией (Clements, 1916).

В качестве первоначальной конструкции для описания распределения ресурсов между видами в растительных сообществах была предложена теория ниш (Hutchinson, 1948). Г. Хатчинсон рассматривал каждую физическую, химическую, биотическую компоненты среды как некий градиент, вдоль которого у каждого организма есть свое значение оптимума и пессимума, таким образом, ниша может быть представлена как n -мерный гиперобъем, охватывающий полный диапазон условий, при котором организм может успешно воспроизводить себя. Варьирование состава растительности вдоль градиента среды является результатом различий требований видов к местообитаниям. Известно предположение Ю. Одум, что ранние сукцессионные виды имеют более широкие экологические ниши (Odum,

1969), однако для растений количественно это показано не было.

В настоящее время разрабатываются прогностические модели распределения состава сообществ в различных местообитаниях, которые базируются на предположении существования реакций (откликов) видов на градиенты факторов среды (например, Guisan, Zimmermann 2000, Austin et al. 2006). Более детально экологические отклики видов описываются непараметрическими регрессионными моделями, которые становятся популярным инструментом в экологическом моделировании, в основном в рамках генерализованной аддитивной модели (generalized additive models, GAMs: Yee, Minchin 1991; Guisan et al. 2002). Для видов с небольшой частотой встречаемости при недостаточном числе наблюдений и/или высокой вариации эмпирических данных невозможно смоделировать кривые экологических откликов видов только на основе фрагментарных эмпирических данных. Для построения кривых таких видов эмпирические данные необходимо дополнять информацией из экологических шкал (Раменский, 1956; Цыганов, 1983; Ellenberg, 1991). В этой работе будет рассмотрено применение шкал Д.Н.Цыганова для нескольких массивов геоботанических описаний (ГБО) в различных частях Европейской России для местообитаний, представляющих собой последовательные ряды лесных сукцессионных стадий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Шкалы устроены таким образом, что диапазон проявления каждого фактора среды описан в таблицах балловой шкалой. Каждый вид расте-

ния имеет диапазонную балловую характеристику, кодирующую, при каких условиях он встречается. Ширина диапазона встречаемости различна у разных видов растений одного сообщества. В данной работе будет рассмотрено только долю видов с узким диапазоном существования относительно пределов вариации фактора, которые будем называть стенобионтными (или в западной классификации специалистами).

По ширине диапазона на шкале фактора виды ГБО были поделены на две группы. Так как шкала увлажнения почв (Hd) описывает изменение фактора 23 баллами, то было принято к стенобионтным отнести виды с шириной диапазона не более 7 баллов; ширина шкалы богатства почв азотом (Nt) - 11 баллов, следовательно, стенобионтными (с узким диапазоном) было принято считать виды с шириной диапазона от 1 до 5. Предложенное деление условно, но оно, как показала работа, позволяет выявить и количественно показать некоторые закономерности в изменении видового состава изученных сообществ в ходе сукцессии. В работе с большими массивами данных была использована программа EcoScaleWin (Грохлина, Ханина, 2006; Зубкова и др., 2008), позволившая существенно ускорить составление списков видов с балловыми характеристиками и получить сводную информацию об экологических условиях изучаемого участка.

Важной особенностью при изучении закономерностей смен растительных сообществ в ходе сукцессии является отсутствие большого количества участков леса, где мы могли бы достаточно уверенно говорить о том, что представленный ряд изменений можно оценивать как сукцессионный ряд. После тщательного обсуждения с коллегами, в дополнение к ранее рассмотренным (Зубкова, Комаров, 2008) были отображены три массива данных, представленных в базе данных «FORUS-1» (Smirnova et al., 2006): 1) данные О.И.Евстигнеева по динамике смен растительных сообществ на вершинах грив дюн зандровых местностей Неруссо-Деснянского полесья Брянской области, (заповедник «Брянский лес») (Евстигнеев, 2000, 2004); 2) данные, собранные в экспедиции ЦЭПЛ РАН под руководством О.В.Смирновой по лесам Костромской области (Луговая, 2008); 3) данные, также собранные в экспедиции ЦЭПЛ РАН под руководством О.В.Смирновой по Печоро-Илычскому заповеднику (Смирнова и др., 2007). Было взято авторское выделение сукцессионных стадий. Размер площадок ГБО во всех работах стандартный - 10x10 м.

В таблице приводятся названия сукцессионных стадий и количество ГБО, проанализированных для каждой стадий.

Таблица 1. Материалы исследования

Обозначение	Территория и стадия сукцессии*	ГБО
A	Печоро-Илычский заповедник	
I	Пихто-ельник с кедром чернично-зеленомошный	21
II	Пихто-ельник с кедром бореально-мелкотравный	64
III	Пихто-ельник с кедром высокотравный	37
B	Костромская область	
I	Сосняк с подростом ели кустарничково-зеленомошный	36
II	Ельник кустарничковый, мелкотравно-бореальный	59
III	Ельник с пихтой и липой высокотравный неморально-бореальный	45
B	Брянская область, заповедник "Брянский лес"	
I	Сосняк зеленомошный	30
II	Сосняк бруснично-зеленомошный с дубом и сосняк чернично-зеленомошный с дубом	8
III	Березово-дубово-елово-сосновый лес с подростом липы, клена и подлеском лещины	16
IV	Полидоминантный хвойно-широколиственный лес с дубом	11

Примечание: * Названия сообществ даны авторами, описавшими сукцессионные смены растительности на территориях (ссылки на источники приводятся выше по тексту).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Были получены следующие результаты, одинаковые для всех трех территорий:

1. Число видов растений (сосудистых и мохообразных) в сообществах по ходу сукцессии возрастает от начальной к последней изученной стадии (Рис.1).
2. В выбранном ряду сообществ по фактору увлажнения почвы происходит относительное увеличение доли видов с узкими диапазонами (Рис. 2).
3. Вновь появляющиеся стенобионтные виды по фактору влажности почв имеют в среднем те же экологические потребности к условиям жизни, что и виды в сообществах на предыдущих сукцессионных стадиях, так как минимальная

