



*Российская  
Академия Наук*

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



РОССИЙСКИЙ ФОНД  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ



АДМИНИСТРАЦИЯ Г. ПУЩИНО



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



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

# Материалы

## Четвертой Национальной научной конференции с международным участием



# Математическое моделирование в экологии

18-22 мая 2015 г.  
г. Пущино

УДК 57+51-7  
ББК 28в6  
М34

ISBN 978-5-904385-16-3

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

Математическое моделирование в экологии / Материалы Четвертой  
Национальной научной конференции с международным участием, 18-22 мая  
2015 г. – Пушкино, ИФХиБПП РАН, 2015.– 207 с.

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

© ИФХиБПП РАН, 2015

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## *Дорогие коллеги!*

Четвертая Национальная конференция с международным участием «Математическое моделирование в экологии» проводится Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук и Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом математических проблем биологии Российской академии наук 18-22 мая 2015 г. в г. Пущино Московской области на базе Пущинского научного центра РАН.

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

Оргкомитет получил более 100 материалов докладов из России, Киргизии, Омана, Польши, Финляндии, Японии.

Доклады на Конференции представлены по следующим секциям:

- Подходы и методы моделирования в экологии, системы моделей
- Моделирование циклов элементов в наземных экосистемах
- Моделирование экологической сложности, математические аспекты, статистическое моделирование
- Модели деревьев. Модели популяций и сообществ растений
- Модели популяций и сообществ микроорганизмов и животных
- Моделирование глобальных и региональных процессов
- Геоинформационные системы и дистанционные методы
- Математические модели в ландшафтоведении и почвоведении

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

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

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

<b>СОДЕРЖАНИЕ</b>	<b>5</b>
<b>MATHEMATICAL MODELS IN ECOHYDROLOGY OF HETEROGENEOUS SOIL SUBSTRATE IN ARID ENVIRONMENTS</b>	<b>10</b>
<i>Kacimov A., Al-Maktoumi A., Al-Ismaily S., Al-Busaidi H., Brown G., Obnosov Yu.</i>	
<b>MATHEMATICAL MODELING OF ANTHILL AS A NATURAL STRUCTURE OPTIMIZING MECHANICAL ENERGY OF FORAGING INSECTS AND HEAT TRANSFER</b>	<b>13</b>
<i>Kasimova R.G., Tishin D., Kacimov A., Obnosov Yu.</i>	
<b>RESOURCE PARTITIONING DURING INTRASPECIFIC COMPETITION\</b>	<b>14</b>
<i>Uchmański J.</i>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ</b>	<b>16</b>
<i>Абакумов А.И.</i>	
<b>ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ ДРЕВОСТОЯ НА ДИНАМИКУ РОСТА НАСАЖДЕНИЯ. МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ.</b>	<b>17</b>
<i>Агольцов А.Ю., Чумаченко С.И.</i>	
<b>УРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ПОЧВА-РАСТЕНИЕ В ФОРМЕ ФЕРХЮЛЬСТА- БАУЭРА</b>	<b>20</b>
<i>Александров В.Г.</i>	
<b>ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ РИСКА В МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДООХРАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ МЕГАПОЛИСА (НА ПРИМЕРЕ ЭКОСИСТЕМ ООПТ "ВОРОБЬЕВЫ ГОРЫ")</b>	<b>22</b>
<i>БарaboшкИна Т.А., Самарин Е.Н., Белютина В.С.</i>	
<b>ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ПРИ ГОРЕНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА МЕТОДОМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ</b>	<b>24</b>
<i>Барбин Н.М.</i>	
<b>МОДЕЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСУЩЕСТВИМОСТИ ПОРОГОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ В СИСТЕМЕ «БИОСФЕРА-КЛИМАТ»</b>	<b>26</b>
<i>Барцев С.И., Белолипецкий П.В., Иванова Ю.Д., Почекутов А.А., Салтыков М.Ю.</i>	
<b>РАЗНООБРАЗИЕ СУКЦЕССИЙ ПРИ ЗАРАСТАНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ НА ЮГЕ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ</b>	<b>28</b>
<i>Бобровский М.В., Ханина Л.Г., Шашков М.П., Иванова Н.И., Смирнов В.Э.</i>	
<b>ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ЗООПЛАНКТОНА УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ ПРИТОКА РАВНИННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ ЖАРКИХ ЛЕТ</b>	<b>30</b>
<i>Болотов С.Э.</i>	
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРАСТАНИЯ ВЫРУБОК В ЧЕРНИЧНИКАХ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ</b>	<b>33</b>
<i>Бутусов О.Б., Редикульцева Н.И., Никифорова О.П.</i>	
<b>ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СКОРОСТЕЙ ТРАНСФОРМАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ОПАДА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА</b>	<b>36</b>
<i>Быховец С.С., Ларионова А.А., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А.</i>	
<b>УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ДИНАМИКУ КОНЦЕНТРАЦИЙ СУБСТРАТА, ПРОМЕЖУТОЧНЫХ И КОНЕЧНЫХ ПРОДУКТОВ, СОДЕРЖАЩИХ <sup>13</sup>C, ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ ПУТЕЙ МЕТАНИЗАЦИИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ</b>	<b>38</b>
<i>Вавилин В.А., Рытов С.В.</i>	
<b>ПРЕИМУЩЕСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ ЭВОЛЮЦИОННО СТАБИЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ КОРМОВОГО ПОИСКА ЛЕСНОЙ КУНИЦЫ <i>MARTES MARTES</i> L.</b>	<b>40</b>
<i>Владимирова Э.Д., Морозов В.В.</i>	
<b>ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ БЛОК ГИС В ЦЕЛЯХ ГОРОДСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ</b>	<b>42</b>
<i>Воробьева Т.А., Голубева Е.И., Могосова Н.Н., Тульская Н.И.</i>	
<b>КАЧЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОПУЛЯЦИЙ ИКСОДОВОГО КЛЕЩА И ЕГО ПРОКОРМИТЕЛЕЙ</b>	<b>44</b>
<i>Вшивкова О.А., Хлебопрос Р.Г.</i>	
<b>МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЯВЛЕНИЯ ПРОТО- РАСТЕНИЯ</b>	<b>46</b>
<i>Галицкий В.В.</i>	

<b>ТРАЕКТОРИИ ЭВОЛЮЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ ПАРАМЕТРОВ СЕКЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЗЕЛЕННОЙ БИОМАССЫ КРОНЫ ЕЛИ</b>	<b>48</b>
<i>Галицкий В.В.</i>	
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА НА ВАСЮГАНСКОМ БОЛОТЕ, ИЗМЕРЕННОЙ АВТОМАТИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ "FLUX-NIES"</b>	<b>50</b>
<i>Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Краснов О.А., Фофанов А.В., Терентьева И.Е., Максютов Ш.Ш.</i>	
<b>ОЦЕНКА СКОРОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА РАСТЕНИЙ-ТОРФООБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ОЛИГОТРОФНОМ БОЛОТЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ</b>	<b>52</b>
<i>Головацкая Е.А.</i>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОСНЫ НА ТЕРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ БЕЛОГО МОРЯ</b>	<b>54</b>
<i>Голубева Е.И., Глухова Е.В.</i>	
<b>АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ТУНДРОВЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ</b>	<b>56</b>
<i>Голубятников Л.Л., Заров Е.А.</i>	
<b>АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ДРЕВОСТОЕВ МЕТОДАМИ СЛУЧАЙНЫХ ТОЧЕЧНЫХ ПОЛЕЙ</b>	<b>58</b>
<i>Грбарник П.Я., Алейников А.А., Ефименко А.С.</i>	
<b>САМООРГАНИЗАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА АРИДНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ "ВЕДЬМИНЫХ КРУГОВ" В НАМИБИИ</b>	<b>60</b>
<i>Грабовский В.И.</i>	
<b>О КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ ГЕОБОТАНИЧЕСКИХ ОПИСАНИЙ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКИМ ШКАЛАМ</b>	<b>63</b>
<i>Грохлина Т.И., Ханина Л.Г.</i>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В МЕЗО-ОЛИГОТРОФНОЙ ТОПЯНОЙ БОЛОТНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ</b>	<b>65</b>
<i>Дюкарев Е.А.</i>	
<b>ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СОВРЕМЕННУЮ ГОРИМОСТЬ ЛЕСОВ (НА ПРИМЕРЕ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ)</b>	<b>67</b>
<i>Жаринов С.Н.</i>	
<b>МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ В ПРОСТЕЙШИХ МОДЕЛЯХ ЭВОЛЮЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОПУЛЯЦИЙ</b>	<b>69</b>
<i>Жданова О.Л., Фрисман Е.Я.</i>	
<b>ДВА ПОДХОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНКУРЕНТНЫХ ОТНОШЕНИЙ ДЕРЕВЬЕВ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО</b>	<b>71</b>
<i>Жиренко Н.Г.</i>	
<b>СВЯЗЬ ПЕРВИЧНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА С ФИТОМАССОЙ ДЛЯ БИОМОВ ЕВРАЗИИ И ЕЕ РОЛЬ В МОДЕЛЯХ БИОТИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА В ЭКОСИСТЕМАХ ПОЛЯРНОГО ПОЯСА</b>	<b>74</b>
<i>Завалишин Н.Н.</i>	
<b>ДИФфуЗИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И СТРУКТУРЫ ТЬЮРИНГА В МОДЕЛЯХ ТРОФИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ТИПА «РЕСУРС-ПОТРЕБИТЕЛЬ» С ТАКСИСОМ</b>	<b>78</b>
<i>Завалишин Н.Н.</i>	
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБМЕННОГО ФОРМАТА DARWIN CORE ДЛЯ СОЗДАНИЯ WEB-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ РЕДКИХ ВИДОВ, СОВМЕСТИМОЙ С МЕЖДУНАРОДНОЙ БАЗОЙ ДАННЫХ GBIF</b>	<b>82</b>
<i>Иванова Н.В., Шашков М.П.</i>	
<b>ЭКОТОН КАК ЗОНА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВТОРОГО РОДА</b>	<b>84</b>
<i>Иванова Ю.Д., Суховольский В.Г.</i>	
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ПОТОКИ CO<sub>2</sub></b>	<b>87</b>
<i>Иванов Д.Г., Авилов В.К., Курбатова Ю.А.</i>	
<b>ВЫЯВЛЕНИЕ СУКЦЕССИОННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ ПРИ ПОМОЩИ ФИТОИНДИКАЦИОННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ШКАЛ</b>	<b>89</b>
<i>Кантор Г.Я., Домнина Е.А.</i>	

<b>ВЫДЕЛЕНИЕ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПО ВОССТАНОВЛЕННОЙ КРИВОЙ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ NDVI (НА ОСНОВЕ ДАННЫХ MODIS)</b>	91
<i>Колесов Д.А., Филиппов И.В.</i>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СМЕШАННЫХ ДРЕВЕСНЫХ СООБЩЕСТВ</b>	93
<i>Колобов А.Н.</i>	
<b>МОДЕЛЬ ГУМИФИКАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ ROMUL_NUM С УЧЕТОМ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЧВЕННОЙ ФАУНЫ</b>	95
<i>Комаров А.С., Чертов О.Г., Быховец С.С., Шаиков М.П., Фролов П.В.</i>	
<b>КЛАСТЕРИЗАЦИЯ В МОДЕЛЯХ МЕТАПОПУЛЯЦИЙ</b>	98
<i>Кулаков М.П.</i>	
<b>ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ ОРГАНИЧЕСКИМИ АЗОТСОДЕРЖАЩИМИ КОМПОНЕНТАМИ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА</b>	100
<i>Курочкина Г.Н.</i>	
<b>ПЕРЕСТРОЙКА СТРУКТУРЫ СООБЩЕСТВА МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ – ПРЕДВЕСТНИК ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ?</b>	103
<i>Кинясев И.А., Давыдова Ю.А.</i>	
<b>АНАЛИЗ ДАННЫХ С МЕЗООЛИГОТРОФНОГО БОЛОТА МЭДЛА-ПЭВ-НИОР</b>	105
<i>Лапина Л.Э., Михайлов О.А., Успенский И.М.</i>	
<b>ДВА ПОДХОДА К ОПИСАНИЮ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ.</b>	107
<i>Левашова Н.Т., Мухартова Ю.В., Ольчев А.В.</i>	
<b>ДИАЛЕКТИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МОДЕЛИ: ПОУЧИТЕЛЬНАЯ ИСТОРИЯ ИЗ ЖИЗНИ ВЕЙНИКОВ</b>	109
<i>Логофет Д.О., Уланова Н.Г.</i>	
<b>ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ПОИСКА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ТРАЕКТОРИЙ ОДНОМЕРНЫХ УНИМОДАЛЬНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ</b>	112
<i>Люлякин О.П., Саранча Д.А., Трапезев Р.В., Юрезанская Ю.С.</i>	
<b>ИМИТАЦИОННАЯ MSIR МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ АКТИВНОСТИ ПРИРОДНОГО ОЧАГА ХАНТАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ</b>	114
<i>Маклаков К.В., Кинясев И.А., Жигальский О.А.</i>	
<b>ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОСТПИРОГЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ПОЧВ</b>	116
<i>Максимова Е.Ю., Абакумов Е.В., Надпорожская М.А.</i>	
<b>ДОСТУПНЫЙ АЗОТ КАК ФАКТОР ЭКОСИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ В ФАЗЕ КЛИМАКСА НА ЛЕСНОМ ОЛИГОТРОФНОМ БОЛОТЕ</b>	119
<i>Маслов А.А.</i>	
<b>АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ ПО ДИНАМИКЕ ФИТОПЛАНКТОНА НАРОЧАНСКИХ ОЗЁР: ХАОС ВДАЛИ ОТ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ ХАОСОМ И СТРОГОЙ УПОРЯДОЧЕННОСТЬЮ</b>	121
<i>Медвинский А.Б.</i>	
<b>ВЛИЯНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЗАСУХИ НА ПОДЗЕМНЫЙ ТРАНСПОРТ УГЛЕРОДА ПОД РАЗНЫМИ ДРЕВЕСНЫМИ ПОРОДАМИ</b>	122
<i>Меняйло О.В., Матвиенко А.И.</i>	
<b>ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭМИССИИ CO<sub>2</sub> С ПОВЕРХНОСТИ СФАГНУМА В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОИЗРАСТАНИЯ</b>	124
<i>Молчанов А.Г.</i>	
<b>ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И РЕЛЬЕФА НА ПЕРЕНОС CO<sub>2</sub> И МАЛЫХ ГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ</b>	127
<i>Мухартова Ю.В., Ольчев А.В., Рыжова М.С., Левашова Н.Т.</i>	
<b>ПРОБЛЕМА НОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ АЗОТА ЛЕСНЫХ ПОЧВ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ: ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ – ПОДЗОЛЫ НА КВАРЦЕВЫХ ПЕСКАХ</b>	129
<i>Надпорожская М.А.</i>	
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛОКАЛЬНОЙ ОДНОРОДНОЙ ПОПУЛЯЦИИ С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ</b>	131
<i>Неверова Г.П., Фрисман Е.Я.</i>	

<b>ОЦЕНКА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ МАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ СУКЦЕССИИ</b>	<b>133</b>
<i>Немчинова А.В.</i>	
<b>СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ЮГО-ЗАПАДЕ ВАЛДАЙСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ</b>	<b>134</b>
<i>Овсянников Т.А., Газарян В.А., Курбатова Ю.А., Шапкина Н.Е.</i>	
<b>ДИНАМИКА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ОСИНОВОГО ДРЕВОСТОЯ НА ПОСТОЯННОЙ ПРОБНОЙ ПЛОЩАДИ В ЧЕРНЕВОМ ПОЯСЕ ЗАПАДНОГО САЯНА</b>	<b>137</b>
<i>Овчинникова Н.Ф., Овчинников А.Е.</i>	
<b>ОЦЕНКА ПЕРВИЧНОЙ ВАЛОВОЙ И НЕТТО ПРОДУКЦИИ ЛЕСОВ ПО ВЕЛИЧИНЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ РАДИАЦИИ (ФАР)</b>	<b>139</b>
<i>Ольчев А.В.</i>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ ОСАДКА В ПОЧВЕННОМ ПРОФИЛЕ</b>	<b>141</b>
<i>Остроумов В. Е.</i>	
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ СЪЕМКИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ</b>	<b>143</b>
<i>Охрименко М.А., Алейников А.А., Грабарник П.Я., Иванова Н.В., Шанин В.Н., Шашков М.П.</i>	
<b>РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТЕНИЕВОДСТВА К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В XX-XXI ВЕКЕ В РОССИИ</b>	<b>145</b>
<i>Павлова В.Н.</i>	
<b>МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ДЛЯ УСЛОВИЙ ЗАСУШЛИВОГО КЛИМАТА: АДАПТИВНЫЙ ПОДХОД</b>	<b>148</b>
<i>Павлова В.Н., Варчева С.Е.</i>	
<b>УЧЁТ КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ В ОПТИМИЗАЦИИ АГРОНОМИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ ИГР</b>	<b>151</b>
<i>Перевертин К.А.</i>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ РЕЧНОГО БОБРА (<i>CASTOR FIBER L.</i>) В СУБОПТИМАЛЬНЫХ И ПЕССИМАЛЬНЫХ МЕСТООБИТАНИЯХ ЭКОСИСТЕМ МАЛЫХ РЕК</b>	<b>153</b>
<i>Петросян В.Г., Голубков В.В., Завьялов Н.А., Горайнова З.И., Омельченко А.В., Бессонов С.А., Дергунова Н.Н., Хляп Л.А.</i>	
<b>АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ КРИТЕРИЕВ СОГЛАСИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА БИОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА BIOSYSTEM OFFICE</b>	<b>156</b>
<i>Петросян В.Г., Бессонов С.А., Дергунова Н.Н., Омельченко А.В.</i>	
<b>ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИ ЭКОСИСТЕМЫ ЗОНЫ АПВЕЛЛИНГА РАЙОНА ЦЕНТРАЛЬНО-ВОСТОЧНОЙ АТЛАНТИКИ</b>	<b>159</b>
<i>Подгорный К.А.</i>	
<b>ДИНАМИКА ЗАПАСОВ И ПУЛА ДОСТУПНОГО АЗОТА В СОСНЯКАХ СЕРЕБРЯНОБОРСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА: МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ С УЧЕТОМ ВКЛАДА АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ</b>	<b>161</b>
<i>Припутина И.В., Шанин В.Н., Комаров А.С.</i>	
<b>ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОХОТНИЧЬИХ ЖИВОТНЫХ ЕВРЕЙСКОЙ АВТОНОМНОЙ ОБЛАСТИ</b>	<b>163</b>
<i>Ревуцкая О.Л., Фетисов Д.М., Фрисман Е.Я.</i>	
<b>РАЗВИТИЕ МАТРИЧНОЙ МОДЕЛИ ПОПУЛЯЦИИ БЕЛОПЛЕЧЕГО ОРЛАНА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ 2008-2014 ГГ.</b>	<b>165</b>
<i>Романов М.С., Мастеров В.Б.</i>	
<b>ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗА АНТРОПОГЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ ТУВЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС</b>	<b>167</b>
<i>Самбуу А.Д., Аюнова О.Д.</i>	
<b>ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЛАНДШАФТНОГО ПОКРОВА ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РУССКОЙ РАВНИНЫ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СПУТНИКА MODIS</b>	<b>169</b>
<i>Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г.</i>	
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВЕ ПРИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИИ</b>	<b>171</b>
<i>Семенова Н.Н., Орлова Е.Е., Орлова Н.Е.</i>	

<b>КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ХИМИЧЕСКОМ МЕТОДЕ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ</b>	<b>173</b>
<i>Семенова Н.Н., Сухорученко Г.И., Волгарев С.А., Долженко О.В., Зацюрский А.С.</i>	
<b>ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И КРАТНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ БИООТХОДОВ НА МОЛОЧНЫХ ФЕРМАХ</b>	<b>176</b>
<i>Сидорова В.Ю.</i>	
<b>СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ РАЗНООБРАЗИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ ГЕОБОТАНИЧЕСКИХ ДАННЫХ</b>	<b>178</b>
<i>Смирнов В.Э., Ханина Л.Г.</i>	
<b>ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ: ARMA-МОДЕЛИ</b>	<b>180</b>
<i>Суховольский В.Г., Тарасова О.В.</i>	
<b>КАРТА БОЛОТ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭМИССИИ МЕТАНА</b>	<b>182</b>
<i>Терентьева И.Е., Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Максюттов Ш.Ш.</i>	
<b>РАЗВИТИЕ КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА В ХОДЕ ЗАЛЕЖНОЙ СУКЦЕССИИ</b>	<b>184</b>
<i>Титлянова А.А., Самбуу А.Д., Шибарева С.В.</i>	
<b>МНОГОПОДХОДНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИМБИОТИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИ СИМБИОТИЧЕСКОЙ АЗОТФИКСАЦИИ</b>	<b>187</b>
<i>Топаж А.Г., Абрамова А.В.</i>	
<b>АНАЛИЗ БИОФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЧИСЛЕННОСТИ ЛЕММИНГОВ С ПОМОЩЬЮ НАБОРА ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ МОДЕЛЕЙ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ДЕТАЛИЗАЦИИ</b>	<b>189</b>
<i>Трацеев Р.В., Саранча Д.А.</i>	
<b>ПОПЫТКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АНСАМБЛЯ ПРОСТЕЙШИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ОДНОЙ ЗАДАЧЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ</b>	<b>191</b>
<i>Филиппов И.В., Глаголев М.В., Сабреков А.Ф.</i>	
<b>ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ РАСТЕНИЙ РАЗНЫХ ЖИЗНЕННЫХ ФОРМ – МОДЕЛЬ CAMPUS-S</b>	<b>193</b>
<i>Фролов П.В., Комаров А.С., Зубкова Е.В.</i>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ЗАНЯТОГО НАСЕЛЕНИЯ: АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД</b>	<b>195</b>
<i>Хавинсон М.Ю., Колобов А.Н.</i>	
<b>АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ЛЕСОВ СРЕДСТВАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ</b>	<b>197</b>
<i>Шанин В.Н., Комаров А.С., Mäkirä R.</i>	
<b>ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ КОНКУРЕНЦИИ В СМЕШАННЫХ ДРЕВОСТОЯХ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ С АДАПТИВНЫМ АЛГОРИТМОМ</b>	<b>199</b>
<i>Шанин В.Н., Шашков М.П., Иванова Н.В., Рочева Л.К., Москаленко С.В., Бурнашева Э.Р., Комаров А.С., Mäkirä R.</i>	
<b>ИЗМЕНЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ ПОД ПЛАНТАЦИЯМИ С БЫСТРОРАСТУЩИМИ ФОРМАМИ БЕРЕЗЫ</b>	<b>201</b>
<i>Шанин В.Н., Комаров А.С., Шестибратов К.А.</i>	
<b>МАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ДОЖДЕВОГО ЧЕРВЯ <i>APORRECTODEA CALIGINOSA</i></b>	<b>203</b>
<i>Шашков М.П., Стриганова Б.Р., Комаров А.С., Фролов П.В.</i>	
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ И КРУГОВОРОТА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И АЗОТА В ПОПУЛЯЦИЯХ КУСТАРНИЧКОВ</b>	<b>204</b>
<i>Комаров А.С., Зубкова Е.В., Фролов П.В., Быховец С.С.</i>	
<b>ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ И СООБЩЕСТВ КУСТАРНИЧКОВ В ТЕРМИНАХ ОНТОГЕНЕТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ</b>	<b>206</b>
<i>Зубкова Е.В., Фролов П.В., Комаров А.С.</i>	

## MATHEMATICAL MODELS IN ECOHYDROLOGY OF HETEROGENEOUS SOIL SUBSTRATE IN ARID ENVIRONMENTS

Kacimov<sup>1</sup> A., Al-Maktoumi<sup>1</sup> A., Al-Ismaily<sup>1</sup> S., Al-Busaidi<sup>1</sup> H., Brown<sup>2</sup> G., Obnosov<sup>3</sup> Yu.

<sup>1</sup> Sultan Qaboos University, Oman, [anvar@squ.edu.om](mailto:anvar@squ.edu.om)

<sup>2</sup> Kuwait National Focal Point, Public Authority for Agriculture and Environment, Kuwait

<sup>3</sup> Kazan Federal University, Russia

Since the Liebig-Liebscher concepts of limiting factors and extremum-tracking interventions (Spiertz, 2014) the rainfed or irrigated agriculture and ecohydrology of natural plants and their communities paved the road to modeling by Pontryagin's optimal control theory (Pontryagin et al., 1962). Either controlled environment of green houses or climate-determined ambient conditions (Adams, 2010) are mathematically formulated in terms of an objective functional, governing PDE or ODE, constraints, and controls, which are often of the bang-bang type (irrigation with a constant intensity or no watering).

In arid tropics such as Oman, the hostile atmospheric conditions (Brown, 1974, Lambers et al., 2008, Lipiec et al., 2013) cause a severe water deficit and heat stress in the soil substrate as a medium of plant roots. The main impeding factors are the soil volumetric moisture content,  $\theta$ , and temperature,  $T$  ( $C^0$ ), which attain in summer (April-October) a minimum of 3-5 % and peak of  $70^0+C$ , respectively, if topsoils are unirrigated and unshaded. With the solar factor of 900-1000  $W/m^2$  in June greenhouses and shade-houses are constructed in the Gulf to reduce radiation-temperature and screen insects from green-cool-wet spots.

As Noy-Meir (1973) elucidated and, later, a new discipline of hydropedology and hydroecology (see e.g. Lin et al., 2006, Porporato and Rodriguez-Iturbe, 2002, Zalewski, 2000) elaborated, the substrate's textural heterogeneity is vital for retaining the precious moisture from escaping through two unwanted and spontaneously occurring paths of the hydrological cycle: descending percolation to the water table (in Oman often tens of meters deep and, correspondingly, accessible to woody phreatophytes like acacia or Ghaf tree only) or evaporation, which is even more treacherous to the plants because of secondary salinization of the topsoil (especially in the so-called *sabkha* zones of the Gulf). Metaphysically, in desert soils gravity (drainage) and capillarity (evaporation) play against the plants. Correspondingly, in ecological modeling we aim at understanding of how conversion of these two enemies into allies can be attained, in the battle for higher water use efficiency, crop production and conservation of natural desert vegetation. In this review, we focus on one type of ecological optimal control: the coefficients (heterogeneity spatial distribution) in the governing PDE or ODE (see e.g. Lurie, 1993), rather than control of the boundary conditions or sink-source terms in the governing equation.

A laminated structure of the vadose zone, or the "profiles" with a sequence of "horizons" are basic concepts (models) in soil sciences. The textural layering serves as a natural hydraulic impedance to both downward and upward moisture motion. This is well known in groundwater hydrology and reservoir engineering where, by default, an aquifer or formation anisotropy for a one phase flow along a hydrostratigraphic unit or pay is assumed to be about order of magnitude larger than across. In vadose zone hydrology and hydropedology, the situation is more complicated because of unsaturated or two-phase flow conditions, capillarity and water uptake by roots. In the vernacular of soil physics, the impedance of layering is coined in the term of "capillary barrier", which stops or diverts water motion at the interface between a relatively fine porous material (e.g. silt) and a relatively coarse one (e.g. gravel), provided the capillary pressure (or flux of  $\theta$ ) are lower than a certain threshold value. A complex and sometimes counter-intuitive topology of moisture flow, affected by capillary barriers including subterranean holes, is analytically modeled by Kacimov (2000, 2003, 2007).

Natural desert vegetation adapts to high  $T$  and low  $\theta$  by root hunting for moisture detained in a layered subsurface (Noy-Meir, 1973). Smart interception of descending  $\theta$  fluxes (Kacimov and Obnosov, 2013) in some desert ecosystems makes even cloud forests sustainable in an otherwise savanna-generating climate. Our recent discoveries in tens of pedons of a reservoir bed of a dam in Oman give evidence that not only layered or aggregated soil structure retains moisture but a macrostructure of silt blocks (of sizes of 20x20x30 cm) sandwiching large fractures (of apertures of 2-3 cm) have even stronger effect of conserving water at the depths of 1-2 m (see Al-Ismaily et al., 2013, 2014 a,b, Al-Maktoumi et al., 2014), with an effective counter-evaporation and counter-drainage capillary barriers. This “smartly designed”, essentially 3-D mosaic of cascades of blocks and fractures is similar to the well-known double-permeable fractured carbonate rock, where the Barenblatt-Kazemi model is a standard tool in reservoir engineering. This analogy is not only in the structure of porous-fractured rocks and “smart” soils. There is fascinating commonality between two-phase flows in the so-called gas-oil gravity drainage of fractured rock and imbibition-drainage of rainwater into a heterogeneous soil (Kacimov et al., 2010). On a pore-level scale, the retention of a liquid at a textural interface is also evident from models involving double-menisci, Zunker’s “Winlelwasser” and sessile droplets (Finn, 1983, Kacimov and Kayumov, 2002, Kacimov et al., 2014, Zunker, 2010).

Al-Ismaily et al., (2013, 2014 a,b) and Al-Maktoumi et al., (2014) studied hydroecology of woody species (e.g. castor oil plants) and cultivars (e.g. Rhodes grass) on the “smartly designed” substrate and discovered that the moisture content in engineered soils of this type is amazingly high, despite a continuous transpiration by the plant roots. This “smart design” was implemented and supplemented by a “smart capillary siphoning” technique and showed an excellent water use efficiency in urban landscaping and design of green roofs as passive thermal insulation solutions in the Gulf (Kacimov et al., 2010, 2014). For ornamental plants adjacent to building envelopes, the objective function of agro-engineering optimization includes the leaf-area index rather than biomass or yield in the models using the Liebig-Liebscher criteria.

Similarly to the nontrivial structure of the soil substrate, distinct ecotones and unique wild plant communities were discovered in the same study area of an ephemeral reservoir of a water retention dam (Kacimov and Brown, 2015). The corresponding band of perennial vegetation persistently emerges in the riparian zone of the dam (see Naiman et al. 2005 for the details ecology of riparian zones in humid climates) but as in “smartly designed” substrate of flat areas, the conservation of seeped reservoir water and thermal insulation are controlled by the edaphic factor, *viz.* the embankment soil, rip-rap and clayey dam core.