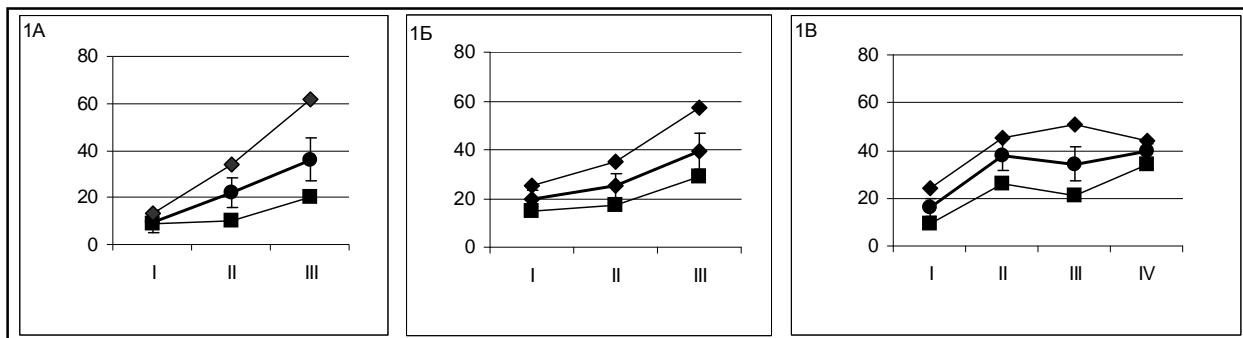


Рис. 1. Динамика числа видов растений в ГБО на разных стадиях сукцессии: А - Печоро-Ильичский заповедник, Б – Костромская область; В – заповедник Брянский лес; по горизонтальной оси - стадии сукцессии, по вертикальной – число видов в ГБО; n - минимальное число видов, встреченное в ГБО этой стадии сукцессии, l - среднее и - максимальное число видов, встреченное в ГБО этой стадии сукцессии (название стадий сукцессий даны в таблице 1). Для средних значений отложены среднеквадратичные отклонения, вычисленные по обработанным ГБО.

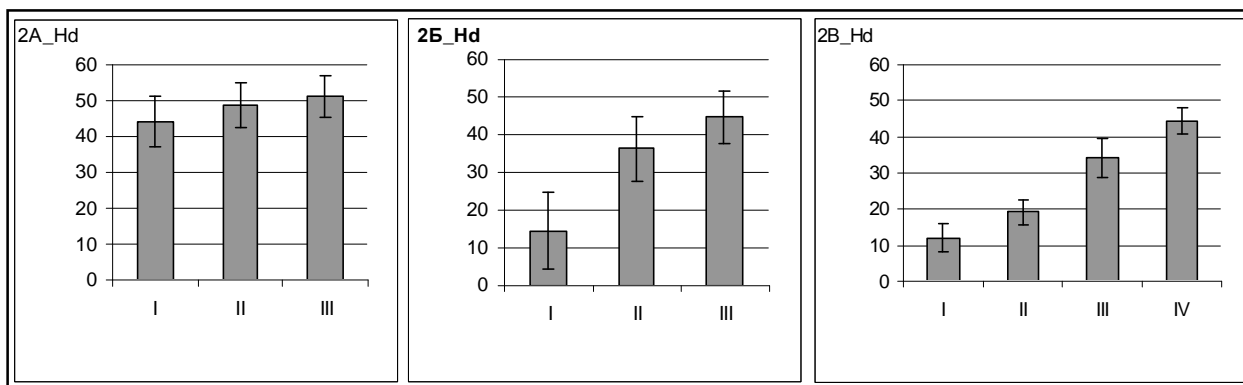


Рис. 2. Процент стенобионтных видов растений по фактору влажности почв (Hd) в ГБО на разных стадиях сукцессии: 2А_Hd - Печоро-Ильичский заповедник, 2Б_Hd – Костромская область; 2В_Hd – заповедник Брянский лес; по горизонтальной оси - стадии сукцессии, по вертикальной – процент стенобионтных видов в сообществе на данной стадии сукцессии. Для каждой стадии отложены среднеквадратичные отклонения, вычисленные по обработанным ГБО

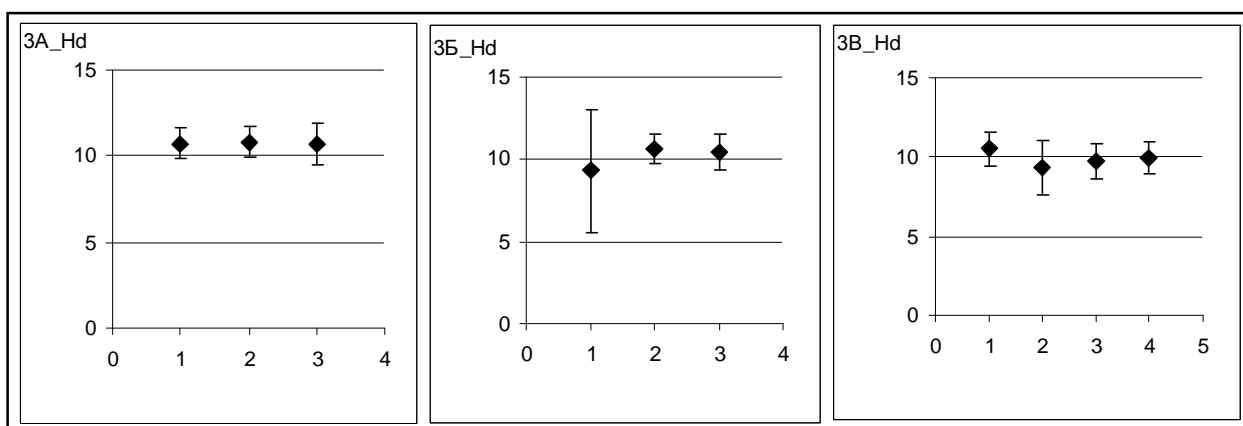


Рис. 3. Левая граница стенобионтных видов растений по фактору влажности почв (Hd) в ГБО на разных стадиях сукцессии: 3А_Hd - Печоро-Ильичский заповедник, 3Б_Hd – Костромская область; 3В_Hd – заповедник Брянский лес; по горизонтальной оси - стадии сукцессии, по вертикальной – баллы шкалы влажности почв. Для каждой стадии отложены среднеквадратичные отклонения, вычисленные по обработанным ГБО.

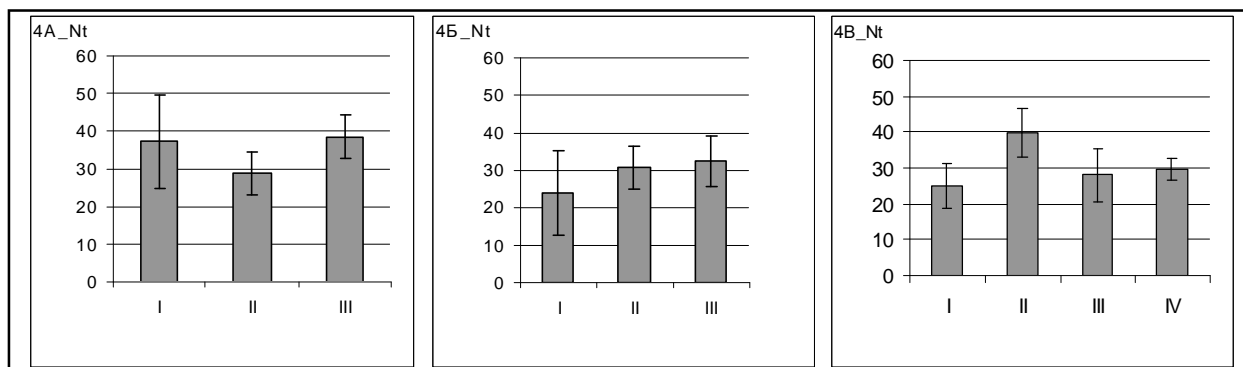


Рис. 4. Процент стенобионтных видов растений по фактору богатства почв азотом (Nt) в ГБО на разных стадиях сукцессии: 4A_Nt - Печоро-Илычский заповедник, 2B_Nt – Костромская область; 2B'_Nt – заповедник Брянский лес; по горизонтальной оси - стадии сукцессии, по вертикальной – процент стенобионтных видов в сообществе на данной стадии сукцессии. Для каждой стадии отложены среднеквадратичные отклонения, вычисленные по обработанным ГБО.

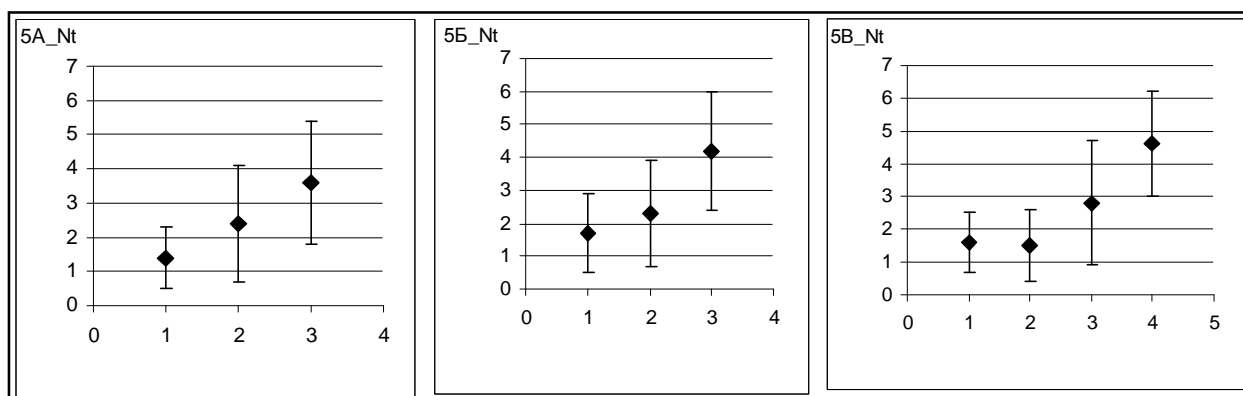


Рис. 5. Левая граница стенобионтных видов растений по фактору богатства почв азотом (Nt,) на разных стадиях сукцессии: 5A_Nt - Печоро-Илычский заповедник, 5B_Nt –Костромская область; 5B'_Nt – заповедник Брянский лес; по горизонтальной оси - стадии сукцессии, по вертикальной – баллы шкалы богатства почв азотом. Для каждой стадии отложены среднеквадратичные отклонения, вычисленные по обработанным ГБО.

балловая граница стенобионтных видов во всех стадиях оказывается одинаковой (Рис. 3).

Анализ сообществ по стадиям сукцессии по фактору богатства почвы продемонстрировал совершенно противоположные изменения состава сообщества:

- Доля стенобионтных видов по фактору богатства почв азотом мало меняется в ходе сукцессии (рис.4).
- От начальной к последней стадии сукцессии происходит смещение минимальной балловой границы экологических условий жизни стенобионтных видов по фактору богатства почв азотом в сторону богатых почв (рис.5), то есть вновь появляющиеся виды предъявляют более высокие требования к почвенному богатству; при этом, соответственно, исчезают виды бедных местообитаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Относительное увеличение доли видов с узкими диапазонами по фактору увлажнения почв в ходе сукцессии подтверждает гипотезу Ю. Одума о том, что ранние сукцессионные виды имеют более широкие экологические ниши, однако результат, полученный при анализе структуры сообществ по фактору богатства почв азотом, не согласуется с этой гипотезой и свидетельствует об иных механизмах динамики структуры сообществ растений при сукцессии. Все результаты обработки демонстрируют уверенные закономерности изменения структуры растительных сообществ.

Названные изменения соотношения экологических ниш растений при сукцессии выявлены в лесах разных климатических зон, что позволяет высказать предположение об их фундаментальном характере. Подход к анализу ГБО, проде-

монстрированный в работе, дает возможность проводить дальнейшее изучение структуры растительных сообществ с позиций реализованных экологических ниш, способ вычисления которых дают экологические шкалы растений.

Необходимо также отметить, что полученные закономерности могут быть использованы для верификации процессных моделей сукцессий лесной растительности, которые в настоящее время еще не разработаны, хотя и существуют их достаточно детальные вероятностные модели (Korotkov et al., 2001). Результаты, полученные в данной работе, указывают на некоторые закономерности в сукцессионной динамике многовидовых лесных сообществ, которые могут быть использованы при построении содержательных процессных моделей лесных сукцессий.