In our presentation, we overview mathematical models of moisture dynamics and conductive heat transfer in heterogeneous (structured) soils, which are used in ecohydrological projects carried out in Oman. The models range from a pore to sub-catchment scale and predict 2-, 3-D, steady and transient fields of  $\theta$  and  $T$ . Linear and non-linear PDEs and ODEs (linear and non-linear diffusion equation, in particular, the Boussinesq equation, Richards’ equation, modified Helmholtz’ equation, advective dispersion equation, Washburn-Lukas, Green-Ampt-Youngs and Averyanov’s equations) are involved (see also Arkhangelskaya, Physics..., 1963, Warrick, 2003). All models are realized in computer algebra packages of *Mathematica* (Wolfram, 1991). For each project, photogalleries illustrating stages of plant development are presented.

*This work was supported by SQU, project IG/AGR/SWAE/14/02, and USAID, grant AID-OAA-TO-11-00049 (project code 1001626-104).*

## References

- Adams J.M. Vegetation–climate interaction: how vegetation makes the global environment. Chichester: Springer, 2010.
- Al-Ismaily S., Al-Maktoumi A., Kacimov A., Al-Saqri S., Al-Busaidi H. The impact of a recharge dam on the hydrogeology of arid zone soils in Oman: anthropogenic formation factor// J. Hydrological Engineering, ASCE – 2014.- 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000886.

- Al-Ismaily S.S., Al-Maktoumi A.K., Kacimov A.R., Al-Saqri S.M, Al-Busaidi H.A., Al-Haddabi M.H. A morphed block-crack preferential sedimentation: A smart design and evolution in nature// *Hydrological Sciences J.* - 2013. - 58 (8). - Pp. 1779-1788.
- Al-Maktoumi A., Al-Ismaily S., Kacimov A., Al-Busaidi H., Al-Saqri S., and Al-Haddabi M. 2014. Soil substrate as a cascade of capillary barriers for conserving water in a desert environment: Lessons learned from arid nature.// *J. Arid Land.* -2014. - doi: 10.1007/s40333-014-0068-7.
- Arkhangelskaya T.A. Temperature regime of complex soil cover. Moscow: Geos Press (in Russian), 2012.
- Brown Jr G.W. Desert biology, Vol. II. New York: Academic Press, 1974.
- Finn R. Equilibrium capillary surfaces. New York: Springer-Verlag, 1986.
- Kacimov A.R. Circular isobaric cavity in descending unsaturated flow// *J. Irrigation and Drainage Engrg. (ASCE).*- 2000. – 126(3). – Pp. 172-178.
- Kacimov A.R. Unsaturated quasi-linear flow analysis in V-shaped domains.// *J. Hydrology.* – 2003. – 279. –Pp. 70-82.
- Kacimov A.R. Dipole-generated unsaturated flow in Gardner soils. // *Vadose Zone J.* – 2007. – 6. – Pp. 168-174.
- Kacimov A, Al-Issai J., Al-Amri M., Al-Balushi M. Green-roof project in Oman: capillary siphoning as a novel and thrifty irrigation technique. Proceedings of the 4rd International Conference on Water Resources and Arid Environments, Riyadh, Saudi Arabia, 6-8 Dec, 2010. - Pp. 479-487.
- Kacimov A.R., Al-Ismaily S., Al-Maktoumi A., Al-Busaidi H., Kasimova, R.G. 2014. Micro-climate control by shading, impeded heat conduction and evapotranspirative cooling of mini-gardens in arid environment: from Muscatese window to smart design of soil substrate. Abstracts of International Conference: “Aspects of Islamic gardens: Multi-meanings of paradise”, 10-12 October 2014, Kavala, Greece <http://islamic-gardens.imaret.org.gr/> .
- Kacimov A.R., Al-Jabri S., Schoofs S. and Suyan S. Commonality between MAR water drainage and gas oil gravity drainage: the case of a fractured rock. Proceedings of: ISMAR7 “The 7th Annual International Symposium on Managed Aquifer Recharge”, Abu Dhabi, 9-13 October 2010.
- Kacimov A.R., Brown G. A transient phreatic surface mound, evidenced by a strip of vegetation in an earth dam shoulder: the Lembke-Youngs reductionist model revisited// *Hydrological Sciences J.* – 2015. – 60(2). –Pp. 361-378.
- Kacimov A.R., Kayumov I.R. Viscous flow through straight pore channels// *J. Porous Media.* – 2002. - 5(3). – Pp. 199-208.
- Kacimov A., Maklakov D.V., Kayumov I.R. Statics and dynamics of liquids in non-circular pores: analytical techniques revisited. Shell Centennial Conference: “Rock & Fluid Physics: Academic and Industrial Perspectives”, Shell Technology Centre, Amsterdam, Holland, September 15-18, 2014.
- Kacimov A.R., Obnosov Yu.V. Pseudo-hysteretic double-front hiatus-stage soil water parcels supplying a plant-root continuum: the Green-Ampt-Youngs model revisited. // *Hydrological Sciences J.* - 2013. - 58(1). - Pp. 237-248 DOI:10.1080/02626667.2012.743028.
- Lipiec J., Doussan C., Nosalewicz A., Kondracka K. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review.// *International Agrophysics.* -2013. - 27(4). – Pp. 463–477.
- Lambers H., Stuart Chapin III F., Pons T.L. Plant physiological ecology. New York: Springer, 2008.
- Lin H. *Hydropedology: synergistic integration of soil science and hydrology.* Oxford: Elsevier, 2012.
- Lurie K.A. Applied optimal control of distributed systems. New York: Plenum, 1993.
- Naiman R.J., Decamps H., McClain M.E. Riparia: ecology, conservation and management of streamside communities. Amsterdam: Elsevier, 2005.
- Noy-Meir I. Desert ecosystems: environment and producers. // *Annual Review of Ecology and Systematics.* -1973. - 4. – Pp. 25–51.
- Physics of plant environment. Ed. by W.R. Van Wijk. Amsterdam, 1963.
- Pontryagin L.S., Boltyanskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mischenko E.F. The mathematical theory of optimal processes. New York: Wiley, 1962.
- Porporato A., Rodriguez-Iturbe I., 2002. Ecohydrology - a challenging multidisciplinary research perspective.// *Hydrological Sciences J.*- 2002. - 47 (5). –Pp. 811–821.
- Spiertz H. Agricultural sciences in transition from 1800 to 2020: Exploring knowledge and creating impact.// *European J. of Agronomy.* -2014. – 59. – Pp. 96–106.
- Warrick A.W. Soil water dynamics. New York: Oxford University Press, 2003.
- Wolfram S. Mathematica. A system for doing mathematics by computer. Redwood City: Addison-Wesley, 1991.
- Zalewski M. Ecohydrology—the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. Guest Editorial.// *Ecological Engineering.* – 2000.- 16.- P. 1–8.
- Zunker F. Verhalten des Bodens zum Wasser. In: *Handbuch der Bodenlehre, Bd. 6, S. 66–220.* Berlin: Springer, 1930.

## MATHEMATICAL MODELING OF ANTHILL AS A NATURAL STRUCTURE OPTIMIZING MECHANICAL ENERGY OF FORAGING INSECTS AND HEAT TRANSFER

Kasimova R.G.<sup>1</sup>, Tishin D.<sup>2</sup>, Kacimov A.<sup>3</sup>, Obnosov Yu.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*German University of Technology in Oman, Oman*

[rouzalia.kasimova@gutech.edu.om](mailto:rouzalia.kasimova@gutech.edu.om)

<sup>2</sup>*Kazan Federal University, Kazan, Russia,*

[Denis.Tishin@kpfu.ru](mailto:Denis.Tishin@kpfu.ru), [yobnosov@kpfu.ru](mailto:yobnosov@kpfu.ru)

<sup>3</sup>*Sultan Qaboos University, Oman*

[anvar@squ.edu.om](mailto:anvar@squ.edu.om)

Kasimova et al. (2013, 2014) modeled an anthill as a 3-D construction made of a light material of a low thermal conductivity. An energetically optimal shape and sizes of the dome was a target of the model. Solar radiation and heat released by metabolism of the insects is a source of warming of the nest interior. This energy is lost to a relatively cold ambient air. Foraging ants also expend mechanical energy, when outside the nest. The anthropomorphic principle was used and kinetic energy was similarly involved in the design of pedestrians' network of paths and roads within an urban district (Kasimova et al., 2014).

In our poster we present the result of experimental studies of Russian (near Kazan city) and American (in Minnesota, Wisconsin) anthills during the 2013-2014 Summer seasons. We used thermometers, luminometers and pyranometers for measurements of diurnal variations of the real temperature, illumination and radiation fluxes inside and in the vicinity of anthills. Mathematical models assumed simplified conditions: clear sky, certain classes of dome shapes (paraboloids and cones), homogeneity of the nest interior and constant heat transfer coefficient over the dome surface, among others. Mathematical optima agree pretty well with observed nests in terms of the height-to-width size ratio of the domes.

### References

- Kasimova R.G., Obnosov Yu.V., Baksht F.B., Kacimov A.R. Optimal shape of an anthill dome: Bejan's constructal law revisited. *Ecological Modeling*, 2013, v. 250, 384–390.
- Kasimova R.G., Tishin D., Obnosov Yu.V., Dlussky G.M., Baksht F.B., Kacimov A.R. Ant mound as an optimal shape in constructal design: solar irradiation and circadian brood/fungi-warming sorties. *J. Theoretical Biology*, 355, 21-32, 2014.
- Kasimova R.G., Tishin D., Kacimov A.R. Streets and pedestrian trajectories in an urban district: Bejan's' constructal principle revisited. *Physica A*, 410, 601–608, 2014.

## RESOURCE PARTITIONING DURING INTRASPECIFIC COMPETITION

Uchmański J.

*Stefan Wyszyński University, Institute of Ecology and Bioethica, Warsaw, Poland*

[j.uchmanski@uksw.edu.pl](mailto:j.uchmanski@uksw.edu.pl)

Uneven resource partitioning as the result of intraspecific competition will lead to differences in growth rates of competing individuals and this in turn gives variability of weights of adult females. The number of eggs laid by a female is related to its weight for many species. This is the reason why it is important to build models describing competitive interactions between individuals when applying individual-based approach to modeling population dynamics.

Generally there are two approaches to describe competition between individuals. Applying the first one, we can directly calculate the amount of food taken by each individual in the population. In the second one we can only calculate some coefficient which indirectly describes how influences of other individuals diminish a maximal possible resource assimilation rate of an individual.

We can describe directly results of competition in the case of sedentary organisms. To calculate directly energy gains of an individual living permanently in the same location, using resources from the vicinity and interacting with neighbors one can use so-called zones of influence (ZOI) approach (e. g. Hara 1988, Kenkel 1990). An individual is represented by a circle (radius of which in the case of trees can be interpreted as the horizontal extent of the crown or root system) with its center located at the point where the individual is situated. The area  $S$  of the circle represents resources used by the individual. The radius of ZOI increases with growth of the individual. Each individual uses all resources from its own ZOI when individuals are small or population density is low. But sooner or later ZOIs of neighbor individuals will start to overlap. Then an individual will use all resources from the non-overlapping part of its ZOI and only some part of the resources from the overlapping part. The partitioning of resource in the overlapping part of ZOIs of two neighbor individuals depends on the degree of the asymmetry of competition. Resources are partitioned there equally or in proportion to the weights of competing individuals if competition is symmetric, or heavier individuals obtain disproportionately more resources if competition is asymmetric. The way resources are partitioned between sedentary organisms depends on spatial distribution of individuals.

To illustrate the second approach in the case when individuals are sedentary - the competition is local and individuals interact only with closest ones - we have to combine the weights and distances to the neighbor competitors directly in a simple formula to calculate the values of some coefficient (Benjamin and Hardwick 1986) diminish a maximal possible resource assimilation rate of an individual. Increase of the distance between competitors should increase the value of the coefficient, but increase of weights of neighbors should decrease the value of the coefficient. This idea can be also applied to globally competing individuals (Wyszomirski et al. 1999).

When individuals are not sedentary, competition is global and individual actively hunt food which exists in the form of identical particles one can use following approach to describe directly consumption of an individual. Let us assume that there is some probability of catching such food particle. In the initial time instant the population consists of identical individuals. Each of them will have  $n$  attempts to catch food particles during its life. Probability that an individual will catch given number of food particle during its life is described by binomial distribution. This model can be easily generalized on the case of greater number of food particles types with different probabilities of catching them.

Above model describe resource partitioning between individuals of predatory species. All predators face the same problem: food exists in the form of particles and there is only some probability to find and eat the prey. In such cases resource partitioning is not equal. We have

binomial distribution of the amount of resources taken by individuals in the case of one food particle type and polynomial one in the case of the case of many food particle types. Both distributions are positively skewed: number of individuals with small value of assimilation is greater than the number of individuals with large value of it. Let us also note that increasing in the such model the number of attempts to catch the prey together with decreasing probability of catching it will lead to Poisson distribution of the amount of consumed food.

There are two main reasons of unequal resource partitioning in the above described example: resources in the form of particles and many times repeated attempts to catch these particles (not all of them are successful). Let us now assume that we have a gradient of continuous resources and freely moving along this gradient initially equal individuals. This is a situation which face zooplankton living in the water column when vertical distribution of algae is controlled by exponential decrease of light intensity with depth of water. Vertical distribution of zooplankton individuals will be in accordance with so called ideal free distribution hypothesis (Fretwell and Lucas 1968) which states that individuals will move along the food gradient until further replacement of each individual will not increase the amount of resource it will obtain. Such stable distribution of individuals exists and additionally each individual from population of ideally freely distributed individuals obtain the same amount of food in this equilibrium condition.

Equal distribution of resources is also possible in the above described case of food existing in the form of particles. We considered number of food particles caught by an individual during its life. Together they form cumulative energetic gross gain of the individuals. However, only net energy (assimilation – respiration) is available to the individuals for performing all their life functions. If gains are sufficiently positively correlated with costs of obtaining these gains (higher assimilation rate is related to sufficiently high respiration rate) we can expect that net gains will be equal for all individuals in the population.

Let us note that that there are no competition in above examples of globally competing individuals. These models should be treated as some kind of null models showing in the simple way that unequal resource partitioning (which is typical result of competition) can be also result of phenomena different than competition: for instance many attempts of catching food when it is present in the form of particles. How to introduce competition into above models? We can for instance assume that probability of food particle catching is increasing function of weight of individual. Because weight of an individual is a measure of its cumulative net energy gains during periods of growth, this assumption is an expression of the most general statement we can say about competition: an individual which obtained greater amount of resources in the past will obtain more of them in the future.

## Literature

- Benjamin L.R., Hardwick R.C. Sources of variation and measures of variability in even-aged stands of plants // *Annals of Botany*. – 1986. – No 58. – C.757-778.
- Fretwell S.D., Lucas H.L. On territorial behaviour and other factors influencing habitat distribution inn birds // *Acta Biotheoretica* – 1970. – No 19. – C.16-36.
- Hara T. Dynamics of size structure in plant populations // *Trends in Ecology and Evolution*. – 1988. – No 3. – C.129-133.
- Kenkel N.C. Spatial competition models for plant populations // *Coenoses* – 1990 – No 5. –C. 149-158.
- Wyszomirski T. Wyszomirska I, Jarzyna I. 1999. Simple mechanism of size distribution dynamics in crowded and uncrowded virtula monocultures // *Ecological Modelling* – 1999 - No115. –C.253-273.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Абакумов А.И.

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*

[abakumov@iacp.dvo.ru](mailto:abakumov@iacp.dvo.ru)

**Аннотация:** Обсуждаются проблемы математического моделирования водных экосистем, рассматриваются различные подходы к моделированию и результаты. Описываются задачи оптимального сбора урожая, алгоритмы поиска оптимальных решений и их свойства.

Математическое моделирование водных экосистем имеет продолжительную историю и разнообразные результаты (Jorgensen, 2005). Модели описывают трофические взаимодействия между видами, влияние среды и антропогенных воздействий (Свиричев, Логофет, 1978). Популяции и сообщества зачастую исследуются дискретными и непрерывными по времени моделями динамических систем. Для учета распределенности систем по пространству используются разнообразные математические средства, в том числе уравнения в частных производных и интегро-дифференциальные уравнения (Keller, Segel, 1971; Романовский, Степанова, Чернавский, 1984; Cantrel, Cosner, 2003). Видное место занимают модели нижних трофических уровней как основы жизнедеятельности экосистем (Jorgensen, 2005; Ризниченко, Рубин, 1993; Williams, 2007).

Среди задач управления значительную долю составляют задачи оптимального сбора урожая. Разнообразие этих задач достаточно велико, многие из них описывают популяции (Clark, 2010), получены значимые качественные результаты. Для многовидовых сообществ свойства решений в моделях чаще анализируются вычислительными и компьютерными средствами.

Получение экспериментальных данных о водных экосистемах связано с рядом естественных трудностей. Размеры водоемов, особенно морских, велики. Информация о глубоководных районах труднодоступна. В настоящее время значительная часть экспериментальных данных получается с помощью автоматических приборов. В частности, поверхностные характеристики морей и океанов хорошо исследуются дистанционными, прежде всего, спутниковыми, средствами. Контактные методы более надежны, но не обладают удовлетворительной широтой охвата по пространству и времени. Вместе с тем для моделирования важны качественные описания живой составляющей и среды обитания (Моисеев, 1989).

## Литература

- Моисеев П.А. Биологические ресурсы Мирового океана. - М.: Агропромиздат, 1989. - 368 с.  
Ризниченко Г. Ю., Рубин А. Б. Математические модели биологических продукционных процессов. - М.: Изд-во МГУ, 1993.  
Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическая биофизика. - М., 1984. – 304 с.  
Свиричев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. - М.: Наука, 1978. – 352 с.  
Cantrel R.S., Cosner C. Spatial Ecology via Reaction-Diffusion Equations. J. Wiley and Sons Ltd, 2003. - 411 p.  
Clark C. Mathematical bioeconomics. The mathematics of conservation. Third edition. Pure and Applied Mathematics. - New York: J. Wiley and Sons Ltd, 2010. - 368 p.  
Jorgensen, S.E., Loffler, H., Rast, W. and Straskraba, M. Lake and Reservoir Management. Elsevier, 2005. – 512 p.  
Keller E.F., Segel L.A. Model for chemotaxis // Theoretical Biology. – 1971. - Vol. 30. - P. 225-234.  
Murray J.D. Mathematical Biology. An Introduction. Third Edition. Springer, 2002, - 576 p.  
Williams P.J.B. Phytoplankton productivity. - New York: J. Wiley and Sons Ltd., 2007. - 386 p.

## **ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ ДРЕВОСТОЯ НА ДИНАМИКУ РОСТА НАСАЖДЕНИЯ. МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ.**

Агольцов А.Ю., Чумаченко С.И.

*Московский государственный университет леса, г. Мытищи, Россия*  
[alex.ago@mail.ru](mailto:alex.ago@mail.ru), [chumachenko.s.i@gmail.com](mailto:chumachenko.s.i@gmail.com)

**Аннотация:** в работе показано влияние пространственной структуры древостоя на динамику роста многовидовых лесных насаждений. Проведена серия модельных экспериментов для изучения естественного развития елово-березового древостоя при различных вариантах смещения на нулевом шаге моделирования.

Развитие отрасли дистанционного зондирования Земли из космоса и доступность актуальных и архивных данных позволяет получить информацию о неоднородности выдела и использовать ее при моделировании дополняя стандартные таксационные описания.

Цель работы заключается в обосновании важности учета пространственной структуры древостоев при моделировании динамики развития насаждений в целях лесного планирования. Для этого проведена серия модельных экспериментов по прогнозированию развития елово-березового древостоя при различных вариантах смещения на нулевом шаге моделирования.

### **Модели многовидовых лесных насаждений**

Существует большое количество и разнообразие моделей, их различное целевое назначение, а также отличие друг от друга по способам построения и качественной специфике (Porte, Bartelink, 2002; Hong S. He, 2008; Weimin Xi, 2009; Harold E. Burkhart, 2012).

Большая часть лесов в зоне умеренного климата (таежная и зона хвойно-широколиственная лесов) представляет собой многовидовые разновозрастные лесные насаждения, в изучении динамики которых наиболее целесообразно использовать метод имитационного моделирования. Это обусловлено тем, что развитие таких насаждений может быть описано только большим числом параметров. Используемая в экспериментах имитационная модель FORRUS-S, является зависящей от расстояния между единицами моделирования. Работа модели построена на знании следующих биоэкологических параметров видов, значения которых заданы для каждого возрастного состояния: требовательность к свету; коэффициент пропускания света кроной; просветы в пологе; форма кроны и др. (Чумаченко, 2006).

Все моделируемое пространство древостоя разделено на трехмерные ячейки - прямоугольные параллелепипеды размером 16,7x16,7x2,5 м. Вертикальный ряд ячеек образует пространственный элемент модели. Каждый такой элемент может иметь свои характеристики по условиям плодородия почвы, ее увлажнения и пр. Таким образом, может быть учтена пространственная неоднородность условий произрастания насаждения. При расчете ФАР модель использует ячеистые структуры и зависимость Монси-Саеки, модернизированную с учетом движения солнца по небосводу. Шаг моделирования составляет 5 лет.

### **Модельный эксперимент**

Модельный объект представляет собой небольшой участок территории разбитый на 25 ячеек (5x5) с одинаковыми условиями произрастания по всей площади. Прогноз развития елово-березового насаждения проводился на 50 лет (10 шагов моделирования).

1 ряд экспериментов моделирует развитие подростка ели и березы при различных вариантах смешения. В эксперименте 1-1 ель и береза развиваются независимо друг от друга, в 1-2 ель в процессе роста угнетена березой, в результате чего через 50 лет ель в 3 ярусе древостоя с 2-х кратным отставанием по высоте. При куртинном размещении пород развитие древостоя близко к первому варианту (1-3).

2 ряд экспериментов имитирует развитие ели и березы в небольшом просвете (окно в 1 ячейку) в еловом насаждении высотой 28 м. Здесь мы наблюдаем существенное замедление роста обоих видов.

3 ряд экспериментов имитирует развитие ели и березы просвете в 9 ячеек (окно 3x3 ячейки). Здесь во всех 3-х случаях мы наблюдаем небольшое отставание в росте по сравнению с первой группой экспериментов и замечаем различия в росте в разных частях окна. Так в южной части окна самое большое отставание, связанное с наибольшим затенением от окружающего ельника (рисунок 2).

Результаты расчетов показаны в таблице 1, графическое представление на рисунке 1.

Таблица 1. Результаты расчетов

Эксперимент	Шаг 0						Шаг 10						запас куб.м/га
	в ы д	с о с т	я р у с	э л е м	в о з р	в ы с	в ы д	с о с т	я р у с	э л е м	в о з р	в ы с	
1-1 2 выдела 10Е и 10Б в возрасте 1 год	1	10Б	1	Б	1	0.1	1	10Е	1	Е	50	14.0	398
	2	10Е	1	Е	1	0.0	2	10Б	1	Б	50	19.0	202
1-2 равномерное смешение подростка березы и ели	1	5Е5Б	1	Б	1	0.1	1	10Б	1	Б	50	19.0	179
			1	Е	1	0.0			3	Е	50	6.8	
1-3 куртинное размещение березы и ели	1	10Б	1	Б	1	0.1	1	10Б	1	Б	50	19.0	212
	2	10Е	1	Е	1	0.0	2	10Е	1	Е	50	13.0	400
2-1 подрост березы в окружении ели	1	10Е	1	Е	80	28.2	1	10Е	1	Е	130	30.0	558
	2	10Б	1	Б	1	0.1	2	10.0	1	Б	50	8.0	32
2-2 подрост ели в окружении ели	1	10Е	1	Е	80	28.2	1	10Е	1	Е	130	30.0	558
	2	10Е	1	Е	1	0.0	2	10Е	1	Е	50	9.0	59
2-3 подрост ели и березы в окружении ели	1	10Е	1	Е	80	28.2	1	10Е	1	Е	130	30.0	558
	2	7Е3Б	1	Е	1	0.0	2	9Б1Е	1	Б	50	8.0	40
3-1 подрост березы в окружении ели	1	10Е	1	Е	80	28.2	1	10Е	1	Е	130	30.0	558
	2	10Б	1	Б	1	0.1	2	10.0	1	Б	50	19.0	192
	3	10Б	1	Б	1	0.1	3	10.0	1	Б	50	19.0	200
	4	10Б	1	Б	1	0.1	4	10.0	1	Б	50	19.0	184
3-2 подрост ели в окружении ели	1	10Е	1	Е	80	28.2	1	10Е	1	Е	130	30.0	558
	2	10Е	1	Е	1	0.0	2	10Е	1	Е	50	13.0	296
	3	10Е	1	Е	1	0.0	3	10Е	1	Е	50	13.0	302
	4	10Е	1	Е	1	0.0	4	10Е	1	Е	50	13.0	240
3-3 подрост ели и березы в окружении	1	10Е	1	Е	80	28.2	1	10.0	1	Е	130	30.0	558
	2	5Е5Б	1	Е	1	0.0	2	10Б	1	Б	50	19.0	173
			1	Б	1	0.1			3	Е	50	5.4	

	ели	3	5Е5Б	1	Е	1	0.0	3	10Б	1	Б	50	19.0	176
				1	Б	1	0.1			3	Е	50	5.7	
		4	5Е5Б	1	Е	1	0.0	4	10Б	1	Б	50	19.0	122
				1	Б	1	0.1			3	Е	50	4.6	

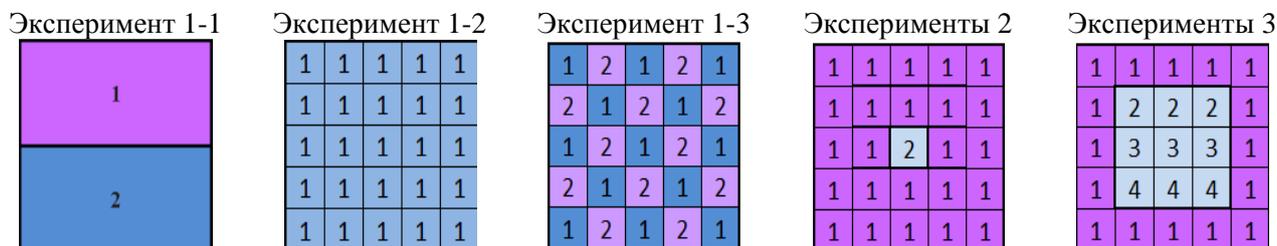


Рисунок 1. Графическое представление модельных экспериментов

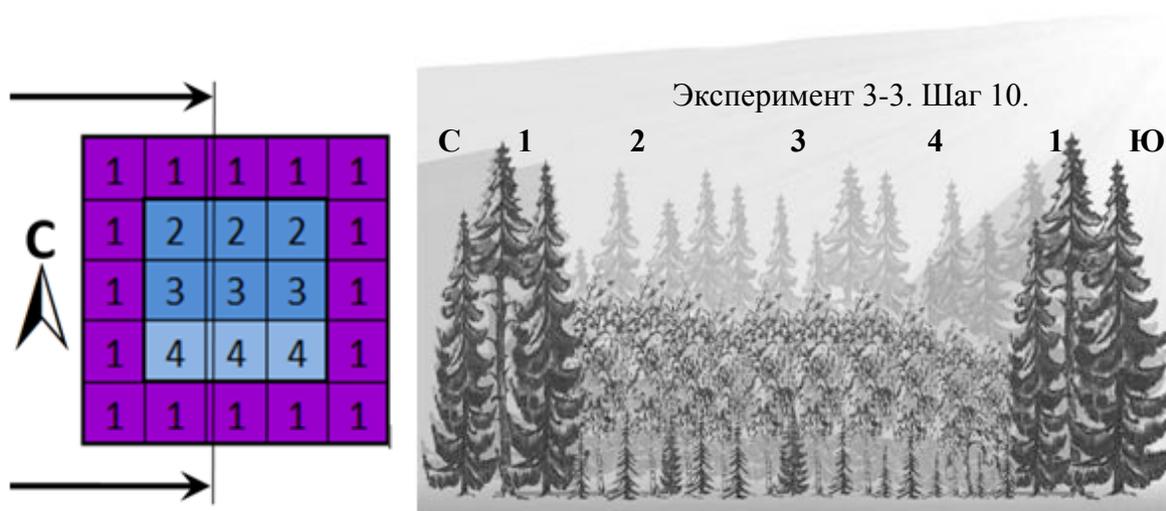


Рисунок 2. Затенение в южной части окна (3 группа экспериментов)

## Выводы и заключение

Учет пространственной неоднородности структуры древостоя лесотаксационного выдела повышает точность прогнозов развития многовидовых лесных насаждений на повыдельном уровне, что важно учитывать при проектировании лесохозяйственных мероприятий.

## Литература

- Harold E. Burkhart, Margarida Tomé. Modeling Forest Trees and Stands. Springer Science+Business Media Dordrecht, 2012.
- Hong S. He. Forest landscape models: Definitions, characterization, and classification. Forest Ecology and Management, 254, 2008, - 484–498 с.
- Porte A., Bartelink H.H.. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. Ecological Modelling, 150, 2002, - 141 – 188 с.
- Weimin Xi at al. Review of forest landscape models: Types, methods, development and applications. Acta Ecologica Sinica, 29, 2009, - 69–78 с.
- Чумаченко С.И. Имитационное моделирование многовидовых разновозрастных лесных насаждений: Диссертация на соискание уч. ст. докт. биол. наук. - Мытищи, 2006.

## УРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ПОЧВА-РАСТЕНИЕ В ФОРМЕ ФЕРХЮЛЬСТА-БАУЭРА

Александров В.Г.

*Институт Коммуникаций и Информационных технологий КРСУ, г. Бишкек, Кыргызская Республика*  
[Vigal47@rambler.ru](mailto:Vigal47@rambler.ru)

**Аннотация.** В настоящей работе описывается подход к построению модели динамики продукционной системы почва-растение и почвенного плодородия, который основан на уравнении Ферхюльста и соотношениях Бауэра, связывающих динамику биомассы, потенциала роста и свободную энергию живой системы.