Автор выражает благодарность О.И. Евстигнееву, М.В. Бобровскому, Л.Г. Ханиной, В.Э. Смирнову и Е.М. Глухой за консультации и помощь в отборе геоботанических описаний, а также А.С. Комарову за конструктивные обсуждения. Работа частично поддержана грантом РФФИ 07-04-00952.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Евстигнеев О.И. Характеристика флористического и ценогического разнообразия Неруссо-Деснянского полесья // Оценка и сохранение биоразнообразия лесного покрова в заповедниках Европейской России. М.: Научный мир, 2000. С. 127-128.
3. Евстигнеев О.И. Сукцессионные процессы в растительном покрове задровых местностей (на примере заповедника «Брянский лес» и окружающих территорий) // Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. Кн. 2. / Ред. О. В. Смирнова. М.: Наука, 2004. С. 245-260.
4. Зубкова Е.В., Комаров А.С. Оценка реализованных экологических ниш растений и изменения их композиций по ходу сукцессии растительности // Принципы и способы сохранения биоразнообразия: материалы III Всероссийской научной конференции / Мар. гос. ун-т. Йошкар-Ола, Пушино, 2008. С. 469-470.
5. 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, Пушинский гос. ун-т. Йошкар-Ола: МарГУ, 2008. 96 с.
6. Луговая Д.Л. Роль экологических и антропогенных факторов в формировании видового и структурного разнообразия южнотаежных лесов (восток костромской области) автореф. на соиск.уч.ст.канд.биол.наук. М. 2008. 26 с.
7. Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипов Н.А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Сельхозгиз. 1956. 472 с.
8. Смирнова О.В., Бобровский М.В., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э. Биоразнообразие и сукцессионный статус темнохвойных лесов Шешимопечорского и Большепорожного ботанико-географических районов Печоро-Ильчского заповедника // Труды Печоро-Ильчского заповедника. Вып. 15. Сыктывкар, 2007. С. 28-47.
9. Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука. 1983. 196 с.
10. Austin, M.P., Belbin, L., Meyers, J.A., Doherty, M.D., Luoto, M. Evaluation of statistical models used for predicting plant species distributions: Role of artificial data and theory. Ecological Modelling, 199. 2006. P. 197-216.
11. Clements F.E. Plant succession: an analysis of the development of vegetation. Washington: Carnegie Institution of Washington. 1916. 512 p.
12. Ellenberg H. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa [Indicator values of plants in Central Europe] / H. Ellenberg, H.E. Weber, R. Dull, V/ Wirth, W. Werner, D. Paulisen // Scripta Geobotanica/ V.18. Verlag Erich Goltze KG, Güttingen, 1991. 248 s.
13. Guisan H. A., Zimmermann, N.E. Predictive habitat distribution models in ecology.- Ecological Modelling 135. 2000. P. 147-186.
14. Guisan H. A., Edwards, J.T.C., Hastie, T. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene.- Ecol. Modell. 157. 2002. P 89-100.
15. Hutchinson G.E. An Introduction to Population Ecology. New Haven and London Yale University Press. 1978. 260 p.
16. Korotkov V.N., Logofet D.O., Loreau M. 25 - Succession in mixed boreal forest of Russia: Markov models and non-Markov effects. Ecological Modelling, 142. 2001. P. 25-38.
17. Odum E.P. The strategy of ecosystem development. Science. 1969. 164. P. 262-270.
18. Yee T.W., Mitchell N.D. 1991. Generalized additive models in plant ecology. J. Veg. Science 2. 1991. P. 587-602.
19. Smirnova O., Zaugol'nova L., Khanina L., Braslavskaya T., Glukhova E. FORUS - database on geobotanic relevés of European Russian forests // Математическая биология и биоинформатика: I Международная конференция, г. Пушино, 9-15 октября 2006 г.: Доклады / Под ред. В.Д.Ляхно. М.: МАКС Пресс. 2006. С. 150-151.

**CHANGES OF CORRELATION OF REALIZED PLANT ECOLOGICAL NICHES IN
COMMUNITIES ALONG SUCCESSION**

© 2009 E. V. Zubkova

Institute of physicochemical and biological problems in soil science of the Russian academy of sciences
e-mail: elenazubkova@rambler.ru

It was shown using plant ecological scales that plant communities have different responses at the changes of factors along succession. Results are obtained using special software for processing of geobotanical descriptions and could be used for developing of the model of forest ground vegetation dynamics.

Keywords: forest, plant ecological scales, stenobiont species, succession.

УДК 51.001.572+573.22+581.524.3

МОДЕЛЬ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУКЦЕССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРАВОСМЕСЯХ

© 2009 Г.С. Розенберг

Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти;
e-mail: genarozenberg@yandex.ru

Предложена формализация сукцессии в травосмесях с учетом принципа плотной упаковки (дискретная геометрия) и моделей потенциальной эффективности сложных систем. Работоспособность модели демонстрируется на примере программированной сукцессии в условиях северной лесостепи, горно-лесной и степной зонах Башкортостана.

Ключевые слова: *сукцессия, травосмесь, плотная упаковка, экологическая ниша, модель потенциальной эффективности сложной системы.*

Теория – в наиболее общем случае, это совокупность обобщенных положений, образующих какую-либо науку или её раздел. Суть любой теории составляют *научные положения* – это выраженные в виде четких формулировок основные научные результаты-сведения (как ранее известные, так и вновь выдвинутые в процессе проведенного исследования), имеющие научное объяснение. Переход от более общих к конкретным и эмпирическим знаниям и составляет процедуру объяснения.

ОБЪЯСНЕНИЕ СОВОКУПНОСТИ ИЗВЕСТНЫХ ЭМПИРИЧЕСКИХ ФАКТОВ

В рамках теоретического объяснения можно выделить такие характеристики, как *реалистичность* (или, наоборот, степень фантастичности), *правдоподобие*, *контраст модельного мира и реальных систем*, *активность понимания* [1]. Особенно ярко проявляется взаимодействие этих характеристик, когда на «вход» в «понимающую систему» подается принципиально новое нестандартное выражение [2, с. 131]:

- новые примеры известных ситуаций, никогда еще данной системой не интерпретированных (это наиболее простой случай, для которого, собственно, и строится теория; в силу уникальности экосистем и *принципа множественности моделей сложных систем* [3, 4], модельные описания, например, структуры гидроэкосистем озера Байкал и Ладожского озера будут отличаться конкретными списками видов, коэффициентами и уравнениями их взаимодействия, но будут сходны в теоретико-методологическом плане построения самой модели-теории);
- новые термины, которые следует понимать в данном контексте (фундаментальные понятия

- конкретной науки – например, «экосистема», «ценопопуляция», «сукцессия» и др.);
- сочетания слов, обозначающие нечто неизвестное интерпретатору («экологическая ниша», «биологическое разнообразие», «инвазионные виды» и др.);
- новые события и явления (когда требуется оценить их правдоподобие; например, представления о компенсации [замещении] экологических факторов в рамках факториальной экологии или впервые наблюдаемые абиссальные сгущения жизни; см.: [4]);
- новые последовательности целенаправленных действий (когда следует оптимизировать, по возможности, воздействия [чаще всего, антропогенные] на конкретные экосистемы);
- новые метафоры и аналогии (например, представления о городах, как о, своего рода, «паразитах биосферы» [5], так как их первичная продукция ничтожно мала по сравнению с гигантской энергией, которая ими потребляется).

Особую ценность представляют научные выводы, приводящие к формулированию ранее неизвестных законов и закономерностей.

Наконец, в-третьих, процесс объяснения позволяет осуществлять предвидение и предсказание будущих явлений, ситуаций и процессов.

СУКЦЕССИЯ В ТРАВОСМЕСЯХ

Продемонстрирую возможности теоретического объяснения конкретной экологической ситуации на примере наблюдаемых закономерностей сукцессии в травосмесях [6-13].

Создание искусственных экосистем путем подбора и оптимизации их структуры – одно из актуальных направлений прикладной экологии. Например, создание травосмесей для газонов

разных типов [14]. Основное применение травосмесей, пожалуй, 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.); [15, с. 186]. Именно решению последней задачи на основе принципа программированной сукцессии [16] и были посвящены экспериментальные и теоретические работы башкирских геоботаников в 80-90-х годов. прошлого столетия [6-13]. От естественных кормовых угодий посевы трав отличаются более высокой продуктивностью, однако их «ахиллесовой пятой» является высокая степень засоряемости и, как следствие, небольшой срок жизни (при этом 4-5 лет вполне достаточно, если посев трав проведен в севообороте, но явно мало для искусственного сенокоса [16, 17]).

Реализация принципа программированной сукцессии проводилась в нескольких опытах, заложенных в 1977 г. в условиях северной лесостепи Башкирского Предуралья, в горно-лесной и степной зонах Зауралья [8]. Высеивались несколько видов трав в чистых посевах (коострец безостый [*Bromopsis inermis*] – К, овсяница луговая [*Festuca pratensis*] – О, клевер луговой [*Trifolium pratense*] – Кл, люцерна синегибридная [*Medicago sativa*] – Л, ежа сборная [*Dactylis glomerata*] – Е), а также смесь этих видов при четырех вариантах экологических воздействий

(контроль, полив, удобрение [$N_{60}P_{60}K_{60}$] и полив + удобрение): Кроме того, исследовались и некоторые двух- и трехвидовые травосмеси (с включением тимopheевки луговой [*Phleum pratense*] – Т). Итоговым параметром, по которому оценивалась «роль» того или иного вида в структуре травосмеси, стала оценка виолентности (по Л.Г. Раменскому [18], различают виды виоленты [от лат. *violens* – неистовый, склонный к насилию; вид-«лев», силовик, конкурент], пациенты [от лат. *patiens* – терпеливый; вид-«верблюд», выносливец, стресс-толерант] и эксплеренты [от лат. *explere* – наполняющий, заполняющий; вид-«шакал», рудерал]) – ранг долевого участия вида в составе сообщества (комплексная оценка онтогенетической, экологической и ценотической составляющих способности вида «захватывать» и «удерживать» экологическую нишу [18-22]).

Каковы же результаты этих наблюдений (совокупность известных эмпирических фактов)?

1. Урожайность «полных» травосмесей (КО-ЕКЛЛ [17, с. 46-47]; см. рис. 1) на протяжении всех лет наблюдений в условиях северной лесостепи демонстрирует достаточно стабильный уровень (примерно 40-45 ц/га на контроле и 60-70 ц/га при полном минеральном удобрении). Аналогичную картину имеем и для горно-лесной зоны (здесь урожайность в первые годы была сравнительно низкой – около 40 ц/га, а вот на шестом году использования поднялась до 100 ц/га [17, с. 50]). При этом сходный характер «холмов» и «впадин» на этих графиках свидетельствует о влиянии на урожайность климатических факторов (количества тепла и влаги в год учета, осенью накануне года учета и пр.).

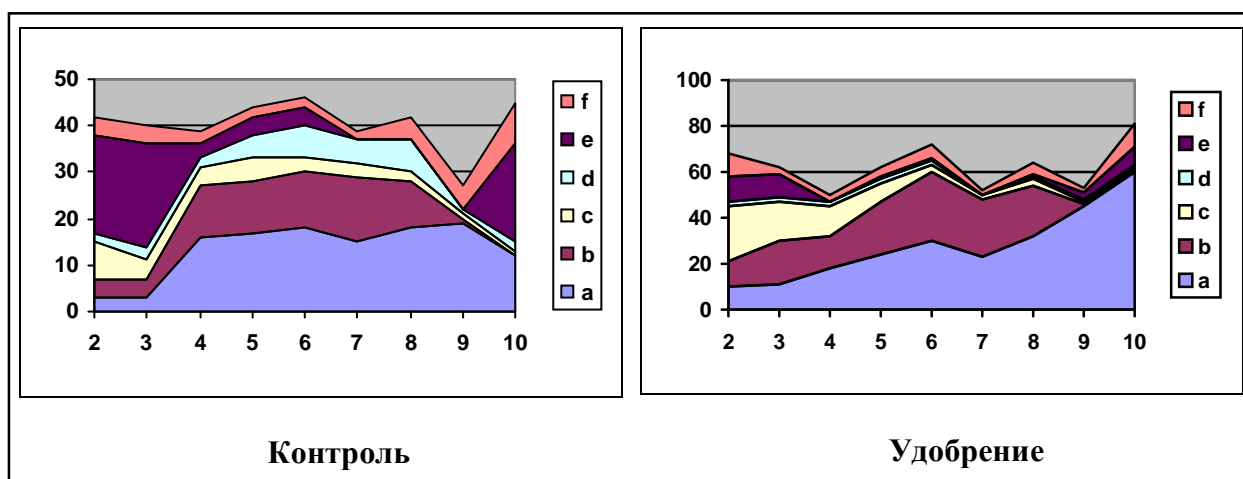


Рис. 1. Динамика урожайности многолетних трав в ходе сукцессии травосмеси КОЕКЛЛ: а - коострец безостый, б - ежа сборная, с - овсяница луговая, d - люцерна синегибридная, е - клевер луговой, f - внедрившиеся виды

2. Травосмеси, какое бы «оптимальное» (с субъективной точки зрения экспериментатора или подобранное в соответствии с некоторой

моделью) соотношение семян не было высеяно, с первого же года меняют свою структуру – «некоторые виды увеличивают свое участие в со-

ставе сообщества, другие уменьшают его» [17, с. 43]. Так, для контроля (в условиях северной лесостепи) по оценке виолентности (см. рис. 2) «выстраивается» следующая последовательность доминирования видов травосмесей:

- 2-3-й годы – клевер и ежа,
- 4-5-й годы – равно представлены все виды (кроме люцерны),
- 6-й и последующие годы – кострец, ежа и (в

зависимости от климатических условий) «на вторых ролях» люцерна;

на фоне удобрения:

- 2-й год – овсяница,
- 3-й год – ежа,
- 4-5-й годы – кострец + ежа,
- 6-й год – ежа,
- 7-й год – кострец + ежа,
- 8-й и последующие годы – кострец.

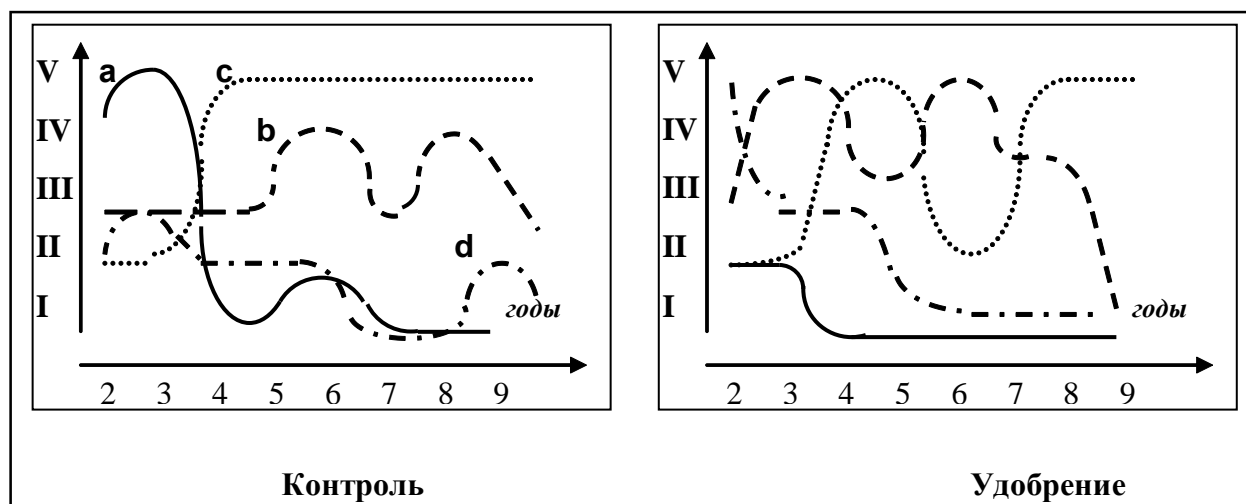


Рис. 2. Динамика виолентности многолетних трав в ходе сукцессии травосмеси КОЕКЛЛ: а - клевер луговой, б - ежа сборная, с - кострец безостый, д - овсяница луговая