### Введение

Решение задач оптимального управления продукционными системами наталкивается на большие математические трудности, связанные с высокой сложностью их моделей. Поэтому в настоящее время, для решения задач оптимального управления продуктивностью системы почва-растение, стала актуальной проблема построения упрощённых ОДУ-аналогов больших моделей, адекватных исходным моделям по динамике биомассы, почвенному плодородию и урожаю, для которых применимы классические методы оптимизации.

### Объекты

Математическими объектами исследований являются модели двух-видовой конкуренции-симбиоза в форме Ферхюльста, модель скорости роста популяции Михаэлиса-Ментень и соотношения Бауэра для процесса ассимиляции живой системы. В качестве объекта растительной популяции выбран посев зерновых, колосовых – пшеница, ячмень, рожь, а в качестве бактериальной популяции – бактериальная микрофлора азотного цикла как доминирующая компонента почвенного плодородия. В качестве агроэкологического объекта рассматриваются объёмная влажность и концентрация подвижного азота почвы.

### Методы

Наш подход построения упрощённого математического аналога некоторой большой модели, продукционной системы почва-растение (например, AGROTOOL) основан на использовании моделей ОДУ двух-видовой конкуренции-симбиоза в форме Ферхюльста и энергетических зависимостей теоретической биологии Бауэра [Бауэр, 1935]. То есть, с точки зрения теоретической биологии Бауэра, наш подход описывает динамику развития посева и почвенной бактериальной популяции в пределах процесса ассимиляции, который для многих сельскохозяйственных культур совпадает с уборкой урожая. Система почва-растение нами рассматривается как двух-продукционная система – растительная и бактериальная.

### Результаты

На основании модели динамики ограниченного роста численности популяции Ферхюльста (1848), модели скорости роста популяции Михаэлиса-Ментень [Ризниченко] и положений теоретической биологии Бауэра построена модель динамики биомассы посева и бактериальной популяции:

$$\frac{dy_1}{dt} = \alpha_1 \mu_1 y_1 (1 - y_1/M_1 - \alpha_{12} y_2/M_2 + \gamma_{12} y_2), \quad (1)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = \alpha_2 \mu_2 y_2 (1 - y_2/M_2 - \alpha_{21} y_1/M_1 + \gamma_{21} y_1) \quad (2)$$

$$\frac{d\mu_1}{dt} = [(-\alpha_1 \mu_1^2 y_1 / M_1)(1 - y_1 / M_1) + \delta_{12} \mu_2] d_1 K(N, W), \quad (3)$$

$$\frac{d\mu_2}{dt} = [(-\alpha_2 \mu_2^2 y_2 / M_2)(1 - y_2 / M_2) + \delta_{21} \mu_1] d_2 K(N, W) \quad (4)$$

$$\frac{dN}{dt} = (1 - N/\bar{N})N - [Y_1 N / (k_1 + N)]y_1 - [Y_2 N / (k_2 + N)]y_2 + k_3 y_2 + k_4 y_1 y_2 \quad (5)$$

$$\frac{dW}{dt} qP - E_s(t, y_1, W) - E_s(t, y_1, W) \quad (6)$$

$$K(N, W) = [1 - ((N^{opt} - N) / N^{opt})^2][1 - ((W^{opt} - W) / W^{opt})^2] \quad (7)$$

$$y_1(0) = y_{10} \quad \mu_1(0) = \mu_{10} \quad y_2(0) = y_{20} \quad \mu_2(0) = \mu_{20} \quad N(0) = N_0, W(0) = W_0 \quad t \in (0, T).$$

$\mu_1, \mu_2$  – потенциал роста биомассы посева и микрофлоры соответственно.  $y_1, y_2$  – биомасса посева и микрофлоры соответственно.  $M_1, M_2$  – максимальная биомасса посева и микрофлоры соответственно.  $\alpha_1, \alpha_2$  – интенсивность роста биомассы посева и микрофлоры соответственно, в общем случае зависят от времени и параметров внешней среды.  $T$  – момент времени завершения вегетации (предел ассимиляции).  $\alpha_{12}, \alpha_{21}$  – коэффициенты конкуренции популяций.  $\gamma_{12}, \gamma_{21}$  – коэффициенты симбиоза популяций.  $\delta_{12}, \delta_{21}$  – коэффициенты взаимовлияния потенциалов роста популяций,  $d_1, d_2$  – настроечные коэффициенты,  $K(N, W)$  – коэффициент ресурсного угнетения,  $Y_1, Y_2$  – максимальная скорость роста популяций,  $k_1, k_2$  – коэффициенты Михаэлиса соответственно для популяции посева и микрофлоры,  $k_3, y_2$  и  $k_4, y_1, y_2$  – описывают дополнительную интенсивность повышения подвижного азота за счёт минерализации погибшей микрофлоры и корневого опада соответственно.

## Обсуждение результатов

Модель (1)-(7) описывает динамику биомассы посева совместно с динамикой почвенного плодородия от начала до завершения вегетации. Введение в модель потенциалов развития популяций позволяет так скорректировать значения начальных потенциалов посевного материала и доминантной группировки микробного сообщества (предпосевная дозированная обработка семян и(или) почвы), что бы система почва-растение изначально была настроена на получение потенциально высокого урожая (Александров и др., 2006, Девликамов, 2007, Соколова и др., 2009).

Коэффициенты модели (1)-(7) определяются как функции времени и агроклиматических параметров внешней среды по какой либо условно полной модели (например, AGROTOOL) на основании поливариантных расчётов из решения обратной задачи по данным численных экспериментов.

После идентификации модели на основании исходной условно полной модели можно идентифицировать функции внешнего воздействия для управляемых параметров и поставить задачу оптимизации системы почва-растение.

## Литература

- Бауэр Э.С. Теоретическая Биология. Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика. 2001. 280 с.  
 Ризниченко Г. Ю. / Динамические модели в биологии, Реестр моделей, Модели в экологии, Модели экологических сообществ/, Москва, МГУ, <http://dmb.biophys.msu.ru/>  
 Александров В.Г. Влияние бактериального препарата «Гумовит» на почвенную активность /В.Г. Александров// Биотехнология в мире животных и растений: Тез. докл. конф. – Бишкек, 2006. – С.304-306.  
 Девликамов М.Р. /Влияние бактериальных препаратов и микроэлементов на урожайность и качество яровой пшеницы в лесостепи Среднего Поволжья/ Диссертация, Пенза -2009.  
 Соколова М.Г. Апробация и исследование экологически чистых биоудобрений на основе ризосферных бактерий/ Соколова М.Г., Акимов А.Г., Вайшла О.Б., Ведерникова А.А.// Ж. Менеджмент природных ресурсов, №3, Новосибирск, - 2009.

## **ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ РИСКА В МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДООХРАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ МЕГАПОЛИСА (НА ПРИМЕРЕ ЭКОСИСТЕМ ООПТ "ВОРОБЬЕВЫ ГОРЫ")**

Барабошкина Т.А., Самарин Е.Н., Белютина В.С.

*МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

### **Введение**

В экологической модели г. Москвы – Воробьевы горы - продолжение объектов природоохранных структур Западного, Юго-западного и Центрального административных округов, протянувшихся вдоль Правого берега р. Москвы. И в то же время - связующий элемент в природном каркасе юго-западной части в границах Старой Москвы и присоединенных территорий Большой Москвы с ландшафтами Подмосковья.

Одной из актуальных задач при изучении территории Воробьевых гор являлся анализ тенденций динамики состояния наземных экосистем под влиянием геологических риск факторов.

### **Эколого-геодинамические факторы**

Территория Воробьевых гор соответствует Москворецко-Сходненскому ландшафту и приурочена к урочищу коренного склона долины р. Москвы. В геоморфологическом отношении исследуемый участок расположен в пределах водораздельного плато Теплостанской цокольной возвышенности и эрозионного склона реки Москвы, с четко выраженными эрозионными формами (Самсонова и др., 2013).

*Эколого-геодинамические условия* территории характеризуются высоким уровнем оползневой опасности – это лимитирующий фактор, который с одной стороны ограничил строительное освоение данной территории, а с другой стороны создал оптимальную модель сохранения биообразия в условиях мегаполиса (Барабошкина и др., 2008)

В настоящее время подвижки грунта зафиксированы в районе метромоста, эскалаторной галереи, канатно-кресельного подъемника, эстакады горнолыжного спуска, вблизи Института химической физики им. Н.Н. Семенова. Согласно расчетным данным территории заказника поражена оползнями более чем на 30%, что позволяет охарактеризовать состояние эколого-геологических условий как катастрофическое практически на всей площади. Однако здесь мы наблюдали любопытную инверсию между классами эколого-геологических условий и состоянием экосистем. По литературным данным и натурным наблюдениям самые ценные дендрологические объекты приурочены к днищам оврагов и к стабилизировавшимся телам оползней (Самсонова и др., 2013).

Второй доминирующий процесс - овражная эрозия, формирующий линейно-вытянутые полые формы рельефа - овраги, балки и т.д. Заболачивание территории характерно для пониженных частей склона в зоне выхода подземных вод.

Необходимо отметить и значительную роль делювиального (плоскостного) смыва, который хорошо развит на склонах крутизной более 20° на различных гипсометрических уровнях. Он обуславливает наличие склонов без травяного покрова, эрозионных ниш в верхней части склона и размыв корневых систем деревьев. Воробьевы горы относятся к зоне умеренной деградации почв со средним смывом с поверхности 0,7 т/га/год.

Как видно из выше изложенного материала, формирование эколого-геологических условий территории Природного Заказника «Воробьевы Горы» обусловлено синергетическим влиянием разноуровневых факторов (Голубева и др., 2013; Базарский, Косинова, 2005). Однако интересно на примере данной модельной территории проследить и синхронность протекания геодинамических и социально-экологических процессов. Анализ

исторической ретроспективы развития территории показал, что в 1983 году, когда станция метро Ленинские горы (ныне Воробьевы горы) была закрыта до 2002 года, и в течении 19 лет центральная часть природного заказника имела низкий уровень рекреационной нагрузки, то в данный период фиксировалось самовосстановление экосистем района.

Для формирования модели оптимального развития экосистем в районе Воробьевых гор на современном этапе, в первую очередь необходимо усовершенствовать систему отвода поверхностного стока, снизить вибрационные нагрузки в районе метромоста, регламентировать поток велотуристов, осуществить экранирование полосы автотрассы, возвышающейся и пересекающей по мосту лесную зону.

Предлагаемый комплекс мер позволит сократить уровень вибрационной нагрузки, уменьшить избыточное обводнение склона и миграционный поток поллютантов на территорию заказника, прилегающую к автотрассе, понизить уровень шумового воздействия на орнитофауну и других представителей живых организмов, обитающих в пределах уникальной территории.

### **Выводы**

- На современном этапе лимитирующими факторами, влияющими на устойчивость развития экогеосистем природного заказника «Воробьевы горы» имеет совокупность (а) природных и (б) техногенных факторов. Установлена доминирующая роль (1) природных факторов в формировании эколого-геодинамических условий и их эпизодической активизации под влиянием экстремальной техногенной нагрузки и (2) ведущая роль техногенных факторов в модели формирования эколого-геохимических и эколого-геофизических условий.

- Функциональная организация территории природного заказника исторически регламентирована геодинамическими факторами. Данный факт способствовал максимальному сохранению биоразнообразия в пределах Воробьевых гор, не смотря на его местоположение в границах мегаполиса. Места произрастания старовозрастных деревьев, ценных природных массивов широколиственного леса органически связаны с днищами оврагов (зонами максимальной эрозионной расчлененности). По сути неудобья - резервация для краснокнижных видов в пределах городской агломерации. Формирование единой модели природного каркаса г. Москвы зависит от дальнейшего сохранения статуса Воробьевых гор в качестве природного образования, как важного элемента в структуре модели особо охраняемых природных территорий – стабилизирующего фактора устойчивого развития городских экосистем.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ проект № 15-05-01788 А*

### **Литература**

- Базарский О.В., Косинова И.И. О единой метрике комплексного эколого-геологического пространства. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2005. № 2. С. 168-172.
- Голубева Е.И., Король Т.О., Топорина В. А. Культурный ландшафт в географии: различные подходы к объекту исследования // Academia. Архитектура и строительство. — 2013. — № 1. — С. 82–87.
- Самсонова С.Ю., Белютина В.С., Барабошкина Т.А., Самарин Е.Н., Огородникова Е.Н. Эколого-геоморфологический анализ в обосновании управления городскими особо-охраняемыми природными территориями//Вестник Российского университета дружбы народов. Серия "Экология и безопасность жизнедеятельности" — 2013. — № 2. — С. 93–99.
- Изменение эколого-геологических условий природного заказника Воробьевы Горы под влиянием Московской агломерации /Т. А.Барабошкина, В. Н.Сеземан, Е.Н. Самарин и др. //Месторождения природного и техногенного сырья: геология, геохимия, геохимические и геофизические методы поисков, экологическая геология. — Воронеж:печать. г. Воронеж, 2008. — С. 395–397.

## ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ПРИ ГОРЕНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА МЕТОДОМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Барбин Н.М.

*Уральский государственный аграрный университет, г. Екатеринбург, Россия*  
[NMBarbin@mail.ru](mailto:NMBarbin@mail.ru)

**Аннотация:** компьютерное термодинамическое моделирование использовано для изучения поведения радионуклидов при газофазном сжигании радиоактивного графита в атмосфере воздуха.

Радиоактивный графит применяется как конструкционный материал, а также как замедлитель и отражатель в уран – графитовых реакторах канального типа. Кроме того, реакторный графит используется в качестве блоков отражателя и оболочек ТВЭЛов высокотемпературных газоохлаждаемых атомных реакторов.

В связи с завершением срока эксплуатации, а также в результате аварий образуется большое количество радиоактивных графитовых отходов. По оценкам, общее количество облученного графита в странах мира превышает 230 – 250 тыс. тонн. Реакторный графит составляет большую часть накопленных в мире твердых радиоактивных отходов.

Существующие технологии переработки ядерных графитовых отходов в большинстве своем основаны на изоляции радиоактивного графита от окружающей среды. Однако они не способны обеспечить значительное уменьшение объема. Поэтому технологии высокотемпературной обработки, например сжигание, рассматриваются в качестве эффективной замены, так как они обеспечивают значительное сокращение объема отходов.

Радиоактивный графит содержит различные радионуклиды, такие как тритий и  $^{14}\text{C}$ , а также продукты коррозии/активации ( $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{22}\text{Na}$  и т.д.), продукты деления ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  и т.д.) и небольшое количество урана и элементов превращения ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$  и т.д.). По этому, хотя сжигание рассматривается как эффективное средство комплексной обработки и удаления графитовых отходов атомной промышленности, приемлемость выбросов радиоактивных элементов для сохранения окружающей среды является основным критерием успешного развития процесса сжигания.

Радиоактивные элементы невозможно уничтожить сжиганием. Они либо остаются с негорючей частью отходов, либо испаряются в зависимости от степени их летучести. Газообразные радиоактивные элементы конденсируются на более крупные частицы в потоке газов, которые удаляются газоочистительной системой или собираются вокруг «зародыша» и образуют собственную субмикронную аэрозоль. Такие частицы часто могут проникать в оборудование газоочистительной системы. Вынесенные субмикронные частицы легко вдыхаются в легкие. Они могут также откладываться на поверхность водоемов и продовольственные культуры.

В настоящей работе изучалось поведение радионуклидов при нагревании (горении) радиоактивного графита в атмосфере воздуха. Исследования проводили методом термодинамического моделирования.

Термодинамическое моделирование (ТДМ) заключается в термодинамическом анализе равновесного состояния систем в целом (полный термодинамический анализ). Расчетные методы развиты на основе вариационных принципов термодинамики.

Наиболее значимыми компонентами конденсированной фазы являются  $\text{UO}_2$ ,  $\text{UOCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{BeO}$ . Их концентрация превышает  $10^{-2}$  мол.дол. В интервале температур 1300-1500К соединение  $\text{UO}_2$  становится преобладающим компонентом с концентрацией 0,98 мол.дол.

При температуре выше 900К основные компоненты газовой фазы –  $\text{N}_2$  ( $p \sim 0.98$  атм),  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  ( $p \sim 10^{-1}$  атм).

При температуре выше 900К весь углерод находится в газовой фазе в виде  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  при отношении 1:1.

При 300-1000К примерно 100% кальция и стронция находится в виде конденсированного  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{SrCl}_2$ , при повышении температуры до 1300К наблюдается переход хлоридов в газовую фазу.

При температуре 300-900К примерно 100-90% бериллия находится в виде конденсированного  $\text{BeO}$ . В интервале от 800 до 1200К уменьшается содержание конденсированного  $\text{BeO}$  от 90 до 5% и увеличивается содержание газообразного  $\text{BeCl}_2$  от 10 до 95%.

При дальнейшем повышении температуры до 1600К происходит сдвиг реакции влево – к увеличению содержания  $\text{BeO}$  до 95% и уменьшению содержания газообразного  $\text{BeCl}_2$  до 5%.

При температуре 300 – 700К примерно 100 – 97% никеля находится в виде конденсированного  $\text{NiCl}_2$ . Дальнейшее повышение температуры до 1600К ведет к уменьшению доля газообразного  $\text{NiCl}_2$  до 68% и появлению газообразного  $\text{NiCl}$  до 32%.

В интервале 300-700К уран находится в виде твердых фаз  $\text{UO}_2$ ,  $\text{UOCl}_2$ ,  $\text{UOCl}$ . Повышение температуры до 1100К вызывает появление газообразного  $\text{UCl}_4$ , доля которого достигает ~10%, и уменьшение до нуля конденсированного  $\text{UOCl}_2$ . При дальнейшем росте температуры до 1300К исчезает газовая фаза  $\text{UCl}_2$ , уменьшается практически до нуля конденсированный  $\text{UOCl}$ , уран представляет собой фазу конденсированного  $\text{UO}_2$ . В интервале от 1300 до 1600К практически весь уран присутствует в виде конденсированного  $\text{UO}_2$ .

При температуре до 300К практически весь плутоний находится в виде конденсированного  $\text{PuCl}_3$ . В интервале от 800 до 1300К конденсированные  $\text{PuOCl}$  (~75%) и  $\text{PuO}_2$ . При дальнейшем повышении температуры до 1600К основной фазой является конденсированный  $\text{PuO}_2$ .

В интервале от 300 до 800К практически весь америций присутствует в виде конденсированного  $\text{AmO}_2$ . Дальнейшее повышение температуры до 1600К вызывает появление конденсированного  $\text{Am}_2\text{O}_3$  (~10%), остальной америций находится в виде конденсированного  $\text{AmO}_2$  (~90%).

## МОДЕЛЬНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОСУЩЕСТВИМОСТИ ПОРОГОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ В СИСТЕМЕ «БИОСФЕРА-КЛИМАТ»

Барцев С.И.<sup>1\*</sup>, Белоліпецкий П.В.<sup>2</sup>, Иванова Ю.Д.<sup>1</sup>, Почекотов А.А.<sup>1</sup>, Салтыков М.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

\*[bartsev@yandex.ru](mailto:bartsev@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

[pbel@icm.krasn.ru](mailto:pbel@icm.krasn.ru)

**Аннотация:** проведенный анализ пространственно-временной динамики глобальной температуры показал, что наблюдаемый ход глобальной температуры носит ступенчатый характер. Иллюстрация ступенчатой динамики с помощью простых иллюстративных моделей показала, что наблюдаемая динамика может иметь место даже при отсутствии нарастающего вклада парникового эффекта, вследствие внутренних причин.

Согласно парадигме МГЭИК непрерывный рост парниковых газов должен приводить к непрерывному росту глобальной приповерхностной температуры. Однако изменения температуры имеют более сложную структуру - наблюдаются короткие флуктуации температуры, например, явление Эль-Ниньо (ENSO) (Lean and Rind 2008). Различие характерных времен дает основания предположить, что долговременная динамика и кратковременные флуктуации глобальной температуры порождаются разными механизмами и могут рассматриваться и изучаться отдельно, по крайней мере, в первом приближении.

Пространственно-временную динамику глобальной температуры можно представить в виде суммы произведений пространственных эмпирических ортогональных функций  $EOF_i(lat, lon)$  и временных зависимостей, так называемых главных компонент  $PC_i(t)$  (Belolipetsky 2014). Оказалось, что первая эмпирическая ортогональная функция очень хорошо описывает именно эффект ENSO и первая главная компонента  $PC_1(t)$  очень близка к различным индексам ENSO. Вычитая  $EOF_1(lat, lon)$  из исходных данных мы исключаем из рассмотрения огромные кратковременные вариации температуры, вызванные ENSO. Полученная аппроксимация предельно проста, однако даже эта простая аппроксимация позволяет в результате годовичного усреднения глобальных температурных аномалий и вычитания вклада вулканов получить следующую динамику температурных аномалий (Рисунок 1).

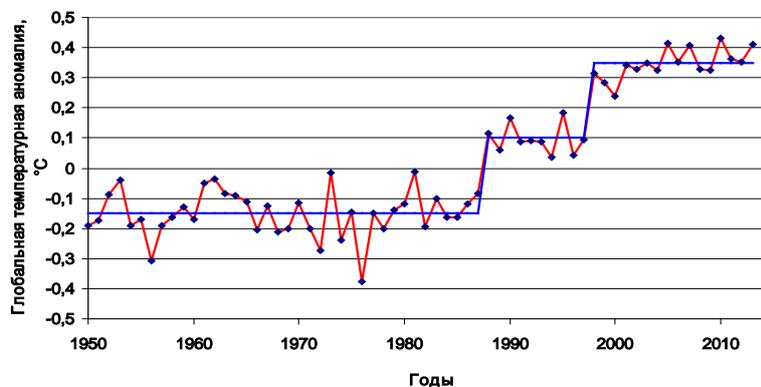


Рис.1. Остаточные среднегодовые вариации

Можно сделать предварительный вывод: в моделях МГЭИК не учитывается некий важный климатический механизм. Под механизмом мы подразумеваем не случайно возникающие (которые в настоящее время используются для объяснения "температурной паузы") причины, а постоянно действующий фактор.

Детальное описание сложных нелинейных процессов, происходящих в климатической системе Земли (Монин и Шишков, 2000) возможно с помощью трёхмерных моделей общей

циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Численные эксперименты с МОЦАО позволяют выделить основные факторы, влияющие на среднегодовую глобальную приповерхностную температуру, и в предположении малых температурных изменений построить простую модель климата с динамикой глобальной температуры аппроксимирующей результаты моделей МГЭИК (IPCC Climate Change, 2007):

$$C \frac{d\Delta T}{dt} = \Delta R_f + \sum_i f_i \Delta T \quad (1)$$

где  $t$  - время,  $C$  – теплоёмкость климатической системы,  $\Delta T$  - изменение глобальной среднегодовой поверхностной температуры, вследствие радиационного воздействия  $\Delta R_f$ .

В то же время ступенчатая динамика изменений (Рисунок 1) указывает на наличие нелинейных обратных связей (Rial et al., 2004), приводящих к множественным стационарным состояниям. Кроме того, в зависимости от силы воздействия эффект обратной связи может менять свой знак. Например (Найденов, 2004) повышение увлажнённости суши вызывает снижение альбедо данного участка Земли, приводящее к дальнейшему повышению температуры и увлажнённости, вызывающему усиленное развитие растительности, ведущее к уменьшению альбедо. Однако с ростом испарения увеличивается количество облаков и, следовательно, увеличивается альбедо, что способствует понижению температуры.

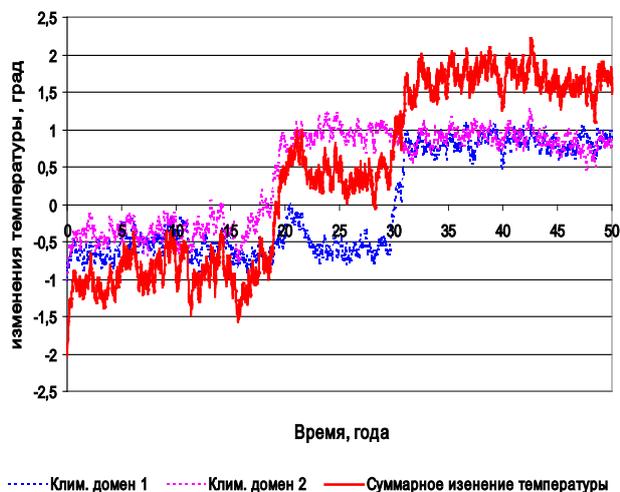


Рис.2. Модельная динамика температуры.

Принимая вышесказанное во внимание естественно ожидать наличие множественных стационарных состояний в системе биосфера-климат. Качественного описания свойств такой системы можно получить, дополнив уравнение (1) членами разложения по  $\Delta T$  следующих степеней. Проявление механизмов обратной связи может быть различным для разных регионов и можно говорить о взаимодействии относительно автономных систем. Рисунок 2 иллюстрирует возможность реализации динамики, подобной, изображенной на рисунке 1, но

полученной без предположения о монотонном росте парникового эффекта. Мы не сомневаемся в существовании парникового эффекта, но считаем, что от нелинейной системы естественнее ожидать не монотонной зависимости переменных от внешних факторов, а более сложное поведение, причем не исключен вариант, когда система самопроизвольно переходит из одного квазистационарного состояния в другое. На фоне естественных вариаций эти скачки могут выглядеть, как монотонный рост. Работа поддержана грантом РФФИ 15-41-04300.

## Литература

- Монин А.С., Шишков Ю.А.. Климат как проблема физики // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 4. – С. 419-445.
- Найденов В.И. Нелинейная динамика поверхностных вод суши / В.И. Найденов; отв. ред. М.Г. Хубларян. - М.: Наука, 2004. - 318 с.
- Belolipetsky P.V. The Shifts Hypothesis - an alternative view of global climate change. Preprint. 2014, <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.5805.pdf>.
- Lean J.L., Rind D.H. How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, V. 35, L18701, 6 p.
- Rial J.A. et al. Nonlinearities, feedbacks and critical thresholds within the earth's climate system // *Climatic Change* 2004, V.65, P.11–38.

## РАЗНООБРАЗИЕ СУКЦЕССИЙ ПРИ ЗАРАСТАНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ НА ЮГЕ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

<sup>1</sup>Бобровский М.В., <sup>2</sup>Ханина Л.Г., <sup>1</sup>Шашков М.П., <sup>2</sup>Иванова Н.И., <sup>2</sup>Смирнов В.Э.

<sup>1</sup>*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*

<sup>2</sup>*Институт математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия*  
[maxim.bobrovsky@gmail.com](mailto:maxim.bobrovsky@gmail.com)

**Аннотация:** На основе анализа космических снимков среднего разрешения и результатов наземного обследования разработана ГИС земель Заокского участка Серпуховского района Московской области. Выделены основные типы биотопов с учетом типов экосистем, формирующихся при зарастании пашен и вариантов восстановительных сукцессий.

На залежных землях в центре Европейской России, в том числе в Московской области, преобладают аллогенные восстановительные сукцессии, когда внешние воздействия (прежде всего травяные палы) создают сложную мозаику местообитаний. Цель исследования - изучение разнообразия экосистем при разных вариантах сукцессий на заброшенных сельскохозяйственных землях южного Подмосковья. В качестве модельной территории выбран Заокский участок Серпуховского района (северная граница участка проходит по р. Ока, южная – по границе с Тульской областью).

На основе анализа космических снимков среднего разрешения и результатов наземного обследования исследуемой территории разработана ГИС, создана серия тематических карт для анализа особенностей зарастания залежей в зависимости от разных параметров. Общая площадь модельной территории 67300 га. Выделены основные категории земель: населенные пункты (13,7% от общей площади территории), водоемы (0,6%), лес (19,8%), луга и кустарники (7,0%), пашни (18,3%), зарастающие пашни (39,8%), прочие земли (0,7%). В некоторых случаях карта-схема требует уточнения после проведения маршрутных исследований в вегетационный период.

С учетом типов экосистем, формирующихся на землях, выведенных из сельскохозяйственного оборота, и характера восстановительных сукцессий, зарастающие пашни подразделены на автогенно (без нарушений) зарастающие пашни и четыре варианта аллогенно (экзогенно) зарастающих пашен: без деревьев, с единичными деревьями, с подростом (древостоем) средней густоты, с густым подростом (древостоем). Для дистанционного различения автогенно и аллогенно формирующихся вариантов растительности на зарастающих пашнях анализировали особенности пространственной структуры древесной растительности. В результате автогенной сукцессии на пашне формируются участки древесной растительности с относительно равномерным размещением деревьев по площади при их высокой сомкнутости. При аллогенной сукцессии в зависимости от интенсивности и частоты травяных палов древесная растительность может отсутствовать, присутствовать в виде единичных деревьев или групп деревьев. На отдельных участках (обычно небольшой площади) размещение особей деревьев может быть сходным с размещением при автогенных сукцессиях, однако такие участки являются элементами более сложной мозаики в пределах угодья.

Зарастающие пашни преобладают по периферии Заокского участка, тяготея к границе Московской и Тульской областей. Из них только 1,8% площади приходится на автогенно зарастающие пашни. Все отмеченные участки автогенно зарастающих пашен граничат со средне- или старовозрастными лесами, обычно они защищены ими полностью либо с нескольких сторон. При практически повсеместном распространении травяных палов условием автогенного протекания восстановительной сукцессии является защищенность

участка лесным массивом либо рекой; однако как показывает анализ карты биотопов, в большинстве случаев небольшие речки и ручьи не являются значимыми препятствиями для распространения огня; леса являются единственной надежной защитой.