3. Внесение удобрений влияет на тренды виолентности: оно способствует угнетению бобовых и усилению злаков. Так, на контроле (без удобрения) в условиях северной лесостепи виолентность клевера имеет высший ранг (V), а в варианте с удобрениями в эти же годы всего II; ежа сборная в первом случае только на шестой и восьмой год «поднимается» до IV ранга, а в варианте с удобрениями на третий и шестой год – до V ранга (см. рис. 2).

4. Степень благоприятности ценологических условий оказывает заметное влияние на развитие растений. В частности, на четвертом году жизни в условиях горно-лесной зоны (возрастание конкуренции в ряду *O – КОКл – КОЛ*) вес одного растения овсяницы (г) и другие статистические характеристики менялись следующим образом [8, с. 149-149]:

	<i>O</i>	<i>КОКл</i>	<i>КОЛ</i>
средний вес	11,7	8,0	5,7
дисперсия	32,38	30,80	26,76
коэффициент асимметрии	0	0,9	1,6

Иными словами, конкуренция ведет к уменьшению среднего веса особей и дисперсии и к увеличению асимметрии распределения (растет

число более мелких особей).

5. В сукцессии внедряющихся видов достаточно четко просматриваются два пика: первый из них наступает на следующий год после высева травосмеси и формируется за счет полевых сорняков (агрофитов), второй наблюдается в стадии распада травосмесей и связан с внедрением апофитных видов местной флоры [8, 17]. Причем для одновидовых и некоторых вариантов двухвидовых посевов высокая засоренность наблюдается на протяжении всего срока использования травосмеси

6. Виды травосмесей представлены в искусственных сообществах не идентичными, а заметно различающимися по весу и размерам особями, создавая тем самым своеобразную «экологическую очередь» (из «своих» более мелких или «чужих» видов) по оптимальному использованию того или иного ресурса [17].

Вся эта совокупность известных эмпирических фактов позволяет привлечь для объяснения данного явления следующие теоретические конструкции [4, 17, с. 34-35]: аксиому адаптированности, принципы «плотной упаковки» экологических ниш, фитоценологической замкнутости, различных типов эколого-ценологических стратегий, сукцессионного замещения (моде-

ли стимуляции, ингибирования, толерантности и нейтральности [23]), правило обязательности заполнения экологической ниши.

3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Формализовать эти теоретические представления можно с помощью следующей модели.

Задача о плотной упаковке – это один из разделов дискретной геометрии; эта задача, фактически, сводится к ответу на вопрос: насколько плотно можно уложить в пространстве большое количество одинаковых шаров [24-26 и др.]. Конфигурации плотной упаковки шаров изучаются уже многие годы, но об оценке плотности такой упаковки все еще можно говорить лишь в «приближении сверху» (на это, кстати, еще в 1972 г. указывал Р. Мак-Артур [27], который первым пытался использовать в экологии принцип плотной упаковки для моделирования структуры сообщества). Г. Минковский в 1905 г. доказал (см.: [25, с. 11]), что плотность упаковки δ_n для n -мерного пространства имеет такую оценку:

$$\delta_n \geq \left(\sum_{k=1}^{\infty} k^{-n} \right) / 2^{n-1};$$

для $n > 25$ (а именно такие варианты и интересны при экологической интерпретации), нашими отечественными математиками [28, 29] была получена следующая оценка:

$$\delta_n \leq 2^{-0,599n}.$$

Если плотность упаковки в n -мерном пространстве δ_n нормировать суммой $\sum_{n=1}^{\infty} \delta_n$, то фактически, получим вероятность того, что в n -мерном пространстве будет достигнута плотная упаковка.

Прежде чем перейти к обсуждению конкретной экосистемы (устойчивой травосмеси) рассмотрим некоторые общие принципы построения потенциально эффективной модели экосистемы (см.: [3]). Пусть имеется n -мерное пространство экологических факторов, и каждый вид занимает в нем свою экологическую нишу, которая описывается многомерной сферой (можно принять наличие только одного вида, особи которого занимают одинаковые ниши-сферы, различающиеся только пространственным расположением). В момент времени t каждая ниша-сфера с вероятностью p_t будет занята особью s вида (p_t в этом случае может рассматриваться как вероятность плотной упаковки). Тогда, $p_t(s, n)$ – вероятность встретить вид в момент времени t в n -мерной нише, а $p_t(0, n)$ – вероятность того, что ниша будет пуста; $p_t(s, n) + p_t(0, n) = 1$. Кроме

этих вероятностей, введем в рассмотрение условную вероятность $p_t(ss, n) = p_t(s, n) / [1 - p_t(0, n)]$ – вероятность того, что в нише появится еще одна особь s при условии, что ниша уже занята (формализуется процесс конкуренции – в данном контексте, внутривидовой). Каждый шаг моделирования ($t + 1$) состоит в том, что особи s с вероятностями $p_t(s, n)$ для «чистой» ниши и $p_t(ss, n)$ для уже занятой ниши занимают соответствующее пространство, стремясь «плотно упаковаться» в нем. Сообщество считается устойчиво функционирующим, если через T_0 шагов плотность упаковки вида в пространстве экологических ниш-сфер будет отличаться от теоретически возможной на некоторую заданную величину ε .

Функционирование травосмеси (система А) можно представить как процесс ежегодного «обмена» плотности упаковки видов в экологической нише (будем говорить о «потребляемом ресурсе» U ; еще раз напомним, что этот принцип – лишь модель, помогающая интерпретировать реальность) на устойчивость травосмеси («расходуемый ресурс» V). Тогда целью A_0 системы А 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 марковский процесс (для каждого фиксированного U система путем изменения своей структуры и поведения стремится максимизировать V), зададим вероятность $P(U,V)$ достижения системой А своей цели A_0 ; тогда в соответствии с формулой Байеса:

$$P(U, V) = P(U) \cdot P(V / U) = P(V) \cdot P(U / V).$$

Вероятность добиться плотной упаковки видов, в свете выше приведенных рассуждений будет

$$P(U) = \delta_n / \sum_n \delta_n.$$

По имеющимся данным [25, с. 11] легко рассчитать такое распределение вероятности (см. рис. 3).

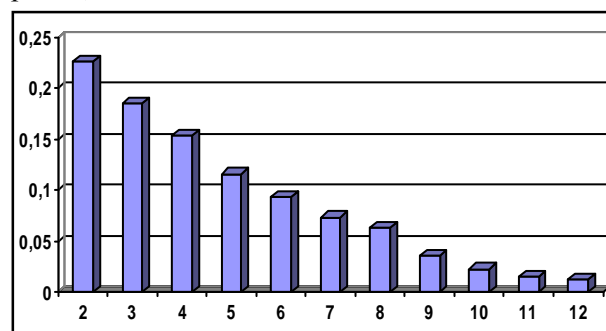


Рис. 3. Вероятность плотной упаковки сфер в зависимости от размерности пространства

Определим вероятность того, что система А будет устойчивой (просуществует $t > T_0$ единиц времени) при условии плотности упаковки $\delta_n [P(V/U)]$. Возможны два варианта развития событий.

Пусть в первом случае каждый последующий шаг в сукцессии экосистемы не зависит от предыдущего; тогда вероятность достигнуть устойчивого состояния через T_0 шагов будет

$$P_{уст}(s, n) = \prod_{i=1}^{T_0} p_i(s, n),$$

причем, для заданного n ,

$$|P(V/U) - p_{уст}(s, n)| < \varepsilon.$$

В случае, когда все p_i равны между собой,

$$P_{уст}(s, n) = p^{T_0}(s, n).$$

Естественная гипотеза о зависимости последующего состояния экосистемы от предшествующего (предшествующих) приводит во втором варианте, как уже указывалось, к модели, описываемой однородной цепью Маркова:

$$P_{t+1}(s, n) = \{p_t(s, n) \text{ или } p_t(ss, n)\} \cdot P_t,$$

где P_t – стохастическая однородная ($N \times N$)-матрица, где N – число ниш-сфер, с неотрицательными вероятностями перехода каждой ниши-сферы в состояние «заполненности» особью (или видом) s ; однородность матрицы соответствует тому, что $p_{ij}(\dots) = p_{ji}(\dots)$. Тогда,

$$P_{уст}(s, n) = \lim_{t \rightarrow \infty} p_t(s, n).$$

Фактически, этот предел существует, если существует предел для матрицы переходов

$$P_{lim} = \lim_{t \rightarrow \infty} P_t,$$

который соответствует стационарному процессу плотной упаковки особей (видов). Из свойств условной вероятности и определения однородной цепи Маркова, получаем, что матрица переходных вероятностей за n шагов однородной цепи Маркова есть n -я степень матрицы переходных вероятностей за 1 шаг.

Объединяя эти результаты, получаем вероятность $P(U, V)$ достижения системой А своей цели A_0 :

$$P(U, V) = (\delta_n / \sum_n \delta_n) \cdot \begin{cases} p_t^{T_0}(s, n) \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (P_t) = P_t^{T_0} \end{cases}.$$

Используя приведенную выше информацию по результатам экспериментов на основе *принципа запрограммированной сукцессии* [16] в условиях северной лесостепи Башкирского Предуралья и в горно-лесной и степной зонах Зауралья, продемонстрируем работоспособность предложенной модели. Пусть $t = 3$, $T_0 = 10$, $n = 2$ (будем рассматривать различия ниш для вариантов «контроль» и «удобрение», а по остальным осям будем считать их идентичными; см. рис. 1). Тогда

$$P(U) = \delta_n / \sum_n \delta_n = 0,2267.$$

Учитывая экспериментальный характер смены видов в травосмесях в вариантах «контроль» и «удобрения» (рис. 1 и 2) и некоторые экспертные оценки [6-13, 17], матрицы переходов P_t могут быть представлены в следующем виде (например, первая строка матрицы «контроль» интерпретируется следующим образом: костреца вытесняет овсяницу, люцерну и клевер с вероятностью 0,25 для каждого вида, и почти не может вытеснить ежу сборную – вероятность всего 0,05):

«контроль»						«удобрение»					
	К	Е	О	Л	Кл		К	Е	О	Л	Кл
$P_t =$	0,20	0,05	0,25	0,25	0,25	$P_t =$	0,80	0,1	0	0,1	0
К	0,05	0,25	0,20	0,20	0,30	К	0,1	0,70	0,1	0,1	0
Е	0,25	0,20	0,40	0,10	0,05	О	0	0,1	0,40	0,25	0,25
О	0,25	0,20	0,10	0,30	0,15	Л	0,1	0,1	0,25	0,30	0,25
Л	0,25	0,30	0,05	0,15	0,25	Кл	0	0	0,25	0,25	0,50
Кл											

Соответственно, получаем предел P_t при $t > \infty$:

«контроль»						«удобрение»					
	К	Е	О	Л	Кл		К	Е	О	Л	Кл
$\lim(P_t) =$	0,18	0,16	0,18	0,20	0,23	$\lim(P_t) =$	0,27	0,20	0,13	0,16	0,12
К	0,16	0,20	0,19	0,20	0,23	К	0,20	0,24	0,20	0,20	0,15
Е	0,18	0,19	0,18	0,19	0,19	О	0,13	0,20	0,22	0,21	0,23
О	0,20	0,20	0,19	0,18	0,16	Л	0,16	0,20	0,21	0,20	0,22
Л	0,23	0,23	0,19	0,16	0,19	Кл	0,12	0,15	0,23	0,22	0,21
Кл											

Даже поверхностный анализ этих, в значительной степени «искусственных» (как любая экспертная оценка), матриц позволяет говорить о том, что «со временем» происходит выравнивание распределений вероятностей занять пустующую нишу-сферу или вытеснить из нее другой вид. Интерпретируются (объясняются) и чуть заметные тенденции более «сильного давления» костреца и ежи на бобовые в «контроле» и ослабление такого «давления» в варианте «удобрения» (как известно, злаки и бобовые находятся в симбиотических отношениях – злаки способны образовывать кольца вокруг пятен бобовых, т. к. у границы с такими пятнами складываются условия улучшенного азотного питания [30-32]; в условиях внесения удобрений конкуренция за азот ослабевает).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демьянков В.З. Интерпретация, понимание и лингвистические аспекты их моделирования на ЭВМ. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989.
2. De Jong G.F., Waltz D.L. Understanding novel language // Computational Linguistics / Ed. by N. Cercone. Oxford (UK): Pergamon Press, 1983.
3. Флейшман Б.С. Основы системологии. М.: Радио и связь, 1982.
4. Розенберг Г.С., Мозговой Д.П., Гелашивили