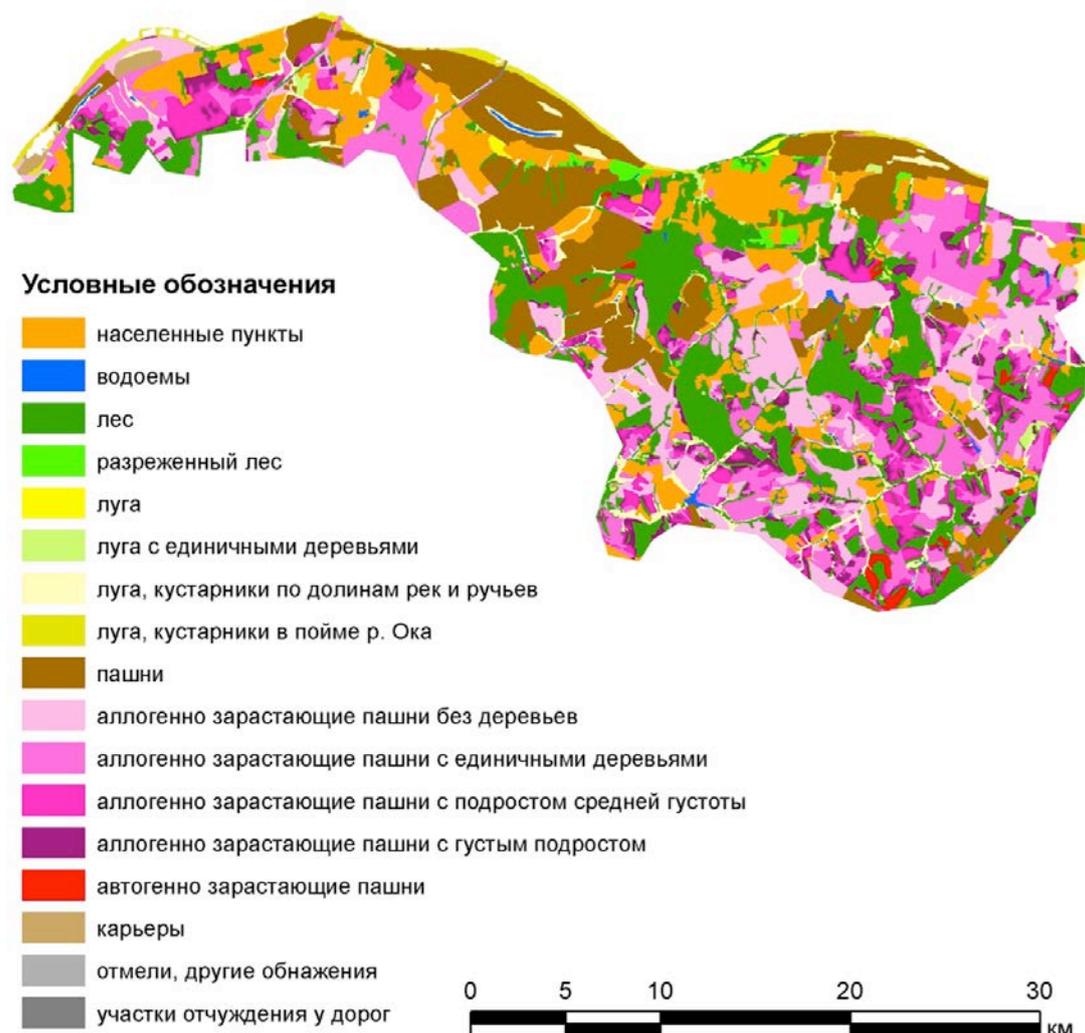


Рис. Карта-схема биотопов на территории Заокского участка Серпуховского района Московской области

98,2% площади зарастающих пашен представляют участки, восстановление растительности на которых прерывалось (или прерывается) травяными палами разной частоты. Из них по площади 37,8% – залежи без деревьев, 31,2% – зарастающие пашни с единичными деревьями, 18,1% – с подростом (древостоем) средней сомкнутости и 10,6% – с подростом (древостоем) высокой сомкнутости. В этом же ряду уменьшаются средние площади контуров: от залежей без деревьев (100,3 га) к залежам с единичными деревьями (42,8 га), участкам со средней сомкнутостью древесной растительности (16,6 га) и высокой сомкнутостью древесной растительности (7,8 га).

Пространственная структура биотопов на Заокском участке Серпуховского района, включая структуру разных вариантов зарастающих пашен, характеризуется большим разнообразием. Здесь представлены разнообразные варианты конфигурационной и композиционной неоднородностей, отражающих формальную структурную неоднородность ландшафта (например, соотношение лесных и нелесных площадей; размеры, форму, изменчивость форм контуров/полигонов) и функционально различные варианты сочетаний угодий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-44-03666.

## **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ЗООПЛАНКТОНА УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ ПРИТОКА РАВНИННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ ЖАРКИХ ЛЕТ**

Болотов С.Э.

*Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок, Россия*  
[alhimikhmu@yandex.ru](mailto:alhimikhmu@yandex.ru)

**Аннотация:** В устьевой области притока по сравнению с рекой и водохранилищем происходит значительное увеличение обилия зоопланктона, регистрируется повышенное видовое богатство, возрастают значения параметров хаотических аттракторов сообществ. Под влиянием погодных термических аномалий снижается фаунистическая и биоценотическая специфика зоопланктона зон устьевой области, а параметры аттракторов сигнализируют о переходе зоопланктоценозов в область патологии.

### **Введение**

Среди многообразия водных объектов бассейнов водохранилищ особое значение имеет изучение малых и средних рек, устьевые области которых формируют обширную площадь специфических пограничных участков. Однако сведения о гидробиологическом режиме устьевых областей притоков равнинных водохранилищ весьма ограничены и противоречивы, и к настоящему времени они оказались фронтиром между относительно изученными экосистемами водохранилищ и малых рек. Системный анализ и синтез экодинамики зоопланктона устьевых областей притоков на основе методов многомерной статистики и теории хаоса и самоорганизации позволяет комплексно охарактеризовать поведение вектора состояния зоопланктоценозов и прогнозировать развитие патогенетических состояний, связанных с нарушениями в системе гомостаза сообществ в изменяющихся условиях среды, в том числе климатических аномалий жарких лет.

### **Объекты и методы**

Зоопланктон собирали планктоботометром 1–2 раза в месяц с мая по октябрь фонового 2009 и аномально жарких 2010–2011 гг. в зоне свободного течения реки Ильдь, зонах ее устьевой области (переходная притока с преобладанием (90%-я обеспеченность) речных вод, фронтальная – со значительными вертикальными градиентами и отчетливым расслоением минерализованных речных и опресненных водохранилищных вод, и переходная приемника – с преобладанием водных масс водохранилища) и Волжском плесе Рыбинского водохранилища. Сообщества зоопланктона характеризовали на основе комплекса 23-х экологически значимых параметров развития, рассчитанных в авторской программе «*FW-Zooplankton*», реализующей также идентификацию параметров хаотических квазиаттракторов (КА), описывающих хаотическое движение вектора состояния зоопланктоценозов в 23-х мерном фазовом пространстве синэкологических параметров. Производили расчет координат граней, их длины и объема  $m$ -мерного параллелепипеда ( $vX$ ), ограничивающего КА, внутри которого варьировал вектор состояния зоопланктоценоза, а также показателя асимметрии между стохастическим и хаотическим центром КА ( $rX$ ).

### **Результаты и их обсуждение**

Наибольшее видовое богатство и специфическая биоценотическая структура характерны для устьевой области притока и, особенно, ее фронтальной зоны. По сравнению с сообществами граничащих водных объектов устьевая область характеризуется наиболее высокими величинами удельного числа видов, численности, биомассы и продукции

зоопланктона. Погодные термические аномалии приводят к нарушению фоновой структуры сходства видового состава зоопланктона зон устьевой области, снижению их фаунистической специфики. Максимальная численность и биомасса планктонных животных в целом за вегетационный период и в каждую дату наблюдений устойчиво отмечается в устьевой области реки. Экстремумы обилия формируются, как правило, во фронтальной зоне, иногда регистрируются в переходной зоне притока или приемника. Основными факторами, определяющими различия обилия сообществ, выступают гидроэкологическая специфика районированных зон и межгодовая погодно-климатическая изменчивость. Анализ влияния экологических факторов среды методом ССА показывает, что структура зоопланктона районированных зон определяется главным образом уровнем их гидрогеоморфологической устойчивости, характеризуемой числом Фруда и температурой воды; в меньшей степени связана с электропроводностью воды и уровнем сапробности. Зоопланктоценозы зон устьевой области значимо различаются по видовой структуре, как между собой, так и в сравнении с граничными водными системами реки и водохранилища. Однако под влиянием сильного прогрева воды в жаркие годы стираются биоценотические различия зоопланктона устьевой области, в частности между фронтальной и переходной зоной приемника.

Максимальные значения основных параметров хаотических квазиаттракторов (КА) сообществ, а именно величины асимметрии центров КА и его объем, как правило, регистрируются во фронтальной зоне устьевой области ( $rX = 14.0 \times 10^5$ ,  $vX = 5.2 \times 10^{61}$ ), которую по совокупности признаков (повышенному видовому богатству и развитию краевого эффекта) мы определяем как зону напряжения – экотон. Минимальные значения параметров КА наблюдали в реке ( $rX = 0.2 \times 10^5$ ,  $vX = 1.3 \times 10^{39}$ ), жестко стабилизированной высокой скоростью течения, и водохранилище ( $rX = 1.1 \times 10^5$ ,  $vX = 1.1 \times 10^{49}$ ). По сравнению с периодом климатической нормы в годы аномальной жары происходит увеличение значений параметров КА, расширение их границ. Это свидетельствует о неудовлетворительной адаптации сообществ зоопланктона к термическому эвтрофированию и сигнализирует об их переходе в область патологии.

Относительно фонового периода в жаркие годы повышается вариабельность поведения вектора состояния сообществ, увеличивается площадь их хаотических аттракторов. Наиболее значительные экологические модификации сообществ зоопланктона, выражаемые отклонением хаотических центров аттракторов для фонового и жаркого года регистрируются в устьевой области притока. По сравнению с фоновым периодом в жаркие годы увеличиваются межаттракторные расстояния, происходит экологическая дифференциация сообществ, а их аттракторы «разбегаются» в многомерном фазовом пространстве друг относительно друга. При этом наиболее сильно от референсных состояний удаляются аттракторы сообществ экотонной фронтальной зоны.

В устьевой области экстремально высокий прогрев воды оказывает наиболее сильное влияние на зоопланктон переходной зоны приемника, где отмечается увеличение его видового разнообразия и выравненности, наблюдается повышение обилия коловраток, происходит увеличение встречаемости и обилия мезо-эвтрофных видов, а плотность и биомасса сообществ возрастает в 2-3 раза. Аналогичные структурные изменения наблюдаются во фронтальной зоне, однако интегральные количественные характеристики сообщества – плотность, биомасса, продукция и объем хаотических аттракторов – по сравнению с фоновым годом практически не изменяются. Это может свидетельствовать о сильной «забуференности» фронтальной зоны, в результате чего здесь, по сравнению с водохранилищем и переходной зоной приемника, наблюдается ослабленная реакция зоопланктона на аномальный прогрев воды.

## **Выводы**

Таким образом, по сравнению с периодом климатической нормы 2009 г. в годы аномальной жары – 2010-2011 гг., когда наблюдали продолжительный (> 1.5 месяца) аномальный прогрев всей водной толщи до 29-33°C, глубокий дефицит растворенного кислорода, гиперцветение синезеленых водорослей и катастрофическое ухудшение качества воды, зоопланктон водной системы характеризовался сильнейшими структурными перестройками, необычно высоким обилием и пребывал на грани «функционального срыва». В этих условиях происходит увеличение значений параметров КА, расширение их границ. Это свидетельствует о неудовлетворительной адаптации сообществ зоопланктона к термическому эвтрофированию и сигнализирует об их переходе в область патологии.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРАСТАНИЯ ВЫРУБОК В ЧЕРНИЧНИКАХ ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Бутусов О.Б.<sup>1</sup>, Редикульцева Н.И.<sup>2</sup>, Никифорова О.П.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), Москва, Россия,*

[butusov-1@mail.ru](mailto:butusov-1@mail.ru)

<sup>2</sup> *Московский гуманитарный университет, Москва, Россия*

[redik\\_ni@mail.ru](mailto:redik_ni@mail.ru)

<sup>3</sup> *Государственный университет управления, Москва, Россия*

[olga.nikiforova2013@yandex.ru](mailto:olga.nikiforova2013@yandex.ru)

**Аннотация:** проведен статистический анализ данных о количестве не облесившихся вырубок в различных типах лесорастительных условий лесов Вологодской обл. С помощью метода наименьших квадратов получены эмпирические модели статистических функций распределения количества заросших вырубок, по которым рассчитан ряд статистических характеристик.

### Введение

Зарастание вырубок является одним из важных процессов, которые необходимо учитывать при моделировании динамики лесного фонда. К числу этих процессов относятся: динамика площадей с различными преобладающими породами, сукцессионные переходы площадей, рубки и пожары, возобновление пород на вырубках и гарях, а также зарастание вырубок (Коровин и др., 2011). Цель данной работы построение эмпирических математических моделей для описания процессов зарастания вырубленных площадей.

### Объекты и методы

Объектом исследования являются статистические данные о количестве вырубок. В таблице 1 приведены статистические данные о распределении не облесившихся вырубок.

Таблица 1. Количество не облесившихся вырубок в черничном типе лесорастительных условий Вологодской обл.

Возраста рубки, лет	Тип леса				Итого
	Ельник черничник	Сосняк черничник	Березняк черничник	Осинник черничник	
1	566	118	132	36	852
2	503	86	100	34	723
3	217	31	33	18	299
4	52	21	5	1	79
5	27	9	2	1	39
6	21	4		2	27
7	3	1			4
8		1			1
9		1			1
10	4	3			7

Данные таблицы 1 были аппроксимированы с помощью метода наименьших квадратов (МНК) и трехпараметрической логистической функции следующего вида:

$n(t) = a_1(1 - e^{-a_2 t})^{a_3}$ , где:  $a_1, a_2, a_3$  - эмпирические параметры,  $n$  - количество не облесившихся вырубок. Для вычисления эмпирических функций распределения использована следующая формула  $F(t) = 1 - \frac{n(t)}{n_{max}}$ , где  $n(t)$  - гладкие кривые, аппроксимирующие данные о количестве не облесившихся вырубок,  $n_{max}$  - начальные значения количества не облесившихся вырубок. Для расчета эмпирических плотностей распределения вероятностей зарастания вырубок использованы следующие формулы, полученные дифференцированием МНК-аппроксимаций:

$$p(t) = a_3(1 - e^{-a_2 t})^{a_3 - 1} \cdot a_2 \cdot e^{-a_2 t} \quad (1)$$

где  $p(t)$  эмпирические плотности распределения вероятностей зарастания вырубок.

### Результаты

Графики результатов аппроксимации количества вырубок и плотности распределения вероятностей зарастания вырубок, рассчитанные по формуле (1) представлены на рисунке 1.

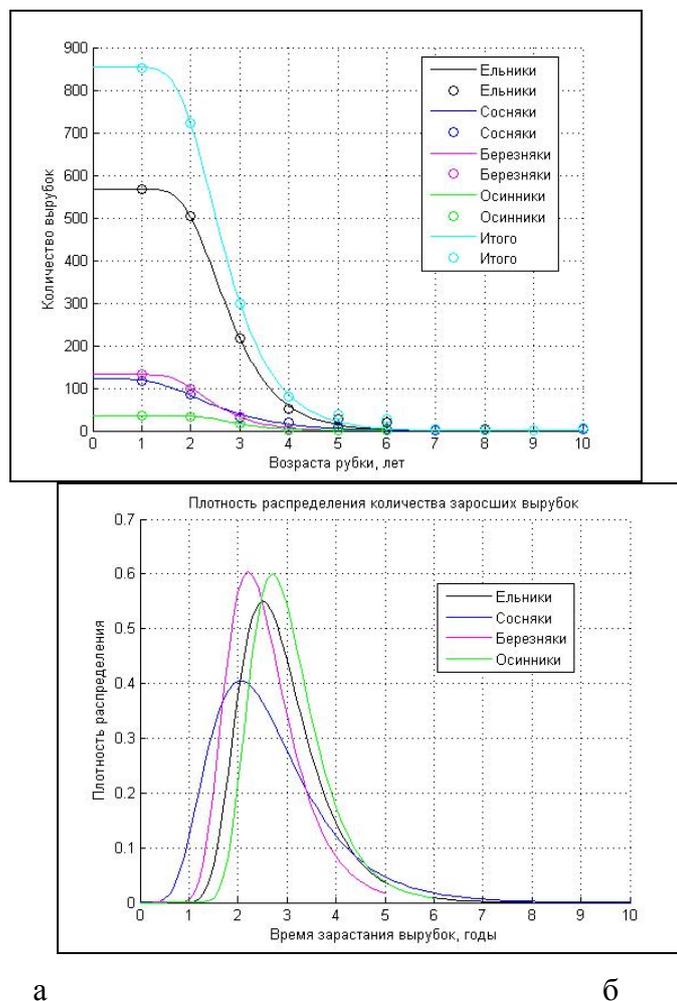


Рисунок 1. Полученные результаты: а - графики аппроксимации количества вырубок;  
 б - плотности распределения зарастания вырубок для различных типов леса

Эмпирические плотности распределения (1) были использованы для расчета оценок математических ожиданий и оценок стандартных отклонений времени зарастания вырубок по следующим формулам:

$$M = \int x \cdot a_3 (1 - e^{-a_2 t})^{a_3 - 1} \cdot a_2 \cdot e^{-a_2 t} dt, \quad \overline{x^2} = \int x^2 \cdot a_3 (1 - e^{-a_2 t})^{a_3 - 1} \cdot a_2 \cdot e^{-a_2 t} dt, \quad \sigma = \sqrt{\overline{x^2} - M^2}$$

где  $M$  – математическое ожидание,  $\sigma$  – стандартное отклонение.

Результаты расчетов представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Численные оценки статистических параметров времени зарастания вырубок

	Ельники	Сосняки	Березняки	Осинники
90% - Квантили, годы	4.026	4.234	3.599	4.092
Математические ожидания, годы	2.903	2.665	2.573	3.064
Стандартные отклонения, годы	0.860	1.189	0.786	0.788

### Выводы

Описанная методика позволяет получать оценки статистических характеристик времени зарастания вырубок в различных типах леса и может быть предложена для математического моделирования и научно обоснованного планирования динамики лесного фонда.

### Литература

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

## ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СКОРОСТЕЙ ТРАНСФОРМАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ОПАДА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Быховец С.С.<sup>1</sup>, Ларионова А.А.<sup>1</sup>, Лебедев В.Г.<sup>2</sup>, Шестибратов К.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия.

[s\\_bykhovets@rambler.ru](mailto:s_bykhovets@rambler.ru)

[larionova\\_al@rambler.ru](mailto:larionova_al@rambler.ru)

<sup>2</sup>Филиал Института биоорганической химии имени академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН, Пущино, Россия.

[vglebedev@mail.ru](mailto:vglebedev@mail.ru)

[shestibratov.k@yandex.ru](mailto:shestibratov.k@yandex.ru)

**Аннотация:** Рассматриваются возможности уточнения параметризации скоростей трансформации растительного опада в модели ROMUL в зависимости от его химического состава, в частности, содержания азота. Показано, что при повышенных концентрациях азота зависимость скорости минерализации от концентрации ослабевает, а оценка скорости гумификации для древесных остатков требует дальнейшего уточнения, в частности, с учетом содержания лигнина.

Модель динамики органического вещества лесных почв ROMUL широко используется для решения задач лесной экологии и почвоведения. Оценка ее параметров, в частности, скоростей минерализации и гумификации растительных остатков была выполнена на основе как литературных данных, так и лабораторных экспериментов и неоднократно уточнялась (Чертов, 1985; Chertov et al., 2001; Моделирование..., 2007; Комаров и др., 2012). Тем не менее, в рамках работы по оценке возможного влияния предполагаемых плантаций трансгенных форм деревьев на биологический круговорот (Комаров и др., 2013), были начаты новые исследования с целью уточнения указанных параметров в более широком диапазоне концентраций азота и лигнина в опадах.

В работе использованы результаты лабораторных экспериментов по разложению растительных тканей (листья, стволы, корни) молодых растений осины и березы (в т.ч. трансгенных), выращенных в вегетационном опыте. Для оценки параметров модели экспериментальные данные аппроксимировались теоретической кривой, основанной на аналитическом решении соответствующих уравнений модели ROMUL для отдельной порции опада  $L_0$  при постоянных коэффициентах:

$$Y(t) = L(t) + F(t) = L_0 \left[ \left( 1 - \frac{k_3}{k_1 + k_3 - k_2} \right) e^{-(k_1 + k_3)t} + \frac{k_3}{k_1 + k_3 - k_2} e^{-k_2 t} \right],$$

где  $Y$  – “неразложившийся остаток” (оцениваемый по кумулятивной эмиссии углерода), в терминах модели представляющий собой сумму неразложившегося ( $L$ ) и частично гумифицированного ( $F$ ) опада,  $k_1$ , – скорость минерализации пула  $L$ ,  $k_2$  – скорость минерализации пула  $F$ ,  $k_3$  – скорость первичной гумификации (образования  $F$  из  $L$ ),  $t$  – время.

Полученные зависимости коэффициентов модели при «стандартных» оптимальных условиях (температура 22°C, влажность субстрата 80% ППВ) от содержания азота (рис. 1) несколько отличаются от полученных ранее, и принятых в современной версии модели ROMUL (Моделирование..., 2007; Комаров и др., 2012). Данные отличия объясняются спецификой анализируемого растительного материала. В частности, расширением диапазона концентраций азота в исследуемом органическом веществе до 3-4% (в ранее исследованных опадах лесных растений обычно не превышали 2%) и большим количеством проб древесины с различным содержанием лигнина, ранее авторами модели исследовавшихся мало.

В частности, коэффициент  $k_1$  в диапазоне концентраций азота 2-4% растет медленнее, чем следует из экстраполяции зависимости, принятой в базовой версии модели. Это достаточно логично, т.к. при высоких концентрациях азот перестает быть основным лимитирующим фактором для сообщества организмов-деструкторов. В то же время, в

диапазоне концентраций 1-2% полученные значения коэффициента в среднем близки к «старой» параметризации, а их относительно большой разброс можно объяснить различными свойствами древесины, в частности, различным содержанием лигнина. Таким образом, в качестве первого приближения для оценки значений коэффициента следует использовать «старую» зависимость при концентрациях азота до 1.5%, и новую – при больших концентрациях.

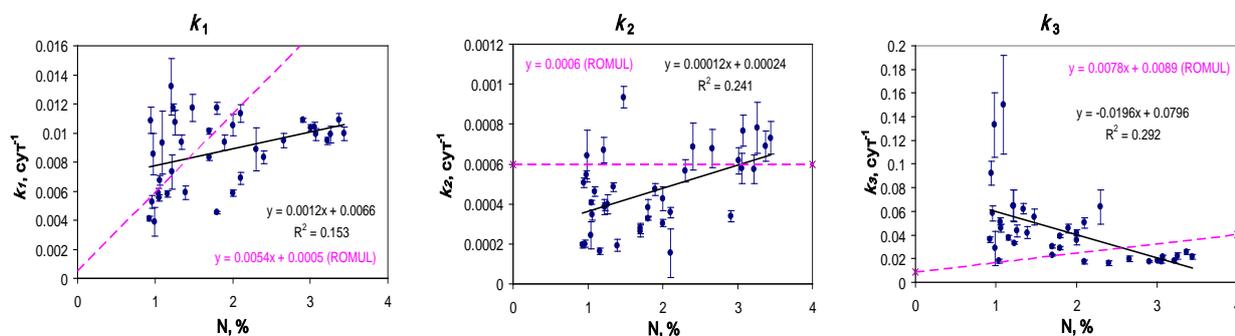


Рисунок 1 - Зависимость скоростей преобразования органического вещества (коэффициентов  $k_1$  -  $k_3$  модели ROMUL) от исходного содержания азота

Коэффициент  $k_2$  в современной версии модели принят постоянным. Полученные в настоящем исследовании значения коэффициента обнаруживают слабую положительную зависимость от концентрации азота на фоне довольно большого разброса значений. Это свидетельствует о том что, с одной стороны, при достаточно широком диапазоне свойств исходного органического вещества, на данной стадии его трансформации до некоторой степени сохраняется зависимость от этих свойств, с другой – концентрация азота является не единственным и, возможно, не главным фактором, определяющим данный процесс.

Коэффициент  $k_3$  (скорость первичной гумификации) на первый взгляд, обнаруживает зависимость противоположную ранее принятой. Однако можно заметить, что точки в правой части графика, соответствующие листьям, все же относительно близки к «старой» прямой, полученной из анализа преимущественно листовых опадов. А наиболее отличающиеся от нее точки в левой части соответствуют одревесневшим побегам (ранее исследованным мало), к тому же, в силу специфики эксперимента, существенно различающимся по биохимическому составу. Таким образом, ранее принятая зависимость  $k_3$  от концентрации азота, хорошо работающая для листовых опадов, требует уточнения для древесных. Улучшить данную параметризацию может, в частности, учет концентрации лигнина.

## Литература

- Комаров А.С., Быховец С.С., Ларионова А.А., Шанин В.Н., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А. Модельная оценка биологического круговорота в лесных плантациях с генно-модифицированными деревьями осины // Материалы 3<sup>й</sup> конференции «Математическое моделирование в экологии» ЭкоМатМод-2013. - Пущино, 2013. - С. 137-138.
- Комаров А.С., Хораськина Ю.С., Быховец С.С., Безрукова М.Г., Чертов О.Г. Моделирование динамики органического вещества и элементов почвенного питания в минеральной почве и лесной подстилке // Математическая биология и биоинформатика. - 2012. - Т. 7. - № 1. - С. 162–176.
- Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Отв. ред. В.Н. Кудеяров. - М.: Наука, 2007. - 380 с.
- Чертов О.Г. Имитационная модель минерализации и гумификации лесного опада и подстилки // Журн. общ. биологии. - 1985. - Т. 46. - № 6. - С. 794-804.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // Ecological Modelling. - 2001. - Vol. 138. - P. 289-308.

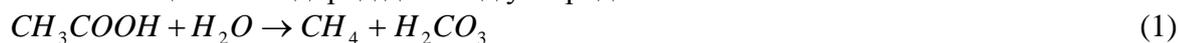
## УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ДИНАМИКУ КОНЦЕНТРАЦИЙ СУБСТРАТА, ПРОМЕЖУТОЧНЫХ И КОНЕЧНЫХ ПРОДУКТОВ, СОДЕРЖАЩИХ $^{13}\text{C}$ , ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ ПУТЕЙ МЕТАНИЗАЦИИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Вавилин В.А., Рыгов С.В.

*Институт водных проблем РАН, Москва, РФ*  
[vavilin@aquas.laser.ru](mailto:vavilin@aquas.laser.ru)

**Аннотация:** Традиционные уравнения, игнорирующие изотопный состав, дополняются дифференциальными уравнениями, описывающими динамику концентраций тяжелых компонентов, содержащих изотоп  $^{13}\text{C}$  (субстрат, промежуточные и конечные продукты, микроорганизмы). При разложении целлюлозы идет синтрофное окисление ацетата, сопровождаемое значительным повышением содержания  $^{13}\text{C}$  в  $\text{CO}_2$ , в свою очередь, приводящим к возрастанию эмпирического коэффициента фракционирования изотопов углерода между  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$

Целлюлоза и гемицеллюлоза являются основными разлагаемыми компонентами в естественных и некоторых технологических системах. В ходе метаногенеза целлюлозного материала участвуют многочисленные микроорганизмы, осуществляющие деполимеризацию (гидролиз), ферментативный кислотогенез, ацетогенез и метаногенез. Основными субстратами для ацетикластических и гидрогенотрофных метаногенных микроорганизмов являются ацетат и водород/диоксид углерода:



Традиционно считается, что вклад ацетикластического метаногенеза составляет около 70% общей продукции метана. Однако, относительный вклад различных ацетикластических и гидрогенотрофных метаногенных микроорганизмов в образование метана может определяться факторами окружающей среды, типом анаэробного реактора и режимом проведения процесса, а также составом микроорганизмов в инокуляте. В присутствии ингибиторов, таких как аммоний и летучие жирные кислоты, доминирующим механизмом метанообразования является процесс, при котором ацетат предварительно окисляется до  $\text{H}_2$  и  $\text{H}_2\text{CO}_3$ :



Эта реакция происходит синтрофно с гидрогенотрофными метаногенами, превращающими  $\text{H}_2$  и  $\text{H}_2\text{CO}_3$  в  $\text{CH}_4$ .