- Д.Б. Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии. Самара: СНЦ РАН, 1999.
5. *Одум Ю.* Экология: в 2-х т. – М.: Мир, 1986.
 6. *Миркин Б.М., Антонова Н.Д., Горская Т.Г., Янтурин С.И.* К анализу поведения некоторых видов многолетних трав в различных экологических и ценоотических условиях // Ботан. журн. 1984. Т. 69, № 4.
 7. *Миркин Б.М., Горская Т.Г., Никулина Г.А., Розенберг Г.С.* О некоторых закономерностях дифференциации ценопопуляций культурных трав в ходе сукцессии травосмеси // Ботан. журн. 1986. Т. 71, № 5.
 8. *Горская Т.Г., Григорьев И.Н., Макулова Н.Н., Янтурин С.И.* О некоторых закономерностях сукцессии в травосмесях // Проблемы теоретической и экспериментальной фитоценологии. Уфа: БФАН СССР, 1987.
 9. *Миркин Б.М., Горская Т.Г., Григорьев И.Н. и др.* Опыт анализа сукцессий в травосмесях. Уфа: БФАН СССР, 1987.
 10. *Миркин Б.М., Горская Т.Г.* Теоретические аспекты анализа сукцессии в травосмесях // Биол. науки. – 1989. – № 10. – С. 18-27.
 11. *Усманов И.Ю., Мартынова А.В., Янтурин С.И.* Адаптивные стратегии растений на солончаках Южного Урала. Реакция на абиотический стресс // Экология. – 1989. – № 4. – С. 20-27.
 12. *Усманов И.Ю., Мартынова А.В., Усманова Н.Н., Янтурин С.И.* Адаптивные стратегии растений на солончаках Южного Урала. Распределение ресурсов в ценопопуляциях // Экология. 1991. № 1.
 13. *Миркин Б.М., Хасанова Г.Р., Абрамова Л.М., Суюндуков Я.Т.* Сукцессии в посевах многолетних трав: закономерности, вклад в биоразнообразие и устойчивость агроэкосистем // Бюл. МОИП, отд. биол. 2002. Т. 107, вып. 5.
 14. Газоны. Научные основы интродукции и использования газонных и почвопокровных растений / Под ред. Н.В. Цицина. М.: Наука, 1977.
 15. *Бажанов А.* Об искусственно возделываемых лугах // Что можно заимствовать у иностранцев по части земледелия. – Спб.: Тип. ?. Стелловскаго, 1863. – С. 175-222.
 16. *Миркин Б.М.* Теоретические основы современной фитоценологии. М.: Наука, 1985.
 17. *Миркин Б.М.* Экология растительности сельскохозяйственных земель Башкирии. Уфа: Башк. кн. изд-во, 1990.
 18. *Раменский Л.Г.* Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. М.: Сельхозгиз, 1938.
 19. *Работнов Т.А.* Изучение ценоотических популяций в целях выяснения «стратегии жизни» видов растений // Бюлл. МОИП, отд. биол. 1975. Т. 80, вып. 2.
 20. *Пианка Э.* Эволюционная экология. М.: Мир, 1981.
 21. *Миркин Б.М.* О типах эколого-ценоотических стратегий у растений // Журн. общ. биол. 1983. Т. 44, № 5.
 22. *Грайм Д.П.* Классификация растительности по соотношению стратегий // Теоретические проблемы экологии и эволюции (Четвертые Люблинские чтения). Тольятти: ИЭВБ РАН, 2005.
 23. *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.
 24. *Фейеш Том Л.* Расположения на плоскости, на сфере и в пространстве. М.: Физматгиз, 1958. 364 с.
 25. *Роджерс К.* Укладки и покрытия. М.: Мир, 1968. 134 с.
 26. *Слоэн Н.Д.А.* Упаковка шаров // В мире науки – Scientific American. 1984. № 3.
 27. *MacArthur R.H.* Geographical Ecology. Pattern in the Distribution of Species. N.Y.: Harper Row Publ., 1972.
 28. *Сидельников В.М.* Новые оценки для плотнейшей упаковки шаров в n -мерном евклидовом пространстве // Матем. сб. 1974. Т. 95 (137), № 1 (9).
 29. *Кабатянский Г.А., Левенштейн В.И.* О границах для упаковок на сфере и в пространстве // Проблемы передачи информации. 1978. Т. 14, № 1.
 30. *Работнов Т.А.* Влияние минеральных удобрений на луговые растения и луговые фитоценозы. М.: Наука, 1973.
 31. *Harper J.L.* Population Biology of Plants. L.: Acad. Press, 1977.
 32. *Turkington R., Harper J.L.* The growth distribution and neighbor relationships of *Trifolium repens* in a permanent pasture. I. Ordination, pattern and contact. II. Inter- and intra-specific contact // J. Ecol. 1979. V. 67, № 1.

**MODEL OF POTENTIAL EFFICIENCY
OF SUCCESSIONAL PROCESSES IN MIXED GRASS CROPS**

© 2009 G.S. Rozenberg

Institute of ecology of the Volga river basin of the Russian Academy of Science, Togliatti;
e-mail: genarozenberg@yandex.ru

Formalization of succession in mixed grass crops in view of a principle of dense packing (discrete geometry) and models of potential efficiency of complex systems is offered. Working capacity of model is shown on an example programmed succession in conditions of northern forest-steppe, mountain-wood and steppe zones of Bashkortostan.

Keywords: *succession, mixed grass crop, dense packing, an ecological niche, model of potential efficiency of complex system.*

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. Статья представляется в одном экземпляре, подписанном авторами, а также “л электронном виде на дискете (по адресу Студенческий переулок 3а, СНЦ РАН) или присылается по электронной почте (presidiin-i@ssc.smr.ru).
2. Текст статьи представляется в формате Microsoft Word (любая версия).
Объём статьи - до 10 стр. формата А4.
Поля - не менее 2-х см с каждой стороны, текст - кегль 12, одинарный межстрочный интервал. Отступ первой строки абзаца - 1 см.
Шрифты - Times New Roman, Arial, Symbol.
3. Допускается наличие таблиц, формул и рисунков по тексту. Рисунки размещаются как в самом тексте статьи, так и в отдельных файлах (формат - TIFF, режим - градиент серого или битовый, разрешение - не ниже 300 пикс/дюйм). Длина формул ограничена - 80 мм.
4. К тексту статьи прилагается направление организации, рецензия, акт экспертизы, сведения об авторах.

Образец оформления:

УДК 629.782.519.711

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАНЕВРЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРБИТАЛЬНОГО
САМОЛЕТА ПРИ СПУСКЕ В НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ**

© 2000 Ю.Н. Лазарев¹, Т.А. Баяндиин²

¹Самарский научный центр РАН

²Самарский государственный аэрокосмический университет

(аннотация, кегль 10)

(текст статьи)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лазарев Ю.Н.* Численный метод формирования многоканального управления движением аэрокосмических аппаратов в атмосфере // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. № 1.
2. *Федоренко Р.П.* Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978.

(название статьи, авторы, организации, аннотация - на английском языке)