Поскольку величина отношения стабильных изотопов  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  составляет порядка 0,01, она традиционно определяется при помощи величин “приращения”, которые выражаются в промилях ‰ разницы от стандарта PDB:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left[ \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{образец}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}} - 1 \right] \times 1000 \quad (4)$$

где индекс “образец” - образец, PDB - стандарт с высоким содержанием  $^{13}\text{C}$  в карбонате кальция особого моллюска. Для уточнения доминирующего пути превращения целлюлозы в метан часто применяется эмпирический фактор фракционирования изотопов между  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ :

$$\alpha_c^{\text{app}} = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} + 1000}{\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} + 1000} \quad (5)$$

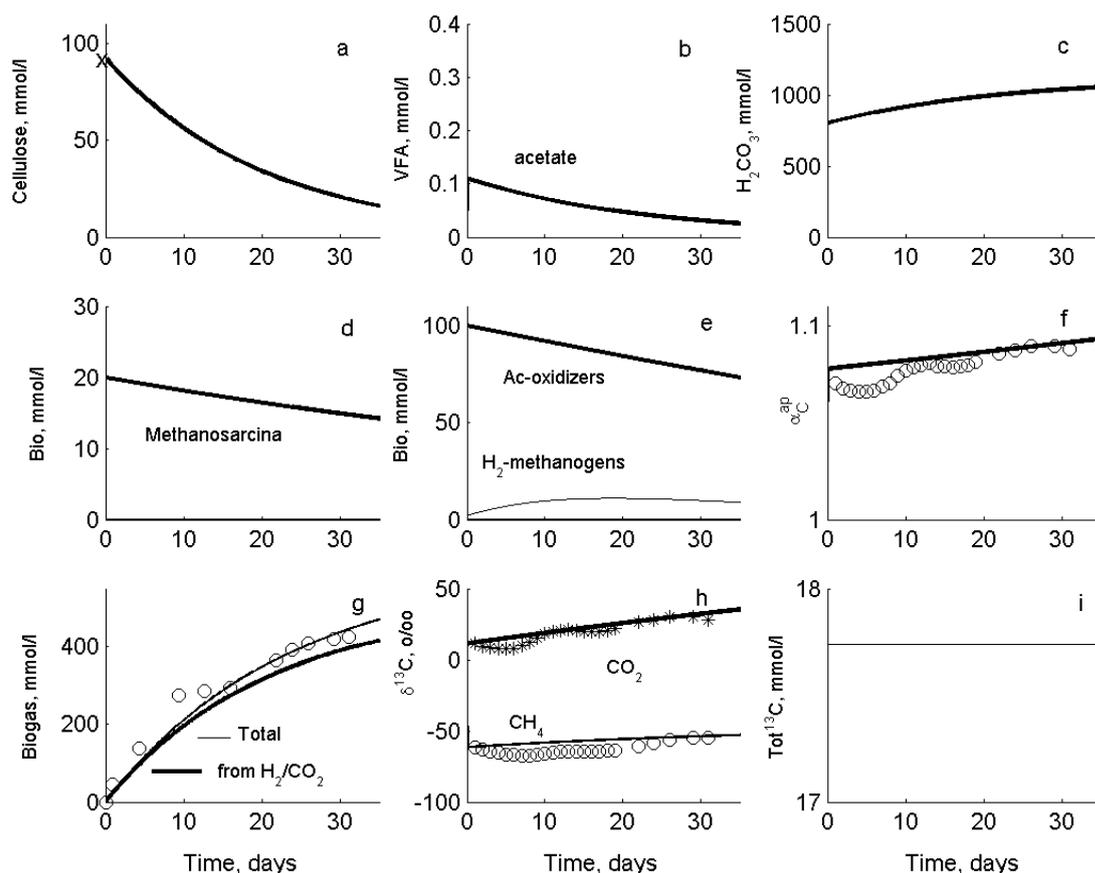
Ранее (Вавилин, Рытов, 2015), для описания динамики изотопа  $^{15}\text{N}$  в процессе превращения нитрата (субстрат) в закись азота (продукт) применялись следующие уравнения:

$$\frac{d^{15}\text{NO}_3^-}{dt} = -\frac{^{15}\text{NO}_3^-}{\text{NO}_3^-} \frac{1}{\alpha_N} \rho(\text{NO}_3^-, \text{Org}, B)$$

$$\frac{d^{15}\text{N}^{14}\text{NO}}{dt} = -\frac{1}{2} (1 - Y_{\text{NO}_3^-}) \frac{d^{15}\text{NO}_3^-}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{d^{15}\text{N}B}{dt} = \frac{dB}{dt} \frac{^{15}\text{NO}_3^-}{\text{NO}_3^-} \frac{1}{\alpha_N}$$

где  $\rho(\text{NO}_3^-, \text{Org}, B)$  - скорость процесса как функция от концентрации нитрата ( $\text{NO}_3^-$ ), органического материала ( $\text{Org}$ ) и денитрифицирующей биомассы ( $B$ );  $^{15}\text{NO}_3^-$ ,  $^{15}\text{N}^{14}\text{NO}$ ,  $^{15}\text{N}B$  - концентрации тяжелых компонентов, соответственно;  $Y_{\text{NO}_3^-}$  - экономический коэффициент,  $\alpha_N$  - фактор фракционирования изотопов. Эти уравнения послужили основой для описания концентраций тяжелых составляющих в ходе разложения целлюлозы.



В итоге было показано, что динамика  $\alpha_C^{\text{ap}}$  определяет доминирующий путь разложения целлюлозы, а именно, синтрофное окисление ацетата.

## Литература

Вавилин В.А., Рытов С.В. Нелинейная динамическая модель фракционирования стабильных изотопов азота в процессе денитрификации с образованием закиси азота // Вод. Рес. - 2015. - № 2. - С.194-198.

## ПРЕИМУЩЕСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ ЭВОЛЮЦИОННО СТАБИЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ КОРМОВОГО ПОИСКА ЛЕСНОЙ КУНИЦЫ *MARTES MARTES L.*

Владимирова Э.Д.<sup>1</sup>, Морозов В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия  
[elyna-well@nm.ru](mailto:elyna-well@nm.ru)

<sup>2</sup>Самарский аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева, Самара, Россия  
[moroz@ssau.ru](mailto:moroz@ssau.ru)

**Аннотация:** эволюционно выработанные стратегии кормового поиска лесной куницы, осуществляемого по ранее сложившимся тропам, обладают признаками эффективности, оптимального распределения затрат и минимизации риска не найти в достаточном количестве искомые кормовые объекты.

Эмпирический материал собран в естественных биотопах обитания лесной куницы методом зимних троплений (пойменные леса Средней Волги). Рассматривается ситуация использования куницами в пищу мышевидных грызунов (основного кормового ресурса) при средних показателях плотности популяций хищника и жертвы. Исследовано поведение взрослых особей *M. martes* обоих полов, резидентов территории. Кормовой поиск проводится куницей на индивидуальной территории, состоящей из нескольких участков. Во время поиска грызунов особь идет «челноком» против ветра или в полветра. Ресурсы одного участка, обычно включающего несколько десятков локусов обитания мышевидных, используются лесной куницей на протяжении 1 – 3 суток, после чего особь переходит к другому участку. Переходы чаще ассоциированы со сменой направления ветра. Между последовательными использованиями одного и того же участка обычно проходит 1.5 – 3 недели. Добывая в среднем трех рыжих полевок в сутки, каждые четвертые сутки *M. martes* может обходиться без добычи (при условии, что особь не растет, не создает соматические запасы в предзимье и не выкармливает потомство). Суммарная область поиска обычно совпадает с индивидуальной территорией особи и конечна. Область поиска, приходящаяся на период в одни сутки, также конечна. Кормовой поиск и переходы ведутся по тропам, сложившимся на территории обитания данной субпопуляции *M. martes* в течение десятилетий. Кормовой поиск осуществляется в условиях ограничения энергетических и временных ресурсов. Положительное подкрепление (в том числе, пищевое), вызывая положительные эмоции, повышает вероятность повторения действия, отрицательное – снижает (Симонов, 2001). Перемещение по ранее сложившимся тропам конспецификов представляет собой форму подражательного поведения, отсроченного во времени. При кормовом поиске куница перемещается по тропе (одной из троп) от одного локуса, предположительно населенного грызунами, к другому, совершая кормопоисковые и исследовательские реакции (тесты  $t$ ) на следах и тропах грызунов, возле зарослей кустарника, отдельных кустов, валежин, стволов деревьев. Локусы обитания мышевидных грызунов могут быть «проработаны» поисковыми и исследовательскими реакциями с различной интенсивностью, в зависимости от поступающей информации (ольфакторной, визуальной и слуховой), результатов тестов и воспоминаний о предыдущих результатах. Покормившись на участке 1 – 2 суток, особь «принимает решение» о продолжении кормового поиска на данном участке или переходит на другой участок. Теоретически, такое решение должно базироваться на накопленном особью опыте положительных подкреплений и максимизировать успешность добычи корма. Резкий градиент антропогенного фактора иногда приводит к элиминации на длительный срок ранее используемых участков. В ситуации высокой доли отрицательных результатов тестов на разных участках, особь переходит на замещающие корма.

Пусть места обитания грызунов  $x^i$  в пределах локуса при перемещении особи по тропе нумеруются последовательно:  $i = \{1, \dots, N\}$ . Комплексный анализ части локуса  $a$

осуществляется с помощью ольфакторного анализатора:  $a \subseteq \{x^1, \dots, x^N\}$ . При перемещении, ориентирующем особь вдоль постоянной тропы, ольфакторные сигналы ассоциируются особью со зрительными, создавая комплексную картину участка в воображении и памяти. Действия во время поиска сопровождаются тестами  $t$ . Результаты тестов, например:  $t(i) = 0$ ,  $t(i+1) = 0$ . Тест может отражать реальную ситуацию наличия грызунов в месте  $x^i$  обитания грызунов в пределах локуса (входящего в состав участка), либо давать ошибочный отрицательный результат. Комплексный анализ позволяет разделять область поиска на подобласти, минимизируя число проб (Альсведе, Вегенер, 1982). Ольфакторная оценка части локуса  $a$  позволяет осуществлять объединенные тесты, при которых куницей принимаются во внимание только положительные результаты тестов. Увеличивая протяженность участка  $a$  до пределов возможностей ольфакторного восприятия, особь повышает вероятность появления положительных результатов тестов.

Скорость перемещения лесной куницы по ходу кормового поиска не может быть высокой, она должна быть сопоставимой с физиологическими возможностями ольфакторного анализатора особи так, чтобы за один дыхательный цикл (вдох-выдох) особь проходила расстояние  $l_1$ , не превосходящее  $l_2$ , где  $l_2$  – дальность распознавания запаха полёвок, находящихся под снегом, обусловленная физиологическими возможностями организма и погодными условиями (воздух поднимается от земли на поверхность снежного покрова вдоль стеблей и стволов):

$$a \leq l_1 \leq l_2. \quad (1)$$

Низкая скорость характерна для локомоции *M. martes* шагом и двухчеткой, высокая – для локомоции галопом. При кормовом поиске куницы идут в пределах локуса обитания мышевидных грызунов медленными аллюрами. Выполнению неравенств (1) также способствует ход челноком (виляющий ход), уменьшающий расстояние по прямой (между начальной и конечной точками траектории), приходящееся на несколько дыхательных циклов, осуществляемых перемещающейся особью. Положительный результат кормопоискового теста обычно вызывает повторные реакции поиска особи в данном локусе. Результаты отдельных поисковых тестов и информации, поступившей от объединенных ольфакторных проб частей локусов  $a \approx \{x^{i-1}, x^i, x^{i+1}\}$ , сохраняются некоторое время в памяти особи. Переход к другому кормовому участку может осуществляться *M. martes* по прошествии нескольких суток при условии средней успешности кормодобычи, также он может быть инициирован на сутки – двое раньше обычного срока переменой погоды, чаще сопровождающейся сменой ветра, или низкой успешностью добычи. Переходя на другой участок при смене ветра, особь как бы фиксирует в памяти информацию и последовательные результаты текущей серии тестов, наработанных на данном участке, ассоциированные с теми или иными местами обитания грызунов ( $x^{i-1}, x^i, x^{i+1}$ ) и общим направлением перемещения. Нахождение искомого объекта повышает вероятность продолжения кормового поиска в данном локусе. Следы успешного кормового поиска гетероспецификов близкой экологии, населяющих эту же территорию, приводят к осуществлению особью *M. martes* кормопоисковых реакций. Таким образом, комплексная оценка лесной куницей подобласти поиска, дифференцированной результатами тестов, снижает энергетические затраты особи, а простое осуществление подражательного поведения освобождает особь от необходимости принятия рискованных решений по выбору мест кормового поиска.

## Литература

- Альсведе Р., Вегенер И. Задачи поиска. - М.: Мир, 1982. - 367 с.  
Симонов П.В. Лекции о работе головного мозга. – М.: Наука, 2001. – 95 с.

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ БЛОК ГИС В ЦЕЛЯХ ГОРОДСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Воробьева Т.А.<sup>1</sup>, Голубева Е.И.<sup>2</sup>, Могосова Н.Н.<sup>3</sup>, Тульская Н.И.<sup>4</sup>

*Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>1</sup>[tvorobyova@yandex.ru](mailto:tvorobyova@yandex.ru), <sup>2</sup>[egolubeva@gmail.com](mailto:egolubeva@gmail.com), <sup>3</sup>[eletto@mail.ru](mailto:eletto@mail.ru), <sup>4</sup>[tnadya@mail.ru](mailto:tnadya@mail.ru)

**Аннотация:** Рассмотрена структура ГИС для комплексной эколого-градостроительной оценки территории города. Показаны факторы, которые необходимо учитывать для интегральной оценки экологического состояния территории города.

### 1. Введение

Изменение природной среды, достигшее в последние десятилетия глобальных размеров, во многом вызвано стремительной урбанизацией. В процессе урбанизации формируется специфические городские ландшафты, в которых на небольшой площади сконцентрированы основные промышленные, транспортные, общественные и жилые объекты, соседствующие с природными компонентами среды (Перельман, Касимов, 1999). Экологические и социальные условия являются основными факторами определяющими качество городской среды. Решение экологических проблем должно занимать одно из важнейших мест в городском планировании. ГИС является одним из наиболее оптимальных инструментов исследования городской среды. Основной задачей геоинформационного моделирования является поддержка городского управления качеством окружающей среды, особенно для принятия решений с целью повышения экологической безопасности населения. Эффективность анализа текущей экологической ситуации вместе с выявлением причинно-следственных связей между природными средами, социально-экономическими условиями и здоровьем населения во многом зависят от информационной поддержки.

### 2. Методология

Методологические принципы проведения оценки экологического состояния территории города базируются на нормировании уровня техногенного воздействия и состояния компонентов окружающей среды (ПДВ, ПДС, ПДК и др.). В связи с этим комплексный анализ городской среды, с применением ГИС должен осуществляться на основе интегральных оценок различных факторов (рисунок 1):

- природные факторы (геоморфологические, климатические характеристики, степень устойчивости ландшафтов);
- факторы состояния окружающей среды (загрязнение атмосферного воздуха, почвенного покрова, водных объектов и др.);
- градостроительные характеристики (функциональное использование, плотность застройки, степень озелененности и др.);
- медико-географические и социально-гигиенические факторы (плотность населения, медико-демографические показатели, заболеваемость).

Особое значение при составлении интегральной оценки экологической напряжённости городской территории необходимо уделить тем территориальным единицам, по которым будет производиться анализ. А.Г Исаченко считал, что для общей экологической оценки необходимо использовать ландшафтный подход, при котором объектом исследования служит геосистема (Исаченко, 1992). Однако при таком исследовании можно говорить только о совокупности природных условий, влияющих на жизнь людей, тогда как при крупномасштабном исследовании городской территории большее значение приобретают техногенные факторы дифференциации (Макаров и др., 2002).



Рисунок 1 - Структура ГИС для комплексной эколого-градостроительной оценки территории города

Поэтому, при экологической оценке городской среды необходимо опираться на территориально планировочные единицы. Это могут быть, как административные или муниципальные районы города, так и более дробные кадастровые сектора и районы, в зависимости от масштабов исследования и функционального назначения территории.

### 3. Заключение

Комплексная экологическая оценка городской территории является неотъемлемой частью городского планирования. Она позволяет обеспечить реализацию генерального плана города в части эколого-градостроительных требований с применением экономических, правовых и административных механизмов, включающих мероприятия по снижению воздействия на окружающую среду, реабилитацию природных территорий тем самым благотворно влияя на качество жизни населения города. Такая оценка не возможна без применения современных методов исследования, в частности ГИС

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-05-01788а)*

### Литература

- Исаченко А. Г. Ресурсный потенциал ландшафта и природно-ресурсное районирование// Изв. РГО. 1992 Т.124 Вып.3. с.94-115.
- Макаров В.З., Новаковский Б.А., Чумаченко А.Н. Эколого-географическое картографирование городов. - М. Научный мир, 2002.-196 с.
- Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. - М.:Астрей-2000, 1999.-768 с.

## КАЧЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОПУЛЯЦИЙ ИКСОВОГО КЛЕЩА И ЕГО ПРОКОРМИТЕЛЕЙ

Вшивкова О.А.<sup>1,3</sup>, Хлебопрос Р.Г.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>ФГБУН Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

[oavshivkova@mail.ru](mailto:oavshivkova@mail.ru)

**Аннотация:** В работе приведена качественная модель взаимодействия популяций клеща и его прокормителей – мелких млекопитающих.

Доминирующую роль в питании популяций иксодового клеща на преимагинальных стадиях развития играет кровь мелких лесных грызунов. Таким образом, популяцию мелких млекопитающих можно считать регулятором плотности клеща, а также одним из достаточных условий наличия клеща в экосистеме. Именно этот феномен и был взят в основу при построении качественной модели.

Математическую модель взаимодействия популяций иксодовых клещей и мелких млекопитающих строили в виде системы разностного и дифференциальных уравнений.

В модель вошли следующие параметры:  $N$  - количество яиц в кладке одной самки клеща;  $\eta_1$  - вероятность кладки яиц самкой в подстилку;  $\eta_2$  - вероятность превращения яйца в личинку;  $\eta_3$  - вероятность перехода «личинка–нимфа»;  $\eta_i(n)$  - вероятность перехода «нимфа–имаго», где  $i$ , в зависимости от экологических условий местности, равно 4 или 5;  $\gamma$  - доля самок в популяции клеща;  $n$  - плотность популяции мелких млекопитающих;  $u_1, u_2, \dots, u_v$  - абиотические факторы в экосистеме.

Наличие и отсутствие иксодового клеща в экосистеме определяется значением мальтузианского параметра популяции. Для реально существующих популяций характерно значение мальтузианского параметра  $\alpha > 1$ ; в случае, когда для популяции характерно значение мальтузианского параметра  $\alpha < 1$  - такая популяция вымирает.

$$\alpha = \varphi(n, u_1, u_2, \dots, u_v). \quad (1)$$

Произведение вероятностей кладки яиц самкой, переходов «яйцо-личинка», «личинка-нимфа», «нимфа-имаго», умноженное на число яиц в кладке, считали вероятностью перехода «яйца одной кладки-имаго» или мальтузианским параметром популяции клеща  $\alpha$ . При заданных значениях  $u_v$  и  $n$  (1) можно записать в виде (2):

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

Вероятности переходов «личинка-нимфа» и «нимфа-имаго» в зависимости от плотности популяции мелких млекопитающих можно описать кривыми S-образного типа, выходящей не из начала координат. Начальное значение кривой при отсутствии в данном месте мелких прокормителей определяется наличием других видов теплокровных (например, гнездящимися на земле птицами).

Вероятности кладки яиц самкой и перехода «яйцо-личинка» не зависят от плотности прокормителей клеща. Функциональные зависимости S-образного типа для вероятностей «личинка-нимфа» и «нимфа-имаго» были записаны уравнениями типа уравнения Ферхюльста, которое довольно хорошо описывает зависимости такого рода. Таким образом, вероятности всех переходов жизненного цикла иксодового клеща были записаны в виде системы уравнений (3):

$$\begin{cases} \frac{d\eta_1}{dn} = 0 \\ \frac{d\eta_2}{dn} = 0 \\ \frac{d\eta_3}{dn} = \alpha_3\eta_3 - \beta_3\eta_3^2, \text{ где } \beta_3 \geq \alpha_3 \\ \frac{d\eta_4}{dn} = \alpha_4\eta_4 - \beta_4\eta_4^2, \text{ где } \beta_4 \geq \alpha_4 \end{cases} \quad (3)$$

В данном случае отношение  $\frac{\alpha_3}{\beta_3}$  отражает отношение площади, по которой могут перемещаться личинки от места кладки, к площади, по которой разносятся личинки прокормителями; отношение  $\frac{\alpha_4}{\beta_4}$  отражает отношение площади, по которой могут перемещаться нимфы от места линьки личинок, к площади, по которой разносятся нимфы прокормителями.

Решения системы (3) были записаны в виде (4):

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

В силу (2) зависимость мальтузианского параметра  $\alpha$  от плотности мышевидных грызунов  $n$  можно выразить кривыми, представленными на рисунке 4.6.

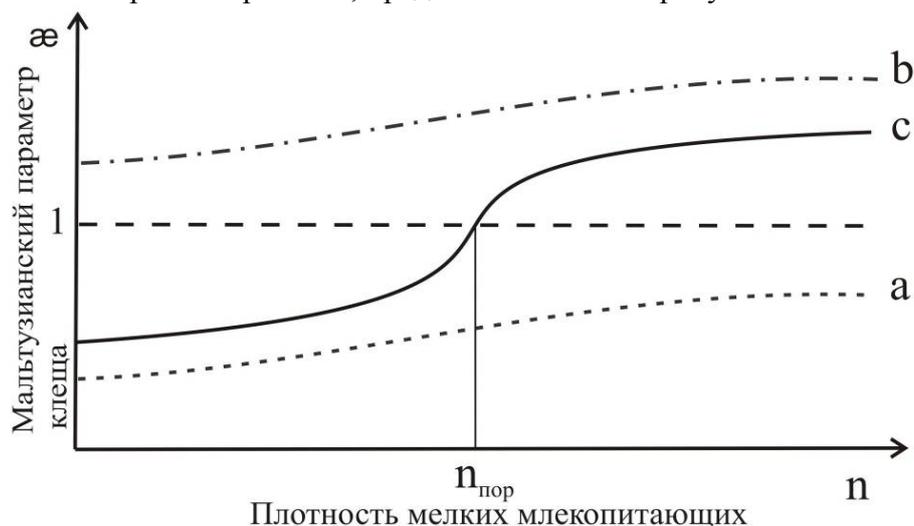


Рисунок 1 – Зависимость величины мальтузианского параметра популяции клещей  $\alpha$  от плотности мышевидных грызунов в экосистеме

Из рисунка 1 видно, что если мальтузианский параметр популяции клеща представлен кривой «а», то снижать численность мелких млекопитающих нет необходимости, т.к. клещ в этих экосистемах отсутствует; если решение можно получить в виде кривой «б», то способ элиминации клеща путем регулирования численности мелких грызунов осуществить невозможно (на территориях такого типа в развитии клеща на преимагинальных стадиях участвуют другие прокормители); кривая «с» иллюстрирует случай, когда снижение численности мелких млекопитающих до значения ниже порогового, приведет к положительному результату – практически полному исчезновению популяции клеща: достаточно перевести плотность мышей в экосистеме в область левее  $n_{пор}$ . Если  $n < n_{пор}$ , тогда  $\alpha(n) < 1$  – и клещ из экосистемы будет элиминирован.

## МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЯВЛЕНИЯ ПРОТО-РАСТЕНИЯ

Галицкий В.В.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия  
[galvv@rambler.ru](mailto:galvv@rambler.ru)

**Аннотация:** распространение секционной модели системы ветвей дерева на диапазон параметра модели  $\mu$  (0,1) показало наличие ветвей. Эндосимбиоз цианобактерий и протиста моделируется как рост групп точек на отрезке при начальном ограничении числа точек в группах. Показано наличие начального торможения роста размера множества и затем его экспоненциального роста, аналогично высшим растениям.

В работе (Galitskii, 2012) была представлена секционная модель системы ветвей всех порядков дерева. Приложение этой модели системы ветвей к натурным данным (Цельникер, 1994) о временах жизни ветвей  $t_{D,j}$  четырех порядков ( $j=1, \dots, 4$ ) ели обыкновенной показало, что в этом случае кроме системы регулярных ветвей, описываемой этой моделью, необходимо учитывать также известную особенность ели - начальное торможение роста (Казимиров, 1971). Ниже обсуждаются некоторые следствия трактовки аллометрического параметра модели  $\mu$ , связывающего зеленую биомассу  $V$  дерева с ее геометрическим размером

$$V \sim H^\mu, \quad (1)$$

как *фрактального*, и распространения модели на диапазон  $\mu$  (0,1). Для ели было получено значение  $\mu \approx 1.83$ , лежащее в диапазоне [1, 2), который соответствует множествам, состоящим из линейных элементов (хвоя) (Федер, 1991).

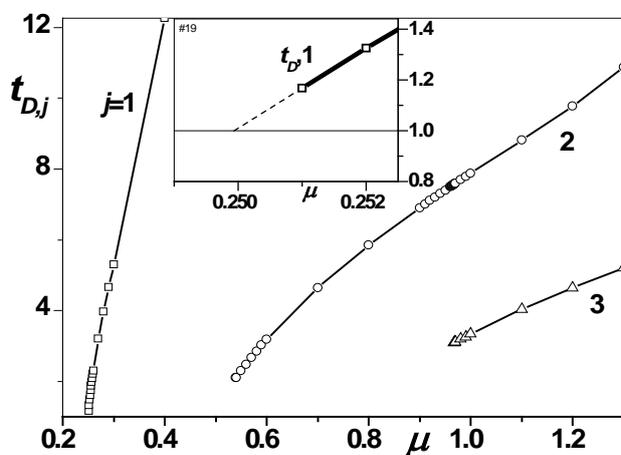


Рис. 1

На рисунке. 1 представлены зависимости времен жизни  $j$ -ветвей  $t_{D,j}(\mu)$  ( $j=1, 2, 3$ ) для диапазона  $\mu$  (0,1), который согласно представлениям фрактальной геометрии соответствует точечным множествам. Наличие в нем ветвей указывает на то, что зеленая биомасса растения в этом случае существует в виде зеленых “точек”, чего в современной растительности визуально не наблюдается.

Согласно (Маргелис, 1983), хлоропласты современных растений являются прошедшими эволюционные

преобразования потомками цианобактерий, когда-то вступившими в эндосимбиоз с протистами, которые на несколько порядков крупнее их. Это позволяет рассматривать поглощенные цианобактерии как  $N_p$  фотосинтезирующих точек на отрезке внутри организма хозяина эндосимбиоза и применить алгоритм *клеточной размерности* фрактальной геометрии для анализа соотношения (1).

Получено, что для равномерных размещений точек  $\mu$  близко или равно 1. Обычно рассматриваемые (Федер, 1983) канторовские точечные множества фактически являются групповыми. Для групповых размещений точек на отрезке  $\mu$  демонстрирует: 1) величина  $\mu$  практически не зависит от  $A$  – относительной величины *скважности* шагового размещения групп; 2)  $\mu$  зависит от типа размещения точек в группе; 3)  $\mu$  при малом фиксированном числе групп  $N_g$  ( $=2$ ) и росте числа точек в группе  $n_g$  слабо растет, оставаясь чуть меньше 1; 4)  $\mu$

при малом фиксированном числе точек в группе  $n_g=2$  и росте числа групп  $N_g$  уменьшается от 1 до  $\approx 0.25$ ; 5) при шаговом размещении групп  $\mu$  довольно устойчиво к случайным и довольно большим отклонениям положений групп.

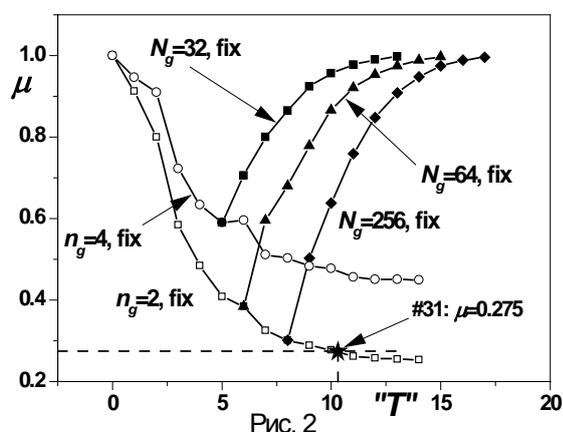


Рис. 2

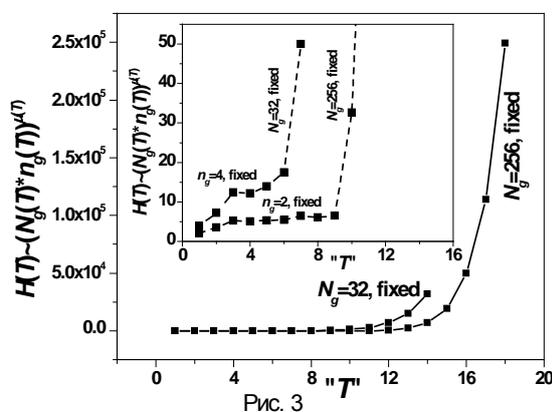


Рис. 3

На рисунке 2 приведены в двумерном изображении некоторые возможные трехмерные траектории зависимостей  $\mu(N_g, n_g)$ , составленные из двух участков – 1)  $\mu_N = \mu(N_g)$  (пустые значки), 2)  $\mu_n = \mu(n_g)$  (залитые значки) при фиксированном  $N_g$ . По оси абсцисс – время “ $T$ ” в виде числа удвоений общего числа точек  $N_p = N_g * n_g$ . Траектория ( $n_g = 2, N_g = 256$ ) на плоскости  $(N_g, n_g)$  является одной из возможных в начале эволюции протораствения в ходе эндосимбиоза, соответствует известным представлениям о возникновении и эволюции эндосимбиогенеза и обеспечивает монотонный рост размера  $H$  системы фотосинтезирующих точек вместе с зеленой биомассой (числом точек) протораствения. Можно отметить, что вычисленное значение  $\mu \approx 0.25171$  весьма близко к значению  $\mu \approx 0.25049$  появления 1-ветви (Рис. 1, врезка), полученному по *натурным* данным. Эти значения получены способами, никак не связанными друг с другом.

На рисунке 3 приведены зависимости размера фотосинтезирующей системы  $H(T)$ , вычисленные по (1) с использованием  $\mu(T)$  из рисунка 2, демонстрируется слабый начальный рост размера  $H$ , пока эволюция не даст “хозяину” возможность более свободного размножения цианобактерий. Продолжительность этапа начального торможения роста зависит от траектории эволюции системы в плоскости  $(N_g, n_g)$  и свойств линейного размещения “точек”, причем, чем медленней идет эволюция (больше начальных шагов при фиксированном  $n_g$ ), тем дольше и глубже торможение.

В соответствии с современной эволюционной теорией (биогенетический закон) “в эмбриональном развитии иногда должны воспроизводиться этапы эволюционной истории” (Борисов и др. 2010), т.е. возможны т.н. рекапитуляции. Как видно из предыдущего, начальное торможение роста имело место на стадии формирования протораствения, т.е. лежит в основании эволюции, давшей современные растения. По-видимому, начальное торможение роста, показанное моделированием системы ветвей ели обыкновенной (Галицкий, 2012), может рассматриваться как рекапитуляция. Вычислительные ресурсы предоставлялись Межведомственным Суперкомпьютерным Центром.

## Литература

- Борисов Н.М., Воробьев Ф.Ю., Гиляров А.М., Еськов К.Ю., Журавлев А.Ю., Марков А.В., Оскольский А.А., Петров П.Н., Шипунов А.Б. Доказательства эволюции. Ред. А.В. Марков. 2010. <http://evolbiol.ru/evidence.htm>  
 Казимиров Н.И. Ельники Карелии. Л.: Наука. 1971. 139 с.  
 Маргелис Л. Роль симбиоза в эволюции клетки. Пер. с англ. М.: Мир. 1983. 352 с.  
 Федер Е. Фракталы. Пер. с англ. М.: МИР. 1991. 260 с.  
 Цельникер Ю.Л. Структура кроны ели // *Лесоведение*. 1994, (4): 35-44.  
 Galitskii V.V. Biomass Dynamics of Higher-Order Tree Branches: An Analysis of the Model // *Biology Bulletin Reviews*. 2013, 3(5): 412-421.

## ТРАЕКТОРИИ ЭВОЛЮЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ ПАРАМЕТРОВ СЕКЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЗЕЛЕННОЙ БИОМАССЫ КРОНЫ ЕЛИ

Галицкий В.В.

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

[galvv@rambler.ru](mailto:galvv@rambler.ru)

**Аннотация:** распространение секционной модели системы ветвей ели на диапазон (0,3) параметра модели  $\mu$  показало монотонный рост с  $\mu$  времен жизни ветвей всех порядков и наличие двух скачков. Продемонстрированная необходимость учета как начального торможения роста дерева так и межмутовочных ветвей указывает на структурную обусловленность скачков и их связь с эволюцией дерева.

В статье (Галицкий, 2012) была представлена секционная модель динамики зеленой биомассы системы ветвей всех порядков ели обыкновенной, включающая модель *регулярных* ветвей с дополнениями субмоделями начального торможения роста (Казимиров, 1971) и межмутовочных ветвей (Крамер, Козловский, 1983; Трескин, 1973), всего четыре варианта. Комбинированная полная модель была параметризована на натуральных данных о временах жизни  $t_{D,j}$  ветвей всех  $j$ -порядков (Цельникер, 1994), причем было показано, что без учета начального торможения реальная система ветвей никакого современного дерева не может быть адекватно описана только моделью регулярных ветвей. Следует отметить, что реальная динамика ветвей всех порядков *ели* получается при использовании только 4-х чисел – времен жизни ветвей.

Все четыре варианта модели системы ветвей (с параметрами ели обыкновенной) были распространены на диапазон [1,3) фрактального (аллометрического) параметра  $\mu$ , который связывает зеленую биомассу  $V$  и размер  $H$  фотосинтезирующей системы:

$$V \sim H^\mu \quad (1)$$

Из 4-х моделей здесь рассматриваются две: модель динамики системы регулярных ветвей + субмодель начального торможения и эта дополненная модель + субмодель межмутовочных ветвей. Для них на рисунках 1 и 2 представлены зависимости  $t_{D,j}(\mu)$ .

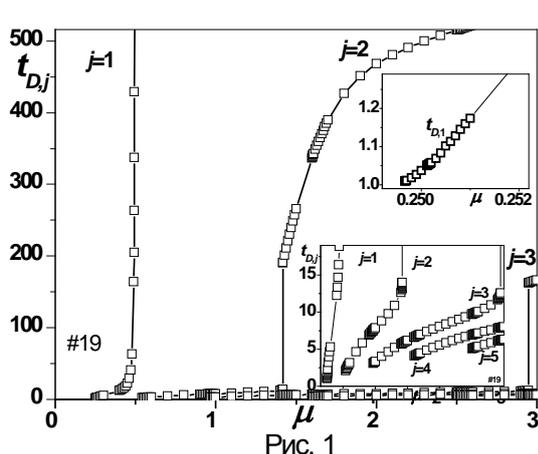


Рис. 1

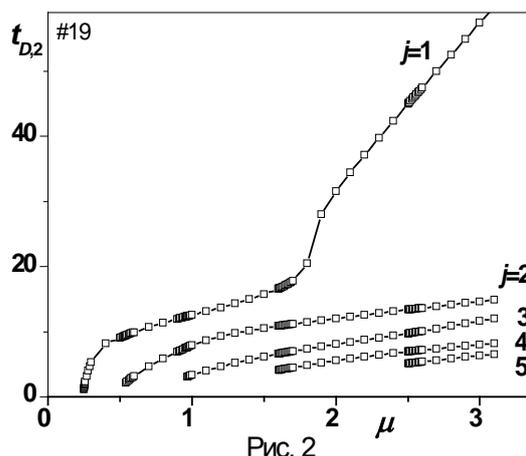


Рис. 2

Зависимости рисунка. 1 (Галицкий, 2012, выборка 1 натуральных данных, #31) показывают наличие ветвей 4-х порядков, время жизни которых постепенно растет с ростом  $\mu$ . При этом имеются разрывы зависимостей:  $t_{D,2}(\mu)$  для  $\mu=1.419$  (#19) и  $\mu=1.357$  (#31),  $t_{D,3}(\mu)$  для  $\mu=2.949$  (#19) и  $\mu=2.907$  (#31). Рисунок 2 демонстрирует те же зависимости при добавлении субмодели межмутовочных ветвей – разрывы отсутствуют. Было показано, что тем самым эволюцией был “исправлен” физиологический недостаток системы ветвей “прото-ели”. Это могло быть связано с достаточно резким увеличением освещенности, к которому флюэзная система у имевшихся на тот момент хвойных (и возможно, не только) деревьев не была

готова. Образовались или выжили те виды, которые реализовали адекватные способы транспорта избытка ассимилятов. Для ели обыкновенной этим способом оказался механизм появления межмутовочных ветвей (Крамер, Козловский, 1983; Казимиров, 1971; Трескин, 1973). По-видимому, та же проблема другим способом была решена, например, для сосны.

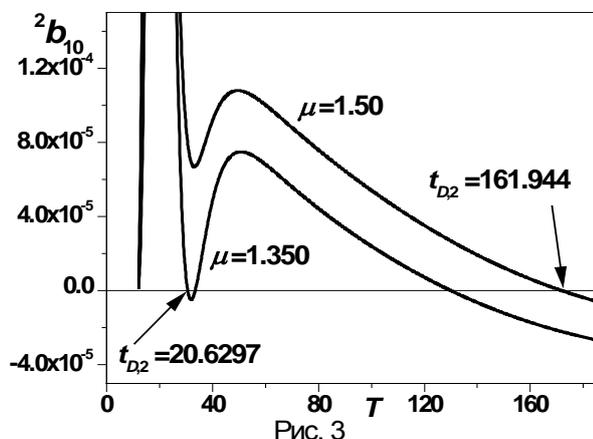
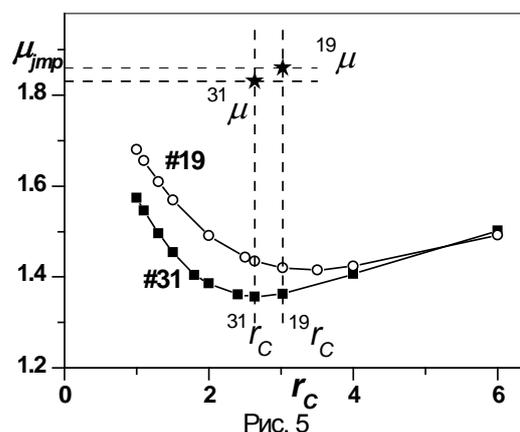
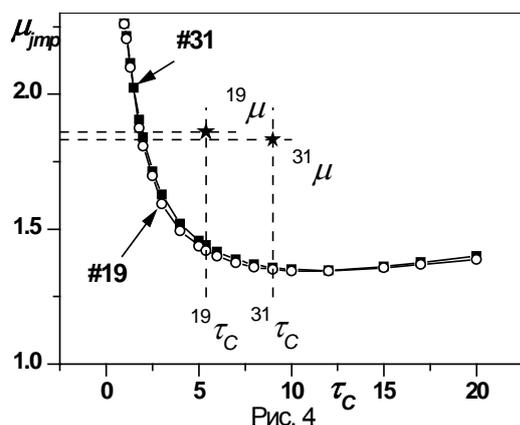


Рисунок 3 объясняет кинематику механизма возникновения разрывов зависимости  $t_{D,2}(\mu)$  – деформация знакопеременной функции – динамики биомассы 2-ветви  ${}^2b_{10}(T)$  при изменении какого-либо параметра модели (на рисунке – параметра  $\mu$ ), детали см. в (Галицкий, 2012).

На рисунках 4 и 5 представлены зависимости положения  $\mu_{jnp}$  разрыва  $t_{D,2}(\mu)$  (рисунок 1) от параметров функции торможения роста (Галицкий, 2012, выборки 1 (#31) и 2 (#19)) –  $\tau_C$  (продолжительность торможения) и  $r_C$  (его глубина). Звездочками показаны по-



ложения реальных деревьев (выборки 1 (#31) и 2 (#19)). Аналогичные зависимости приводятся для величины  $\Delta t_{D,2}$  скачка зависимости  $t_{D,2}(\mu)$  и от других параметров модели.

Анализ модели системы ветвей дерева и ее приложение к натурным данным о продолжительности жизни ветвей всех  $j$ -порядков ели обыкновенной (Галицкий, 2012) приводит к заключению, что такие данные могут в компактной форме фактически описывать морфологию кроны дерева в динамике и оказаться весьма полезными для решения достаточно широкого круга задач морфологии растений и других разделов ботаники и физиологии деревьев — от классификационных задач и до происхождения растений (Галицкий, 2012). Вычислительные ресурсы предоставлялись Межведомственным Суперкомпьютерным Центром.

## Литература

- Галицкий В.В. Динамика биомассы ветвей высших порядков дерева. Модельный анализ // Журн. общ. биол. 2012. 73(6): 442-452.
- Галицкий В.В. Об эволюции формы дерева по фрактальному параметру. 2013. <http://vixra.org/abs/1311.0105>
- Казимиров Н.И. Ельники Карелии. Л.: Наука. 1971, 139 с.
- Крамер П.Д., Козловский Т.Т. Физиология древесных растений. М.: Лесная Промышленность. 1983. 462 с.
- Трескин П.П. Закономерности морфогенеза скелетной части кроны взрослой ели // Структура и продуктивность еловых лесов южной тайги. Л.: Наука. 1973, 222-240.
- Цельникер Ю.Л. Структура кроны ели // Лесоведение. 1994, (4): 35-44

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ МЕТАНА НА ВАСЮГАНСКОМ БОЛОТЕ, ИЗМЕРЕННОЙ АВТОМАТИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ "FLUX-NIES"

Глаголев М.В.<sup>1,2,3</sup>, Сабреков А.Ф.<sup>3</sup>, Краснов О.А.<sup>4</sup>, Фофонов А.В.<sup>4</sup>, Терентьева И.Е.<sup>2</sup>,  
Максютов Ш.Ш.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*  
[m\\_glagolev@mail.ru](mailto:m_glagolev@mail.ru)

<sup>2</sup> *Томский государственный университет, Томск, Россия*  
[kleptsova@gmail.com](mailto:kleptsova@gmail.com)

<sup>3</sup> *Институт лесоведения РАН, пос. Успенское (Московская обл.), Россия*  
[sabrekovaf@gmail.com](mailto:sabrekovaf@gmail.com)

<sup>4</sup> *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*  
[krasnov@iao.ru](mailto:krasnov@iao.ru)

<sup>5</sup> *National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan*  
[samil@nies.go.jp](mailto:samil@nies.go.jp)

**Аннотация:** с помощью развитаемой математической модели рассчитана динамика эмиссии метана из пяти растительных ассоциаций на Васюганском болоте. Результаты вычислений вполне удовлетворительно совпали с величинами эмиссии, измеренными камерным методом (автоматизированным комплексом "FLUX-NIES").

### 1. Введение

Одним из возможных путей оценки и предсказания эмиссии метана является использование математических моделей, учитывающих физические и биологические процессы цикла метана (Cao et al., 1995). Но прежде, чем использовать такие модели в региональном масштабе, необходимо осуществить их проверку в отдельных географических точках. Целью настоящей работы явилась проверка одной из математических моделей на массиве экспериментальных данных, полученных в зоне южной тайги Западной Сибири.

### 2. Объекты и методы

Измерения проводились в 2014 г. (с мая по сентябрь включительно) на Бакчарском болоте, представляющем собой северо-восточный отрог Большого Васюганского Болота. Данный исследовательский полигон был хорошо изучен и описан ранее – см., например, (Глаголев и Шнырев, 2007; 2008; Глаголев, 2010). Автоматизированный измерительный камерный комплекс «FLUX-NIES» подробно описан в (Краснов с соавт., 2013).

Для расчетов использовалась модель, аналогичная моделям MEM и WMEM (Cao et al., 1995; 1996). Описание модели и текст ее реализации в виде программы на языке MATLAB приведен в (Глаголев, 2010). Однако по сравнению с исходной версией было внесено небольшое изменение: если получаемое значение удельного потока метана (MER, мгС/кв.м/час) оказывалось меньше заданного минимально допустимого значения (MER<sub>min</sub> = -0.18), то окончательно принималось значение MER=MER<sub>min</sub>.

Входная информация для расчетов по модели представляла собой усредненные за недели значения чистой первичной продукции (измеренной также при помощи «FLUX-NIES»), уровня болотных вод и температуры торфа (на глубинах 5, 10, 20, 30, 40, 125 см). Кроме того, использовалась сайт-специфичная информация о доле окисленного метана под той или иной растительной ассоциацией, взятая из (Глаголев, 2010).

### 3. Результаты и обсуждение

Результаты измерений и моделирования удельного потока метана показаны на рисунке 1. Из рисунка видно, что для пушицево-осоково-сфагновой и кустарничково-

пушицево-осоково-сфагновой ассоциации наблюдается прекрасное соответствие между результатами предсказания модели и реальными данными. На осоково-сфагновой ассоциации одна из двух измерительных автоматических камер была установлена лишь в самом конце периода измерений, и для нее соответствие хуже, но для другой камеры, работавшей с самого начала, расчет хорошо соответствует полученным данным. Наконец, наблюдается качественное соответствие модельной и реально измеренной динамики эмиссии на хвощево-сфагновой и вахтово-сфагновой ассоциациях. Однако, необходимо подчеркнуть, что в данном случае наша методология работы с моделью не включала в себя подбор параметров, обеспечивающих наилучшее совпадение с экспериментальными данными. Т.е. ранее созданная модель с определенными по литературным данным коэффициентами была применена к произвольной географической точке, для которой имелся достаточно полный ряд наблюдений. С учетом этого совпадение расчета и наблюдений следует признать вполне удовлетворительным.

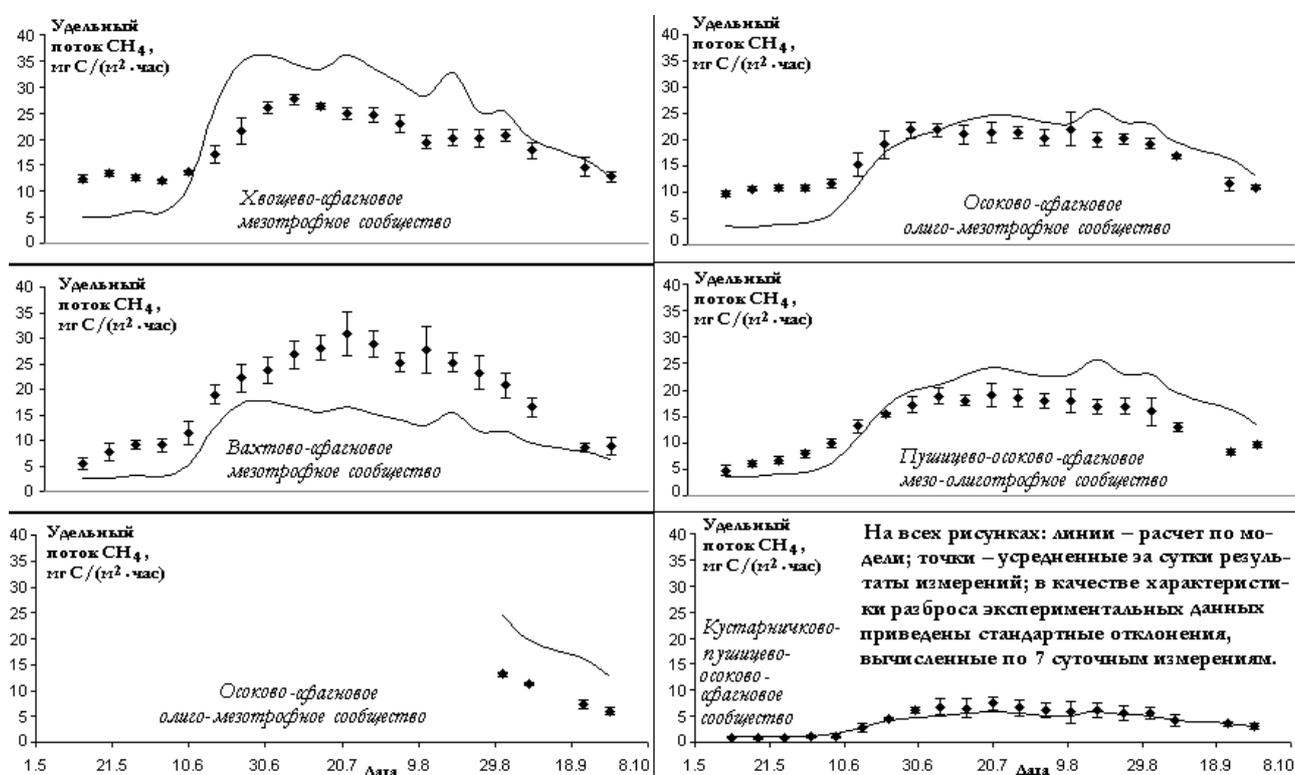


Рисунок 1 – Динамика эмиссии метана на Бакчарском болоте в 2015 г.

## Литература

- Глаголев М.В. Эмиссия  $\text{CH}_4$  болотными почвами Западной Сибири: От почвенного профиля – до региона: Дис. ... канд. биол. наук. - М., 2010. - 211 с.
- Глаголев М.В., Шнырев Н.А. Динамика летне-осенней эмиссии  $\text{CH}_4$  естественными болотами (на примере юга Томской области) // Вестник МГУ. Сер. Почвоведение. - 2007. - №1. - С. 8-15.
- Глаголев М.В., Шнырев Н.А. 2008. Летне-осенняя эмиссия  $\text{CH}_4$  естественными болотами Томской области и возможности ее пространственно-временной экстраполяции // Вестник МГУ. Сер. Почвоведение. - №2. - С. 24-36.
- Краснов О.А., Maksyutov S., Глаголев М.В., Катаев М.Ю., Inoue G., Надеев А.И., Шелевой В.Д. Автоматизированный комплекс «FLUX-NIES» для измерения потоков метана и диоксида углерода // Оптика атмосферы и океана. - 2013. - Т. 26. - С. 1090-1097.
- Сао М., Dent J.B., Neal O.W. Modeling methane emissions from rice paddies // Global Biogeochemical Cycles. - 1995. - V. 9. - P. 183-195.
- Сао М., Marshall S., Gregson K. Global carbon exchange and methane emissions from natural wetlands: Application of a process-based model // Journal of Geophysical Research. - 1996. V. 101, No. D9. - P. 14399-14414.

## ОЦЕНКА СКОРОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА РАСТЕНИЙ-ТОРФООБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ОЛИГОТРОФНОМ БОЛОТЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Головацкая Е.А.

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*  
[golovatskaya@imces.ru](mailto:golovatskaya@imces.ru)

**Аннотация:** На основании экспериментальных данных получены количественные оценки скорости трансформации растительных остатков в олиготрофных торфяных залежах южно-таежной подзоны Западной Сибири, показано снижение интенсивности процесса трансформации для всех исследуемых видов в течение 4 лет и выполнен прогноз интенсивности процесса трансформации растений-торфообразователей.

Изучение процессов трансформации органического вещества приобретает большое значение в связи с изменением климата и возрастанием уровня антропогенного воздействия на природные экосистемы. Знание закономерностей процессов трансформации растений-торфообразователей и их количественных оценок для болотных экосистем необходимо для изучения механизмов их устойчивости и продуктивности болот, обоснования прогноза их эволюции в связи с изменением экологической обстановки. Определяющим факторам, влияющим на скорость разложения, является химический состав исследуемых видов растений, также существенное влияние оказывают микробиологическая активность и гидротермические условия торфяной залежи. Цель работы заключалась в оценке скорости трансформации растений-торфообразователей в торфяной залежи олиготрофного болота южно-таежной подзоны Западной Сибири.

### Объекты и методы

Объектами исследований послужили основные растения-торфообразователи сосново-кустарничково-сфагнового фитоценоза (низкого рьяма) и осоково-сфагнуовой топи олиготрофного болота «Бакчарское» (Бакчарский район Томская область). В эксперименте участвовало 9 видов растений произрастающих на исследуемых фитоценозах. Для определения скорости разложения растений-торфообразователей применялся метод закладки растительности в торф (Козловская и др., 1978). Дополнительно, с целью получения количественных характеристик потерь макроэлементов, была определена зольность, содержание общего азота и общего углерода в исходных образцах растительного вещества и после эксперимента по соответствующим методикам (Агрохимические методы, 1975; Пономарева, Плотникова, 1975). Опыт закладывался в конце вегетационного периода 2008 года, повторность – 3-х кратная. Образцы с растительным материалом были извлечены через 1, 2, 3 и 4 года после начала эксперимента. Для каждого вида растений был рассчитан коэффициент трансформации ( $k$ ) по следующей формуле:

$$k = -\ln(m_t/m_0)/t, \quad (1)$$

где  $m_0$  исходная масса опада растений (г),  $m_t$  – масса опада (г) через время  $t$  (год).

### Результаты исследования

В течение всего первого года эксперимента по оценке скорости трансформации растительных остатков наименьший коэффициент трансформации получен для сфагновых мхов (0,06-0,19), максимальный для травянистых растений (0,41-0,54). Через 4 года скорость разложения снижается, о чем свидетельствует и снижение величины коэффициента трансформации для мхов он достигает значений 0,02-0,12, для трав 0,23-0,37. Процесс трансформации растительных остатков протекает нелинейно (рис. 1) и для некоторых видов, например сфагновых мхов, практически прекращается через 15-50 лет (сфагнум фускум и

сфагнум ангустифолиум). Трансформация растительных остатков трав протекает быстрее и уже через 15-20 лет все исследуемые остатки трав разлагаются практически полностью. Разложение листьев кустарничков занимает больше времени – процесс трансформации прекращается только через 20-60 лет в зависимости от вида кустарничков при этом оставшиеся в виде хорошо разложившего торфа растительные остатки листьев составляют менее 5% от исходного количества.

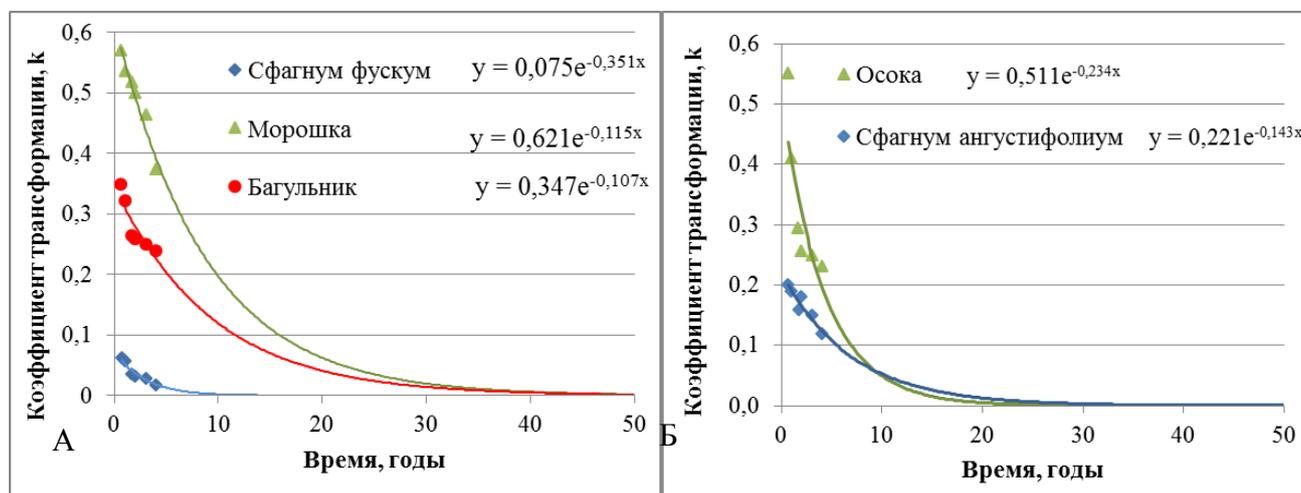


Рисунок 1 – Изменение коэффициентов трансформации растительных остатков растений-торфообразователей в торфяных залежах: А – низкого рьяма, Б – осоково-сфагнуовой топи, линиями показан прогноз изменения коэффициента трансформации со временем.

Данные ботанического состава торфяной залежи и датирования верхних горизонтов торфа подтверждают выводы о существенном снижении скорости трансформации растительных остатков сфагновых мхов со временем. Так например, верхняя часть (0-60 см) торфяной залежи низкого рьяма сложена фускум-торфом со степенью разложения 5 % при возрасте на глубине 50-60 см 230 лет. В торфяной залежи осоково-сфагнуовой топи сложеной ангустифолиум-торфом (глубинна 50-60 см, степень разложения 10 %, возраст 240 лет). Растительные остатки трав в этих слоях торфа практически отсутствуют, содержание растительных остатков кустарничков составляют менее 5 %.

## Литература

- Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. - Л.: Наука ЛО, 1978. 172 с.  
Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.  
Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Методические указания по определению содержания состава гумуса в почвах (минеральных и торфяных). - Л.: Наука, 1975. 105 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОСНЫ НА ТЕРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ БЕЛОГО МОРЯ.

Голубева Е.И.<sup>1</sup>, Глухова Е.В.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,*  
[egolubeva@gmail.com](mailto:egolubeva@gmail.com), [evglukhova@gmail.com](mailto:evglukhova@gmail.com)

**Аннотация:** Изучение деградации земель, разработка методов борьбы с деградационными процессами, а также организация мониторинга функционирования экосистем в условиях Крайнего Севера имеет особое значение, поскольку экосистемы легко уязвимы. В связи с этим, целью работы являлся анализ особенностей структуры и динамики формирующихся сосновых лесов при фитомелиорации на песках Терского побережья Белого моря.

Одной из актуальных задач современной геоэкологии является сохранение и рациональное использование земельных ресурсов морских побережий, в том числе, разработка методов их восстановления в результате деградации. Примером такого района с протекающими деградационными процессами на побережьях может служить побережье Белого моря (южная часть Кольского полуострова).

Песчаные массивы на этой территории образовались в результате действия комплекса неблагоприятных природных факторов, таких как легкий механический состав грунтов, сильные ветра, низкие температуры, нерациональное использование земель – вырубка леса, пожары, перевыпас скота и т.п. Площадь деградированных земель в устье р. Варзуга составляет более 2,2 тыс. га (Казаков, 2000). На Терском берегу Белого моря для закрепления песчаных массивов проводятся фитомелиоративные работы.

Цель наших исследований – изучение особенностей структуры и динамики формирующихся сосновых лесов при фитомелиорации на песках Терского побережья Белого моря как показателей эффективности рекультивации.

В связи с поставленной целью решались следующие задачи:

а)изучить особенности микроклимата, характер рельефа и содержание элементов минерального питания в почве разновозрастных насаждениях; б)описать структуру и флористическое разнообразие сформировавшихся разновозрастных сообществ из сосны *Pinus sylvestris* L.; в)исследовать изменения в видовом составе сообществ; д)исследовать изменения в фотосинтетическом аппарате сосны и в содержании элементов минерального питания в хвое в зависимости от возраста и структуры насаждений; е)проследить изменения морфометрических параметров роста сосны за 20-ти летний период; ж)выявить наиболее информативные показатели эффективности фитомелиорации и стадии восстановления сосновых лесов.

Основной лесообразующей культурой при фитомелиорации был выбран вид местной флоры - сосна обыкновенная лапландская, степень приживаемости которой оказалась самой высокой по сравнению с другими видами – фитомелиорантами (Ипатов, 1974).

Проведенный анализ показал, что в районе исследований преобладает бугристый характер рельефа, влияющий на формирование определенной структуры сосновых сообществ. Так, на хорошо прогреваемых буграх в условиях высокой воздухопроницаемости формируются насаждения с высокой степенью сомкнутости (Ведрова, 1980).

В распределении питательных веществ в компонентах экосистем (растения, почва) играет роль не только возраст фитомелиорантов, но и характер их распределения. Содержание элементов питания в почве практически одинаково во всех изученных сообществах, что говорит об одинаковых условиях произрастания. Наблюдается разница в содержании элементов питания в хвое сосны между деревьями, растущими в группе и отдельно стоящими. У деревьев, растущих в группе значения концентрации элементов питания выше, чем у отдельно стоящих.

Исследования показали, что наблюдается определенная зависимость в содержании пигментов, соотношении пигментов, количестве суммарных хлорофиллов а и в от возраста и структуры насаждений. Значения проанализированных показателей увеличиваются с возрастом сосновых посадок, при этом, максимальные значения зафиксированы у 15-летних сосен. При этом у деревьев, растущих в группе значения всех изученных показателей выше, чем у отдельно стоящих. Количество пигментов в сосновых насаждениях 20-летнего возраста соответствует их количеству в естественных сосновых лесах.

Анализ морфометрических характеристик (возраст, ежегодный прирост, диаметр ствола на высоте 1,3 м, диаметр корневой шейки, возраст хвои) сосны показал, что происходит увеличение всех значений этих параметров с возрастом, особенно у деревьев, растущих в группе. Продолжительность жизни хвои сосны варьирует от 1 года (в молодых насаждениях) до 4 лет (в 20-летних насаждениях).

В процессе формирования сообществ происходят изменения в их видовом составе и структуре. Количество видов меняется от 4 до 11.

Анализ рассмотренных показателей состояния формирующихся сосновых лесов при фитомелиорации позволил выбрать наиболее информативные на основе которых можно проводить оценку состояния насаждений и моделирование мониторинга процесса фитомелиорации: морфометрические (высота деревьев, диаметр ствола на высоте 1,3 м., ежегодный прирост), фитоценоотические (экобиоморфный состав и флористическое разнообразие), биохимические (соотношение пигментов).

Изменения показателей, характеризующих состояние и развитие растительных сообществ при фитомелиорации позволяет выделить 3 стадии формирования сосновых лесов.

Первая стадия – приживание сосновых насаждений (до 5 лет). Вторая стадия – усиленного роста и формирования сообществ (до 10-15 лет). Третья стадия - формирования сообществ, близких к естественным (15-20 лет).

## **Литература**

Ведрова Э.Ф. Влияние сосновых насаждений на свойства почвы. Новосибирск: Наука, 1980.

Ипатов Л.Ф. Строение и рост культур сосны на Европейском Севере. Архангельск: Северо-западное книж. изд-во, 1974.

Казаков Л.А. Кузоменские пески. 2000.

## АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ТУНДРОВЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Голубятников Л.Л.<sup>1</sup>, Заров Е.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия*

[golub@ifaran.ru](mailto:golub@ifaran.ru)

<sup>2</sup>*Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия*

[zarov.evgen@yandex.ru](mailto:zarov.evgen@yandex.ru)

**Аннотация:** С использованием космических снимков со спутников Landsat-8 и WorldView-2 сделан анализ структуры ландшафтов типичной и южной тундр территории Западной Сибири. На основе спутниковой информации и учета данных полевых исследований выделены типы характерных для рассматриваемых регионов микроландшафтов. Определены площади основных переувлажненных ландшафтов в различных типах болот типичной и южной тундр изучаемой территории.

Анализ ландшафтной структуры тундровых экосистем Западной Сибири был сделан на основе спутниковых снимков и данных полевых исследований. Были использованы спутниковые снимки с космических аппаратов Landsat-8 и WorldView-2. Снимки спутника среднего разрешения Landsat-8 (30 м/пиксел) охватывали участки площадью около 30 тыс.км<sup>2</sup> типичной и южной тундры рассматриваемого региона, снимки спутника сверхвысокого разрешения WorldView-2 (0.5 м/пиксел для монохроматического и 2 м/пиксел для спектральных каналов) охватывали ключевые участки площадью 40 км<sup>2</sup> в южной тундре и 25 км<sup>2</sup> в типичной тундре. Дешифрирование снимков и выделение классов ландшафтов земной поверхности проводилось с помощью программного пакета GRASS 6.4.3. При анализе снимков спутника Landsat-8 проведена классификация с обучением. Выбор обучающих полигонов осуществлялся вручную на основе экспертных оценок и данных полевых исследований. Для каждого выделенного класса было использовано около 30 обучающих полигонов. Точность классификаций определялась методом каппа-статистики. При анализе снимков спутника WorldView-2 для выявления максимальных различий по спектральным яркостям применялся метод главных компонент. Для первых трех компонент проведена классификация с обучением. Сопоставление выделенных типов микроландшафтов на снимке спутника WorldView-2 с классами ландшафтов выделенных на снимке спутника Landsat-8 проведено с помощью модуля "r.statistics" используемого пакета GRASS.

Анализ снимков спутника среднего разрешения Landsat-8 позволил выделить 11 классов тундровых ландшафтов. Точность проведенных классификаций по методу каппа-статистики соответствует удовлетворительному уровню (75-82 %). Выделенные по снимкам Landsat-8 тундровые ландшафты были проанализированы на более детальных изображениях ключевых участков, полученного со спутника WorldView-2. Этот анализ с привлечением данных полевых наблюдений позволил выделить 19 классов земной поверхности (микроландшафтов) в южной тундре и 24 микроландшафта в типичной тундре. Водные экосистемы рассматриваемого ключевого участка южной тундры подразделены на глубоководную часть лишенную надводного растительного покрова, мелководную часть с разреженным надводным растительным покровом и внутриболотные озера. Водные экосистемы ключевого участка типичной тундры представлены глубоководной и мелководной частями и микроландшафтом мелководье-сплавина (мелководная часть водоема, заросшая болотной растительностью). На ключевых участках типичной и южной тундр выделены так же микроландшафты на суходолах и сухих хасырях (7 и 5 типов соответственно), на болотных возвышениях (по 2 типа), на мочажинах (7 и 4 типов) и на обводненных мочажинах (по 5 типов).

Сопоставление выделенных классов ландшафтов по снимкам Landsat-8 с типами микроландшафтов для территории снимков WorldView-2 позволило определить доли

рассматриваемых микроландшафтов в каждом ландшафтном классе. На основе этих данных были вычислены площади каждого микроландшафта на рассматриваемом снимке спутника Landsat. Согласно спутниковым данным, заболоченность исследуемых районов типичной и южной тундры составляет 52 % и 34 % соответственно. Полученные оценки заболоченности территорий превосходят аналогичные значения, рассчитанные на основе типологической карты болот (23 % и 32 % соответственно). Экосистемы на минеральных почвах (суходолах) достаточно широко распространены в исследуемых тундровых районах. По полученным оценкам они занимают около 34 % территории типичной тундры и около 43 % территории южной тундры. Согласно полученным оценкам, озера в исследуемых районах занимают около 11 и 12 % территорий типичной и южной тундр соответственно. При этом в южной тундре, площадь зеркала воды глубоководной части озер составляет около 59 % площади озер, площадь мелководной части озер – 41 %. Аналогичные оценки для типичной тундры составляют около 82 % и 17 % соответственно. Из полученных оценок следует, что тундровые озера имеют достаточно большую мелководную зону. Проведенное исследование показало, что незначительная часть (около 7 %) заболоченных территорий тундр занята буграми и торфяными валиками, которые образуют возвышения в ландшафтах болотных экосистем. На большей части переувлажненных территорий тундры расположены мочажины и озера. Полученные результаты демонстрируют возможность совместного использования космических снимков со спутников среднего и сверхвысокого разрешения для анализа сложной, мозаичной структуры природных ландшафтов больших регионов.

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 14-05-00193-а и Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН "Влияние современных изменений климата и окружающей среды на процессы в атмосфере и криосфере".*

## АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ДРЕВОСТОЕВ МЕТОДАМИ СЛУЧАЙНЫХ ТОЧЕЧНЫХ ПОЛЕЙ

Грабарник П.Я.<sup>1</sup>, Алейников А.А.<sup>2</sup>, Ефименко А. С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия, pavel.grabarnik@gmail.com*

<sup>2</sup> *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия, aaacastor@gmail.com*

**Аннотация:** В работе анализируются пространственные структуры, описывающие размещение деревьев в разновозрастных древостоях среднетаежных лесов.

Современные методы анализа структурной организации лесной экосистемы включают развитые средства анализа пространственных структур (Wiegand and Moloney, 2014). Интерес экологов в изучении особенностей пространственных взаимоотношений растений обусловлен той значительной ролью, которую играют эти взаимоотношения в ходе развития и функционирования лесной экосистемы. В частности, пространственная структура древостоя является следствием процессов, протекающих в сообществе, таких как конкурентное взаимодействие, влияющие на замедление роста соседних деревьев и изменение их морфологии и ведущее к отмиранию ослабленных деревьев, высвобождение пространства после отпада взрослых деревьев и активного роста молодых деревьев в образовавшихся «окнах» в пологе леса.

Современные методы пространственной статистики позволяют проверять биологические гипотезы, сформулированные в менее формализованной и точнее отражающей биологическое содержание форме. Однако изучение пространственных зависимостей с помощью применения новых методов стохастической геометрии и пространственной статистики относительно недавнее направление в вычислительной экологии, и часто эти методы используются в том виде, как они приведены в примерах в математических работах. При этом часто экологический контекст не соответствует условиям применения тех или иных математических процедур, что может исказить результат и основанные на нем выводы.

Исследованиями последних десятилетий показана необходимость популяционного подхода к изучению структурно-функциональной организации лесных экосистем (см. например, Восточноевропейские .., 2004). С этой точки зрения большой интерес представляют исследования поздне-сукцессионных сообществ, длительное время развивающихся в спонтанном режиме. Последние несколько лет подобные исследования проводятся в среднетаежных лесах Печоро-Ильчского заповедника. В работах (Алейников, 2011; Алейников, Лазников, 2012) приведен анализ популяционной структуры основных лесообразователей среднетаежных лесов с учетом естественной дифференциации деревьев в сообществах. В частности, проанализированы основные популяционные характеристики: размерная, возрастная, онтогенетическая и виталитетная структуры части ценопопуляций деревьев, которая относится к древостою на примере ценопопуляций древесных видов елово-пихтарников крупнопоротниковых и высокотравных лесов.

Цель настоящей работы – изучить особенности пространственной структуры разновозрастных древостоев, которые длительное время не испытывали крупномасштабных нарушений, связанных с естественным фактором (ветровалы), или антропогенными факторами (рубки, пожары).

Нами разработаны новые методы анализа пространственной структуры древостоя в случае, когда область наблюдения содержит участки, в которых успешное возобновление древостоя невозможно из-за наличия сильного конкурента в травянистом ярусе. Новые методы позволили показать, что в отличие от диагностики группового характера

размещения деревьев, получаемого традиционными методами, деревья генеративного онтогенетического состояния размещены более регулярно, чем в случае пуассоновского

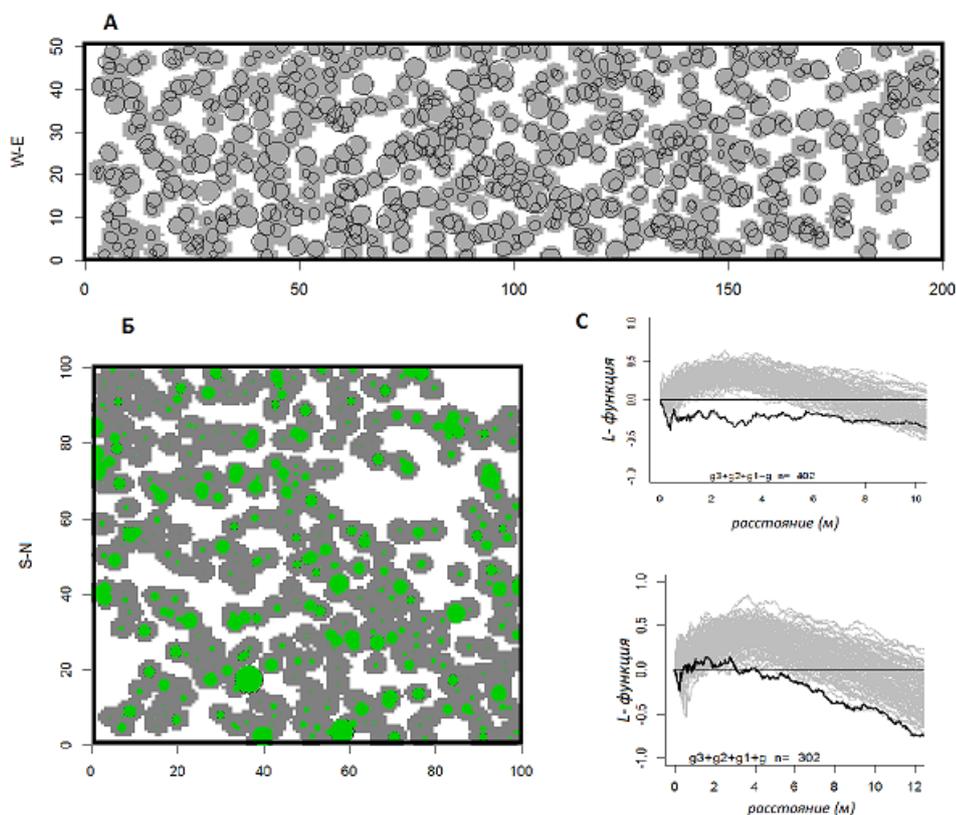


Рисунок. А) Пространственная структура елово-пихтарника крупнопоротникового. Показаны кроны, подкрановое (серым) и межкрановое пространство (белым); Б) пространственная структура пихто-ельника высокотравного. Показаны относительные размеры диаметров стволов (зеленым), подкрановое (серым) и межкрановое пространство (белым); С) график Рипли L-функции для деревьев генеративного онтогенетического состояния, вверху для крупнопоротникового, внизу для высокотравного древостоев. Черная линия соответствует наблюдениям, облако серых линий соответствует 100 реализациям пуассоновского поля в области, отвечающего подкрановому пространству.

точечного поля (независимое и равномерное распределение точек). Кроме того, взаимодействие между деревьями характеризуется расстояниями большими, чем характерные размеры крон. Дополнительно были исследованы взаимное размещение деревьев различных онтогенетических состояний, что позволяет прогнозировать изменение пространственной структуры со временем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-34-20967)

## Литература

- Алейников, А.А. Состав и строение древостоев сфагновых ельников в верховьях реки Печора (Печоро-Ильчский заповедник) // Известия Самарского НЦ РАН. – 2011. – Т. 13(39). – № 1(4). – С. 960–964.  
Алейников, А.А., Лазников, А.А. Популяционная структура древесных видов разновозрастных елово-пихтарников северного предуралья// Вестник МГУЛ -Лесной вестник – 2012. – С.32– 38.  
Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. – М.: Наука, 2004. – Кн. 1. – 479с; Кн.2. – 575с  
Wiegand, T., and K.A. Moloney. 2014. A handbook of spatial point pattern analysis in ecology. Chapman and Hall/CRC press, Boca Raton. – 538с.

## САМООРГАНИЗАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА АРИДНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ "ВЕДЬМИНЫХ КРУГОВ" В НАМИБИИ

Грабовский В.И.

ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

[wgrabo@mail.ru](mailto:wgrabo@mail.ru)

**Аннотация:** приводится простая КА модель, объясняющую организацию растительного покрова в условиях дефицита ресурса (воды, зольных элементов). Моделируются "ведьмины круги" в пустыне Намибии. Приведенная модель воспроизводит не только паттерн распределения растительности: регулярно распределенные среди травяного матрикса округлые участки, лишенные растительности, но и жизненный цикл отдельных структур (кругов), детали которого не противоречат натурным описаниям.

### 1. Распределение растительного покрова

Во многих аридных районах по всему миру встречаются типы растительности, в которых участки с растительностью перемежаются плешинами различного рода. Такие ландшафты называют двухфазной мозаикой, подчеркивая этим резкие границы двух состояний почвенного покрова. На западе и востоке Африки такие типы растительности называют тигровым кустарником (tiger bush), в Чихуахуанской пустыне в Мексике - "моготом" (mogote), в пустынях Австралии это "мулга" (mulga) (Rooyena et al., 2004). Наиболее интригующим явлением подобного рода являются "ведьмины круги" в Намибии. Это ландшафт, протянувшийся от Анголы до ЮАР через всю Намибию в зоне песчаных равнин с 50-100 мм осадков в год, в котором травянистый покров (матрикс) представлен преимущественно *Stipagrostis uniplumis*, перемежается округлыми лишенными растительности плешинами, занимающими суммарно до 29% общей площади<sup>1</sup>. Распределение кругов на площади отличается от случайного в сторону регулярного (Albrecht et al., 2001). Часто такие круги окаймлены другим видом травы *Stipagrostis giessii*, выделяющейся более высокими куртинами на фоне матрикса. Диаметр кругов - метры (площадь 15-133 (ср. 35) м<sup>2</sup>, s.d. 8,7). Круги рождаются (трава в будущем круге засыхает) созревают (образуется венчик из второго вида трав и очищается внутреннее поле) и умирают (на месте круга восстанавливается растительность матрикса). Лишь менее, чем 5% колец на площади отмечаются как зарождающимися или умирающими (Albrecht et al., 2001) из чего следует, что эти структуры существенно стабильны. Средняя продолжительность жизни кругов около 40 лет (Tschinkel, 2012).

Доминируют две группы гипотез, объясняющих происхождение кругов в Намибии. В первой в качестве причин рассматривается деятельность насекомых (термитов и/или муравьев) (Juergens, 2013; Becker, 2007; Picker et al., 2012) во второй процессы самоорганизации собственно растительного покрова в условиях дефицита ресурсов (вода, зольные элементы) (Gilad et al. 2007a, 2007b; Meron, 2012; Tamvakis, 2014; Fernandez-Oto et al., 2014).

Первая группа гипотез (насекомые) объясняют структуру, динамику и распределение кругов в пространстве. Однако, в качестве агентов авторами приводятся разные семейства термитов и даже указываются муравьи. Из этого следует, что как сами агенты, так и механизмы их реализации неясны. Прерывистая структура растительности, перемежающаяся открытыми участками вполне объясняется второй группой гипотез. И в этом смысле гипотеза о насекомых, как главного драйвера структур оказывается избыточной. С другой стороны

---

<sup>1</sup> На круги можно посмотреть в гугле, например, по ссылке:  
<https://www.google.ru/maps/@-24.9735332,15.8159939,189m/data=!3m1!1e3?hl=ru>

вторая группа гипотез без дополнительных допущений не объясняет генезис (жизненный цикл) кругов: их появление, созревание и исчезновение.

Предлагается простая клеточно-автоматическая модель, которая при минимуме допущений демонстрирует сходство с оригиналом (намибийскими "ведьмиными кругами") по всем ключевым пунктам: с характерными временами и размерностями круги появляются, созревают и исчезают в едином параметрическом поле.

## 2. Модель

1. Выберем игровое поле размером  $size_x * size_y$  клеток. Каждая клетка характеризуется величиной биомассы. Если эта величина положительна - клетка "живая", если нет - "мертвая". На старте все клетки "живые" и обладают случайной вариацией некоторой базовой биомассы ( $Basis$ ).
2. На каждом шаге игры (поколении) в случайном порядке выбираются клетки и в случае, если они "живы", происходит рост биомассы согласно уравнению:

$$Biom(i, j) = Biom(i, j) + (Basis - Biom(i, j)) * 0.5$$

где  $i, j$  - координаты клетки.

3. Независимо от того, жива ли фокусная клетка, рассчитывается суммарная биомасса клеток ( $SumBiom(i,j)$ ) и количество живых клеток ( $LiveCells$ ) в некотором радиусе от фокусной клетки (параметр  $radius$ ).
4. Дальнейшие события происходят в зависимости от величины суммарной биомассы локального окружения ( $SumBiom(i,j)$ ).
  - a. Если величина  $SumBiom(i,j)$  не превышает **пороговое значение** (параметр  $Threshold$ ) то,
    - i. если биомасса фокусной клетки положительна ( $Biom(i,j) > 0$ ), то ее биомасса распределяется поровну между всеми живыми соседями (в окружении  $radius$ ), а биомасса самой клетки обнуляется ( $Biom(i,j) = 0$ ) (клетка умирает)
    - ii. если биомасса фокусной клетки не положительна ( $Biom(i,j) \leq 0$ ), то каждая живая клетка в радиусе сканирования ( $radius$ ) получает равную долю пошагового увеличения биомассы ( $Basis / LiveCells$ )
  - b. Если величина  $SumBiom(i,j)$  выше **порогового значения**, то
    - i. если клетка мертва, то она оживает, разделяя поровну биомассу с самой массивной клеткой в окружении  $radius$
    - ii. если клетка жива, то происходит переход к новому шагу программы.

## 3. Результаты и обсуждение

Предложенная модель в широком спектре параметров генерирует сходный с оригиналом паттерн распределения растительности (рисунок 1), при сходстве с оригиналом по некоторым ключевым характеристикам (таблица 1). Круги спонтанно появляются, созревают и зарастают, причем, как и в природе на переходные процессы приходится небольшая доля времени жизненного цикла.

Важно отметить, что обсуждаемые результаты получены при величине параметра  $radius = 5$  ед., при этом средний диаметр кругов - 40,2 ед. Поскольку диаметр кругов в природе это метры, то необходимый радиус взаимодействий растений должен быть в

пределах десятков сантиметров, что для растений из аридных местообитаний вполне правдоподобная величина.

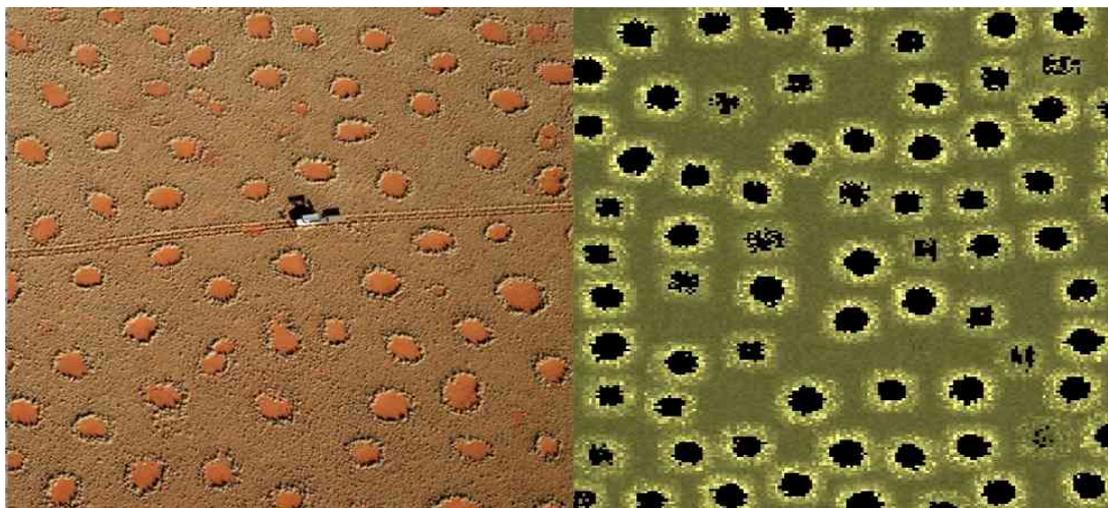


Рисунок 1 – Круги в Намибии (слева)<sup>2</sup> и модельная имитация (справа)

Таблица 1 – Сравнение параметров кругов в природе<sup>3</sup> и в модели.

	Доля покрытия кругами площади (%)				NNI	Доля появляющихся и зарастающих кругов (%)
	Average	Min	Max	s.d.		
Натура	13	9	18	2,2	1,68	5
Модель	14	10	17	1,3	1,79	7

## Литература

- Van Rooyen, M. W., Theron, G. K., Van Rooyen, N., Jankowitz, W. J., & Matthews, W. S. (2004). Mysterious circles in the Namib Desert: review of hypotheses on their origin. *Journal of Arid Environments*, 57(4), 467-485.
- Tschinkel W.R (2012) The Life Cycle and Life Span of Namibian Fairy Circles. *PLoS ONE* 7(6): e38056. doi:10.1371/journal.pone.0038056
- Albrecht C, Joubert J.J, De Rycke PH (2001) Origin of the enigmatic, circular, barren patches ('Fairy Rings') of the pro-Namib. *S. Afr. J. Sci.* 97: 23–27.
- Juergens N (2013) The biological underpinnings of Namib Desert fairy circles. *Science* 339: 1618–1621.
- Becker T (2007) The phenomenon of fairy circles in Kaokoland. *Basic and Applied Dryland Research* 2: 121–137.
- Picker MD, Ross-Gillespie V, Vlieghe K, Moll E (2012) Ants and the enigmatic Namibian fairy circles – cause and effect? *Ecological Entomology* 37: 33–42
- Gilad, E., Von Hardenberg, J., Provenzale, A., Shachak, M., & Meron, E. (2007a). A mathematical model of plants as ecosystem engineers. *Journal of Theoretical Biology*, 244(4), 680-691.
- Gilad, E., Shachak, M., & Meron, E. (2007b). Dynamics and spatial organization of plant communities in water-limited systems. *Theoretical population biology*, 72(2), 214-230.
- Tamvakis, I. (2014). The persistent enigma of the Namibian dessert fairy circles. // *Theoretical Biology and Bioinformatics*, Utrecht University
- Meron, E. (2012). Pattern-formation approach to modelling spatially extended ecosystems. *Ecological Modelling*, 234, 70-82.
- Fernandez-Oto, C., Tlidi, M., Escaff, D., & Clerc, M. G. (2014). Strong interaction between plants induces circular barren patches: fairy circles. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2027), 20140009.
- Albrecht, C. F., Joubert, J. J., & De Rycke, P. H. (2001). Origin of the enigmatic, circular, barren patches ('Fairy Rings') of the pro-Namib: research articles. *South African Journal of Science*, 97(1 & 2), p-23.

<sup>2</sup> Аэроснимок взят из <http://travel.nationalgeographic.com/travel/traveler-magazine/photo-contest/2012/entries/133910/view/>

<sup>3</sup> Albrecht et al., (2001), Tschinkel (2012)

## О КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ ГЕОБОТАНИЧЕСКИХ ОПИСАНИЙ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКИМ ШКАЛАМ

Грохлина Т.И., Ханина Л.Г.

*Институт математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия*

[grokhlina@mail.ru](mailto:grokhlina@mail.ru)

**Аннотация:** представлена новая версия программы Ecoscale – программы обработки геоботанических описаний по экологическим шкалам. Новая версия программы включает последнюю редакцию индикаторных таблиц Э.Ландольта с расширенным списком экологических шкал, по которым осуществляется обработка списков видов пользователя. Также в программе доступен обобщенный список флоры, составленный из таблиц Ландольта (Landolt et al., 2010), Элленберга (Ellenberg et al., 1991), Цыганова (1983) и Раменского (Раменский и др., 1956), включающий 2580 видов сосудистых растений, 1045 мохообразных и 187 лишайников. Программа осуществляет проверку списка видов пользователя с обобщенным списком флоры и выдает сообщение о несовпадающих видах.

Экологические шкалы представляют собой балловые оценки отношения растений к экологическим факторам, т.е. к условиям обитания растений – степени увлажненности и засоленности почвы, пастбищной дигрессии и т.д. Используя экологические шкалы и списки видов, произрастающих в данном месте растений, можно охарактеризовать это местообитание с точки зрения экологических условий, а также сопоставить экологические оценки разных видов по отношению к выделенным факторам. Различают амплитудные (диапазонные) и точечные экологические шкалы. Первые содержат балловую оценку экологической амплитуды (пределы экологической толерантности) видов по экологическим факторам; вторые – балловые оценки экологического оптимума видов. На данный момент известно более 20 экологических шкал разных авторов, однако наиболее часто в геоботанических исследованиях используются экологические шкалы отечественных авторов – Л.Г. Раменского (Раменский и др., 1956), работа которого является пионерной в этой области, и Д.Н. Цыганова (1983), а также шкалы зарубежных авторов – Г. Элленберга (Ellenberg et al., 1991) и Э. Ландольта (Landolt, 1997; Landolt et al., 2010).

Для обработки геоботанических описаний по шкалам указанных четырех авторов в 1990-х годах нами на основе использования технологии баз данных была создана программа EcoScale, а в 2006 году была представлена ее новая версия (Грохлина, Ханина, 2006). В этой версии программы были сохранены ее прежние возможности, а также добавлены новые – проверка структуры файла с геоботаническими описаниями, просмотр шкал, сохранение выбранных параметров обработки для повторного использования. Кроме того, для амплитудных шкал была реализована методика обработки данных с учетом экологической валентности видов (Жукова, 2004).

Результатом работы программы является количественная оценка местообитания растений, которая для амплитудных шкал может быть получена одним из трех методов (Зубкова и др., 2006): (1) методом экстремальных границ, который дает оценку местообитания по выбранному фактору на основе интервала максимального перекрытия экологических амплитуд видов растений; (2) методом пересечения большинства интервалов, которым можно получить оценку местообитания по выбранному фактору на основе интервала перекрытия экологических амплитуд большинства видов растений и (3) методом средневзвешенной середины интервала, который позволяет учесть участие видов при оценке местообитания. Правила перевода символьных значений участия, указанных в геоботаническом описании, в числовые задает пользователь. При этом в оценку местообитания бóльший вклад вносят виды с бóльшим участием. Количественную оценку местообитания по точечным шкалам получают также с использованием последнего метода, когда в качестве середины интервала вида берется его оценка по шкале.

В 2014 г. нами была разработана новая версия программы Ecoscale, имеющая ряд особенностей. В старых версиях программы списки видов в шкалах были приведены в авторских редакциях, поэтому возникали проблемы с синонимикой, которую мы предлагали решать с помощью кодов видов, где все синонимы каждого вида имели один и тот же код. В последней версии программа использует единый список основных названий видов по общепринятым в России классификациям, который включает в себя 2580 видов сосудистых растений, 1045 мохообразных и 187 лишайников. Для сосудистых растений наименования представлены по списку С.К. Черепанова (1991), для мохообразных и лишайников – по наиболее распространенным спискам М.С. Игнатова и О.М. Афонинной (1992), Г.П. Урбанавичюс (2010). Программа сравнивает список видов пользователя с обобщенным списком флоры и в случае несовпадения дает предупреждение пользователю.

Второе существенное изменение последней версии программы касается шкал Э. Ландольта, которые в последней редакции содержат данные по 6472 видам сосудистых растений, 609 видам мохообразных и 192 лишайникам (Landolt et al., 2010). В данный момент программой поддерживается обработка по двум климатическим и восьми экологическим шкалам Э. Ландольта, среди которых новые шкалы – это шкалы переменности увлажнения почвы и глубины залегания корней.

В дальнейшем в программу планируется включить обработку новых характеристик видов из обширных таблиц Э. Ландольта (Landolt et al., 2010).

Работа проводилась при частичной поддержке РФФИ, проект № 13-04-02181-а.

## Литература

- Грохлина Т.И., Ханина Л.Г. Автоматизация обработки геоботанических описаний по экологическим шкалам // Принципы и способы сохранения биоразнообразия. Материалы II Всероссийской научной конференции. - Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2006. - С. 87-89.
- Жукова Л.А. Оценка экологической валентности видов основных эколого-ценотических групп. Подходы и методы // Восточно-европейские леса: история в голоцене и современность: 1 книга. - М.: Наука, 2004. - С. 256-259.
- 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. - Йошкар-Ола, 2008. - 96 с.
- Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипов Н.А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. - М.: Сельхозгиз, 1956. - 472 с.
- Урбанавичюс Г.П. Список лишенофлоры России. - СПб.: Наука, 2010. - 294 с.
- Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. - М.: Наука, 1983. - 196 с.
- Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). - СПб.: Мир и семья, 1995. - 992 с.
- Ellenberg H., Weber H.E., Dull R., Wirth V., Werner W., Paulsen D. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa [Indicator values of plants in Central Europe] // Scripta Geobotanica. - V. 18. - Verlag Erich Goltze KG, Göttingen, 1991. - 248 s.
- Ignatov M.S., Afonina O.M. The list of mosses in the frame of ex-USSR // ARCTOA. - 1992. - V. 1. - P. 1-85.
- Landolt E. Okologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. - Veröff. Geobot. Inst. ETH, 1977. - V. 64. - P. 1-208.
- Landolt E. et al. Flora indicativa. Ecological indicator values and biological attributes of the flora of Switzerland and the Alps. - Bern: Haupt-Verlag, 2010. - 376 p.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В МЕЗО-ОЛИГОТРОФНОЙ ТОПЯНОЙ БОЛОТНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ

Дюкарев Е.А.

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*  
[egor@imces.ru](mailto:egor@imces.ru)

**Аннотация:** В работе представлена математическая модель для оценки потоков  $\text{CO}_2$  в мезо-олиготрофном топяном болоте в Западной Сибири и калибровка модели с использованием данных натуральных наблюдений, полученных с помощью автоматической прозрачной камеры и инфракрасного газоанализатора.

### 1. Введение

Болота Западной Сибири являются важными составляющими углеродного цикла наземных экосистем и содержат около 70 Гт углерода. Хотя размер углеродного пула является значительным, роль болот в глобальном углеродном бюджете исследована недостаточно. Внешние факторы играют важную роль в управлении скоростью обмена  $\text{CO}_2$  между болотной системой и атмосферой и возможные изменения климата могут существенно изменить углеродный баланс болот (Bubier и др., 2003, Головацкая 2009).

### 2. Материалы и методы

Измерения потоков  $\text{CO}_2$  проводились в южной части Западной Сибири на топяном участке небольшого болота "Тимирязевское" ( $56^{\circ}26'N$   $84^{\circ}50'E$ ) вблизи города Томска. Площадь болота составляет около 14,5 га. 70% площади занято сосново-кустарничково-сфагновым фитоценозом с низкорослой сосной, около 25% - мезо-олиготрофной осоково-сфагновой топью. Потоки  $\text{CO}_2$  измерялись с мая по сентябрь 2014 г. с помощью автоматической системы Li-Cor-8100 (США) и прозрачной камеры. Время экспозиции составляло 3 минуты, периодичность измерения – 20 минут. Измерения проводились два раза в месяц только в дневное время. Интенсивные полевые кампании были проведены 15-17 и 21-25 августа с круглосуточными измерениями потоков  $\text{CO}_2$ . Измерение температуры почвы и воздуха, суммарной солнечной и фотосинтетически активной радиации, атмосферного давления, влажности воздуха и суммы осадков проводились с использованием автоматической метеорологической системы АМИС (ИМКЭС СО РАН).

Растительный покров внутри камеры состоял только из мхов. Чистая продукция наземной экосистемы (NEE – Net Ecosystem Exchange) определяется как разность скоростей поглощения  $\text{CO}_2$  растениями (GPP – Gross Primary Production) и суммарного экосистемного дыхания (ER – Ecosystem respiration). Экосистемное дыхание в общем виде разделяется на дыхание автотрофов (R) и гетеротрофов (H). Измерения  $\text{CO}_2$  с помощью автоматической прозрачной камеры регистрируют суммарную чистую продукцию наземной экосистемы, которая имеет хорошо выраженные суточные вариации с максимальными (положительными) NEE в ночное время и минимальными - в дневное время, когда происходит ассимиляция  $\text{CO}_2$  моховым покровом.

### 3. Результаты

Наблюдаемые потоки NEE в дневные часы обычно отрицательны и достигают  $-0,45 \mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  (в 09:00 23.08.2014). Скорость ассимиляции  $\text{CO}_2$ , измеряемая камерным методом примерно на 15% ниже реальной вследствие из-за ослабления светового потока материалом камеры. Максимальные потоки экосистемного дыхания (ER) были зарегистрированы в 00:40 24.08.2014 ( $2,8 \mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ). Суточная амплитуда регистрируемых потоков  $\text{CO}_2$  составляет около  $2,1 \mu\text{моль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  и связана с дневной фотосинтетической ассимиляцией  $\text{CO}_2$  мхами.

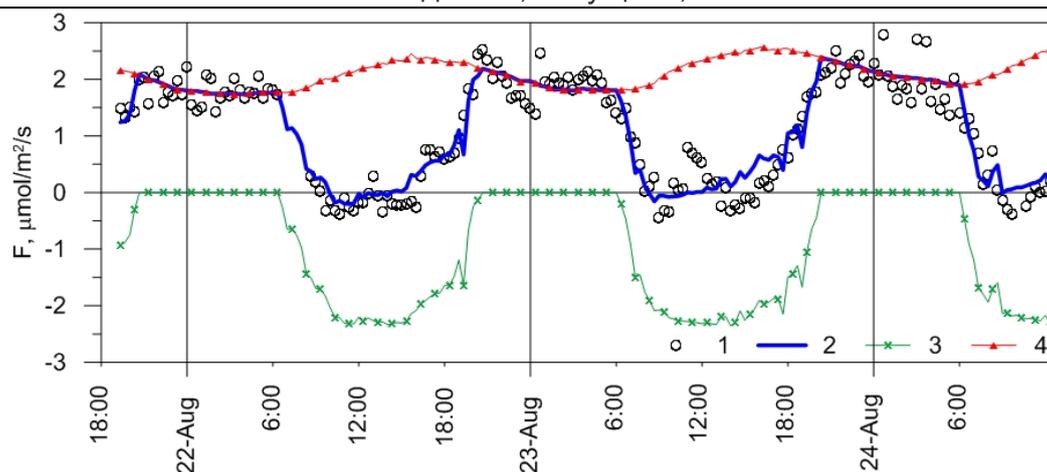


Рисунок 1. – Наблюдаемые (1) потоки CO<sub>2</sub> и модельные оценки экосистемного обмена (2), экосистемного дыхания (3) и ассимиляции CO<sub>2</sub> мхами (4) в августе 2014.

Для описания наблюдаемых потоков CO<sub>2</sub> была предложена простая модель:  
 $NEE = ER - GPP$ ;  $ER = R + H = f_E(T_a)$ ;  $GPP = f_G(PAR) f_G(X_T) f_G(VPD)$ ;  
 $f_E(T_a) = E_0 \cdot \exp(k_{T_a} \cdot T_a)$ ;  $f_G(PAR) = \alpha \cdot PAR \cdot G_m / (\alpha \cdot PAR + G_m)$ ;  
 $f_G(VPD) = \exp(-k_V \cdot VPD)$ ;  $f_G(X_T) = (X_T - X_T^0) / \max(X_T^i)$ ;  $X_T^i = X_T^{i-1} + (T_a^i - X_T^{i-1}) / k_{st}$ ,

где  $T_a$  – температура воздуха,  $X_T$  – функция состояния ассимиляции (Makela et al., 2008),  $VPD$  – дефицит парциального давления водяного пара,  $PAR$  – фотосинтетически активная радиация. Дыхание почвы и растений объединены в один поток и зависят от температуры. Эмпирические коэффициенты модели ( $E_0$ ,  $k_{T_a}$ ,  $k_{T_s}$ ,  $\alpha$ ,  $G_m$ ,  $k_V$ ) оценивались для всего периода наблюдения минимизацией расхождения между результатами расчетов и наблюдений. Сначала находились значения коэффициентов для почвенного дыхания, для чего использовались наблюдения в ночное время, а затем определялись коэффициенты в уравнении для  $GPP$  с использованием наблюдений в дневное время. Были получены следующие значения коэффициентов:  $E_0 = 0.095 \mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $k_{T_a} = 0.031 \text{ K}^{-1}$ ;  $\alpha = 0.011 \mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $G_m = 3.62 \mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $k_V = 0.004 \text{ мб}^{-1}$ .

Получено хорошее согласие между результатами модельных оценок и наблюдений в дневное время (см. рис. 1). Наблюдаемые вариации экосистемного дыхания в ночное время гораздо больше, чем модельные. Суточная амплитуда потока CO<sub>2</sub> составляет около 0,7  $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  с максимальными значениями скорости в 17:00 и минимальными в 6:00. Максимальная дневная ассимиляция CO<sub>2</sub> в результате фотосинтеза происходит около 16:00, и его скорость составляет 2,5  $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

#### 4. Заключение

С использованием предложенной модели, калиброванной по натурным камерным измерениям, мы смогли разделить оценки для экосистемного дыхания и фотосинтеза из данных суммарного экосистемного обмена, а также рассчитать общий поток углерода за теплое время года для мезо-олиготрофного осоково-сфагнового болота.

#### Литература

- Bubier J.L., Crill P.M., Mosedale A., Frolking S., Linder E. Peatland responses to varying interannual moisture conditions as measured by automatic CO<sub>2</sub> chambers // *Glob. Biogeochem Cycles*. 2003. -17(2). - P.1066.  
 Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A. Carbon budget of oligotrophic bog in southern taiga in Western Siberia // *Plant and Soil*. 2009. - 315. - pp. 19-34.  
 Makela A., Pulkkinen M., Kolari P., Lagergren F., Berbigier P., Lindroth A., Loustau D., Nikinma E., Vesala T., Hari P. Developing an empirical model of stand GPP with the LUE approach: analysis of eddy covariance data at five contrasting sites in Europe // *Glob. Change Biology*. 2008. - 14. -pp. 92-108.

## **ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СОВРЕМЕННУЮ ГОРИМОСТЬ ЛЕСОВ (НА ПРИМЕРЕ ТВЕРСКОЙ ОБЛАСТИ)**

Жаринов С.Н.

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*  
[snzharinov@mail.ru](mailto:snzharinov@mail.ru)

**Аннотация:** Возникновение и распространение лесных пожаров обусловлено влиянием ряда факторов. Методом корреляционного анализа на примере Тверской области проведена оценка степени влияния лесорастительных условий, метеорологических факторов и плотности населения на горимость лесов за 2006-2014 г.г. Определено, что ведущими факторами являются метеорологические условия и плотность населения.

Лесные пожары являются стихийным бедствием, оказывающим влияние на состояние окружающей среды, наносят ущерб экономике и здоровью человека не только в локальном, но и в глобальном масштабе. Изучение процессов, влияющих на количество и площадь пожаров, позволят принять правильные управленческие решения при организации охраны лесов.

Объект исследования – лесные пожары Тверской области. Цель исследования – определение зависимости горимости лесов Тверской области от погодных условий. В связи с чем, были поставлены следующие задачи: определить горимость лесов Тверской области, выявить степень влияния различных факторов на горимость, определить роль погодных условий в возникновении и распространении лесных пожаров.

Под горимостью понимается комплекс показателей: процент лесной площади, пройденной пожарами за определенный отрезок времени, от общей площади лесного фонда на территории; среднее число пожаров за сезон на 100 тыс. га лесной площади; средняя площадь одного пожара (Варуков, 1975). Расчет проводился на основе данных о количестве и площади лесных пожаров по лесничествам Тверской области (по средним значениям за период с 2006 по 2014 год). Проведенная классификация территории лесничеств по горимости, позволила выделить 3 уровня: высокий, средний, низкий. К высокому уровню горимости отнесено 26% лесов области, к среднему – 38%, к низкому – 36%.

На возникновение и распространение огня в лесу оказывает влияние 3 фактора: источник, лесорастительные условия, погодные условия (Щетинский, Коршунов, 2012).

Основным источником возникновения лесных пожаров на территории Тверской области является антропогенный фактор, более 90% пожаров возникает по вине человека. Поэтому при определении зависимости горимости от данного фактора использовалась информация о численности населения, проживающего на определенных территориях.

При определении зависимости горимости от лесорастительных условий, проведен корреляционный анализ данных о классах пожарной опасности по лесорастительным условиям лесничеств и показателей горимости по лесничествам.

Для того чтобы выявить зависимость горимости от погодных условий, проведен выбор комплексного показателя, отражающего степень пожарной опасности в лесах. По формуле, предложенной Е.А. Щетинским (2010), проведен расчет комплексного метеорологического показателя пожарной опасности в лесах по условиям погоды для всех метеорологических станций Тверской области на каждый день пожароопасного периода. Осредненное значение такого показателя за пожароопасный период присваивалось каждому лесничеству. Так же по средним данным определена корреляционная зависимость между горимостью и данными комплексного метеорологического показателя.

При определении корреляционной зависимости горимости лесов Тверской области от различных факторов, выявлено, что наибольшее влияние на возникновение и

распространение огня в лесу оказывают погодные условия (0,59), наименьшее – лесорастительные условия (отсутствует).

Корреляционная зависимость метеорологического фактора, количества и площади лесных пожаров будет характеризовать степень влияния погодных условий для определенных территорий а так же показывать эффективность, как агитационной работы, так и работу лесопожарных служб при тушении и предотвращении лесных пожаров в Тверской области. Для данной цели проведен корреляционный анализ зависимости количества и площади лесных пожаров от комплексного метеорологического показателя для каждого лесничества Тверской области.

Корреляционная зависимость выявлена, хотя характеризуется низкими значениями в среднем по области (0,24 и 0,31). Причиной является воздействие других факторов на возникновение и распространение огня. Для некоторых лесничеств показатели зависимости высокие (Торопецкое 0,57 и 0,51, Осташковское 0,49 и 0,48), что подтверждает факт зависимости горимости от условий погоды. Соответственно, на таких территориях метеорологический фактор при возникновении и распространении огня является определяющим.

Наименьшее значение корреляции по Тверской области показывает зависимость от площади пожаров, что говорит об эффективной работе лесопожарных служб региона. Наибольшую корреляционную зависимость показывает количество возникших лесных пожаров, поэтому в организации охраны лесов от пожаров необходимо отдельное внимание уделять профилактической работе, связанной с информированием населения о правилах пожарной безопасности в лесах.

## Литература

- База данных показателей муниципальных образований Тверской области – <http://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst28/DBInet.cgi#1> (20.03.2015)
- Вакуров А.Д. Лесные пожары на Севере. - М., 1975. - 100 с.
- Лесной план Тверской области – <http://les.tver.ru/index.php/normativnye-dokumenty> (16.03.2015).
- Щетинский Е.А. Организация охраны лесов и тушение лесных пожаров/ Учебное пособие. Пушкино, 2010. – 117 с.
- Щетинский Е.А., Коршунов Н.А. Охрана лесов и тушение лесных пожаров/ Учебное пособие (для подготовки руководителей тушения лесных пожаров). Пушкино, 2012. – 208 с.

## МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ В ПРОСТЕЙШИХ МОДЕЛЯХ ЭВОЛЮЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПОПУЛЯЦИЙ

Жданова О.Л.<sup>1,2</sup>, Фрисман Е.Я.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия  
[axanka@iacp.dvo.ru](mailto:axanka@iacp.dvo.ru)

<sup>2</sup>ФГБУН Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия  
[frisman@mail.ru](mailto:frisman@mail.ru)

**Аннотация:** Исследуется динамика численности и генетического состава однородной лимитированной популяции с плотностно-зависимым г-К отбором в одном диаллельном локусе. Проводится подробное изучение механизмов потери устойчивости рассматриваемой модели. Показано, что в достаточно обширных биологически содержательных областях параметров возможно одновременное существование нескольких различных предельных режимов, каждый из которых имеет свой бассейн притяжения.

### 1. Введение

Детальные исследования простейших моделей динамики численности, появившиеся в начале 70-х гг. прошлого века (Шапиро, 1972; Мау, 1975) показали, что динамика таких популяций, может быть неожиданно сложной. Обнаруженный недавно (Безручко и др., 2002; Кузнецов и др., 2012; Кулаков и др., 2014; Неверова, Фрисман, 2015; и др.) новый эффект нелинейной динамики - мультистабильность выражается в одновременном существовании в системе различных предельных режимов динамики, переход к которым определяется выбором начальных условий, привлек интерес исследователей, т.к. помимо удивительности самого феномена, позволяет объяснить случаи смены динамических режимов, наблюдаемые в реальных популяциях (напр., Kausrud et al., 2008; White, 2011).

### 2. Модель однородной популяции с г-К отбором по одному диаллельному локусу

В работе исследуются результаты действия естественного отбора по одному адаптивному признаку в однородной популяции диплоидных организмов:

$$\begin{cases} x_{n+1} = \bar{w}_n x_n \\ q_{n+1} = q_n (w_{AA} q_n + 2w_{Aa} (1 - q_n)) / \bar{w}_n \end{cases} \quad (1)$$

где  $n$  – это номер поколения,  $\bar{w}_n = w_{AA} q_n^2 + 2w_{Aa} q_n (1 - q_n) + w_{aa} (1 - q_n)^2$  – средняя приспособленность популяции в  $n$ -ом поколении,  $x_n$  – численность  $n$ -ого поколения,  $q_n$  – частота аллеля  $A$  в  $n$ -ом поколении,  $w_{AA}(n)$ ,  $w_{Aa}(n)$ ,  $w_{aa}(n)$  – приспособленности генотипов  $AA$ ,  $Aa$  и  $aa$  соответственно в  $n$ -м поколении. Предполагается экспоненциальный вид зависимости приспособленности от численности популяции:  $w_{ij} = \exp(R_{ij}(1 - x/K_{ij}))$ .

Мальтузианский параметр ( $R_{ij}$ ) характеризует репродуктивный потенциал популяции или скорость размножения популяции в пустоту (т.е. в отсутствие каких-либо ограничений по ресурсам). Ресурсный параметр ( $K_{ij}$ ) – это равновесное значение численности, которое было бы достигнуто популяцией, если бы она состояла только из особей с  $ij$ -м генотипом. Описаны результаты многих наблюдений г-и К-стратегий отбора в лабораторных и природных популяциях как низших, так и высших организмов (Long, Long, 1974; MacNaughton, 1975; Graham, 1977).

Аналитическое исследование модели (1) позволило получить условия существования и устойчивости всех ее нетривиальных стационарных точек (таблица 1), (Жданова, Фрисман, 2005). Анализ представленных результатов показывает, что хотя в общем и можно классифицировать динамику численности и генетического состава рассматриваемой

популяции на основе значений внутривидовых параметров ( $K_{ij}$  и  $R_{ij}$ ), немаловажную роль в определении направления эволюции и характера динамики популяции имеют начальные условия. Так в модели (1) возможен полиморфизм в параметрической области, где существуют только мономорфные равновесия и нет полиморфного; кроме того, возможно вытеснение оптимального по ресурсному параметру генотипа (при неблагоприятных для него начальных условиях).

Таблица 1 – Условия существования и устойчивости нетривиальных стационарных точек модели (1)

Стационарная точка	существование	устойчивость
<u>Мономорфная 1:</u> $q = 0, x = K_{aa}$	$R_{aa} > 0$ и $K_{aa} > 0$	$0 < R_{aa} < 2, K_{aa} > K_{Aa}$
<u>Мономорфная 2:</u> $q = 1, x = K_{AA}$	$R_{AA} > 0$ и $K_{AA} > 0$	$0 < R_{AA} < 2, K_{AA} > K_{Aa}$
<u>Полиморфная:</u> $\begin{cases} (w_{Aa}(x) - 1)^2 = (w_{AA}(x) - 1)(w_{aa}(x) - 1) \\ q = \frac{1 - w_{Aa}(x)}{w_{AA}(x) - w_{Aa}(x)} \end{cases}$	$K_{Aa} < \min(K_{AA}, K_{aa})$ или $K_{Aa} > \max(K_{AA}, K_{aa})$	$K_{Aa} > \max(K_{AA}, K_{aa})$ $-2 < x w_x' < 0$

В работе исследуются механизмы потери устойчивости и характер сложного динамического поведения генетической структуры и численности популяции. Строятся бассейны притяжения одновременно существующих предельных динамических режимов; таким образом производится оценка влияния начальных условий на направление эволюции естественной популяции.

### Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке комплексной программы фундаментальных исследований Дальневосточного отделения РАН "Дальний Восток" и РФФИ (проект 15-29-02658).

### Литература

- Безручко Б.П., Прохоров М.Д., Селезнев Е.П. Виды колебаний, мультистабильность и бассейны притяжения аттракторов симметрично связанных систем с удвоением периода // ПНД. – 2002. Т. 10, №4. - С.47 – 67.
- Жданова О.Л., Фрисман Е.Я. Динамические режимы в модели однолокусного плотностно-зависимого отбора // Генетика. - 2005. Т. 41, № 11. - С.1575 - 1584.
- Кулаков М.П., Неверова Г.П., Фрисман Е.Я. Мультистабильность в моделях динамики миграционно-связанных популяций с возрастной структурой // Нелинейная динамика. – 2014. Т. 10, № 4. – С.407 - 425.
- Кузнецов А.П., Савин А.В., Седова Ю. В., Тюрюкина Л. В. Бифуркации отображений. Саратов: Наука, 2012. - 196 с.
- Неверова Г.П., Фрисман Е.Я. Сравнительный анализ влияния различных типов плотностной регуляции на динамику численности структурированных популяций // Информатика и системы управления. – 2015. Т. 43, № 1. – С.41 - 53.
- Шапиро А.П. К вопросу о циклах в возвратных последовательностях // Управление и информация. - 1972. Вып. 3. - С.96 - 118.
- Graham J. Reproductive effect and r- and K-selection in two species of *Lacuna* (Gastropods: Prosobranchia) // Mar. Biol. – 1977. V.40, № 3. P.217 - 224.
- Kausrud K. L., Mysterud A., Steen H., Vik J. O., Ostbye E., Cazelles B., Framstad E., Eikeset A. M., Mysterud I., Solhoy T., and Stenseth N.C. Linking climate change to lemming cycles // Nature. – 2008. V. 456. - P.93 – 97.
- Long Th., Long G. The effects of r- and K-selection on components of variance for two quantitative traits // Genetics. – 1974. V. 76, № 3. P.567 - 573.
- MacNaughton S.J. r- and K-selec. in *Tipha* // Amer. Natur. – 1975. V.109, № 961. P. 251 - 261.
- May R.M. Biological population obeying difference equations: stable points, stable cycles, and chaos // J. Theor. Biol. - 1975. V.51, № 2. - P.511 - 524.
- White T.C.R. What has stopped the cycles of sub-Arctic animal populations? Predators or food? // Basic Appl. Ecol. – 2011. V. 12. - P.481 – 487.

## ДВА ПОДХОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНКУРЕНТНЫХ ОТНОШЕНИЙ ДЕРЕВЬЕВ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО

Жиренко Н.Г.

*Институт лесоведения РАН, Москва, Россия*  
[nzhirenko@mail.ru](mailto:nzhirenko@mail.ru)

**Аннотация:** на примере выявленных конкурентных отношений двух близко расположенных деревьев дуба черешчатого рассмотрены два подхода математического моделирования этого процесса.

Множество происходящих в природе процессов носит колебательный характер и подчиняется экспоненциальным законам. Рассмотрим два подхода, которые можно использовать при математическом описании означенных процессов, на примере выявленных нами конкурентных отношений двух деревьев дуба.

Исследования проводились в 2012 г. в течение вегетационного периода в Теллермановском лесном массиве (Воронежская обл.) и заключались в изучении радиального прироста ствола двух близко расположенных друг к другу деревьев дуба черешчатого IV класса возраста (деревья Д.46 и Д.48). Для этого, на стволы деревьев с южной стороны на высоте ~1.3 м были установлены разработанные нами дендрометры. Конструкция дендрометров и методика их установки позволяют определять изменения толщины заболонного слоя и вторичной коры. В свою очередь изменение толщины заболонного слоя и вторичной коры зависит от их прироста, температуры и влажности. Кроме этого, толщина заболонного слоя может меняться из-за различного сжатия водопроводящих сосудов, в результате возникающего в них отрицательного давления при транспирации. Таким образом, изменение обозначенной толщины может отображать текущее состояние дерева. По показаниям дендрометров были определены изменения обозначенной толщины ( $\Delta$ ), которые показаны на рисунке 1 в виде соответствующих графических символов. Времяисчисление ( $t$ ), в днях, начинается с 19.06.2012 г.

Одним из подходов при математическом описании полученных зависимостей, например, с использованием средств MS Excel, является аппроксимация экспериментальных данных путем построения их диаграммы с последующим подбором наиболее подходящей функции с помощью пункта программы "Добавить линию тренда". В результате этих действий на диаграмму можно вывести полученные уравнения, а также величину достоверности аппроксимации  $R^2$ . На рисунке 1 результаты аппроксимации представлены полиномиальными уравнениями и их графиками. Уравнение для Д.46 расположено в верхней части диаграммы, а для Д.48 – в нижней. Коэффициенты детерминации в обоих случаях, с точностью до десятых, равны 0.8. Это говорит об удовлетворительной аппроксимации, т.е. формулы в целом адекватны эмпирическим зависимостям. Тем не менее, не смотря на достаточно приемлемые результаты, очевидна громоздкость полученных уравнений. Вследствие этого, проведение анализа, например, с целью выявления отличительных признаков каких-либо других аналогичных процессов, будет достаточно затруднительным.

Рассмотрим второй подход. Как видно из рисунка 1, полученные графические зависимости носят колебательный характер. Следовательно, можно предположить, что исследуемая величина изменяется со временем по закону синуса (или косинуса). Кроме этого, по характеру уменьшения амплитуды колебаний с течением времени, можно предположить, что процесс является затухающим. Как правило, затухание колебаний происходит по экспоненциальному закону и описывается уравнением:

$$\Delta = A \sin(\omega t + \psi) \exp(-at) \quad (1)$$

где  $A$  – начальная амплитуда колебания,  $\psi$  – начальная фаза колебания,  $a$  – коэффициент

затухания. И еще одним отличительным моментом является то, что частота колебаний полученных зависимостей с течением времени увеличивается. Предположим, что увеличение частоты также происходит по экспоненциальному закону. Введем этот параметр в уравнение 1. Окончательно получим:

$$\Delta = A \sin(\omega t \exp(tk) + \psi) \exp(-at) \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий изменение частоты.

Конкурентные отношения исследуемых деревьев, как видно из графиков (рисунок 1), проявляются в том, что колебательные процессы изменения обозначенной толщины у деревьев происходят в противофазе. Следовательно, колебательный процесс Д.48 будет отставать по фазе от такового Д.46 на  $\pi$  (3.14 рад).

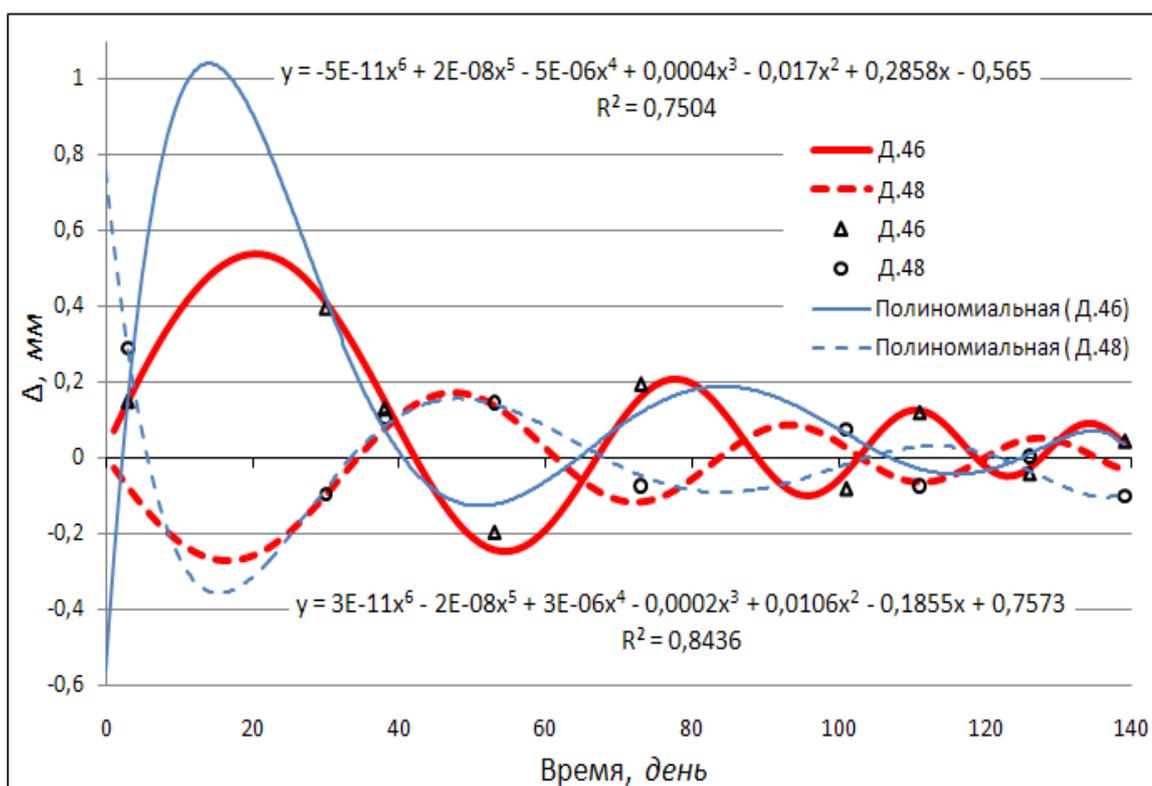


Рисунок 1 - Зависимости изменений толщины заболони и первичной коры деревьев дуба черешчатого (пояснения в тексте)

Воспользовавшись приемами аппроксимации экспериментальных данных и пакетом анализа "Поиск решения" в среде MS Excel не сложно подобрать все параметры уравнения 2. В итоге для исследуемых деревьев Д.46 и Д.48 мы получили следующие уравнения:

$$\Delta_{46} = 0.77 \cdot \sin(0.06 \cdot t \cdot \exp(t \cdot 0.007)) \cdot \exp(-0.02 \cdot t) + 0.03, R^2 = 0.97 \quad (3)$$

$$\Delta_{48} = 0.36 \cdot \sin(0.08 \cdot t \cdot \exp(t \cdot 0.004) + \pi) \cdot \exp(-0.02 \cdot t), R^2 = 0.83$$

(4)

Интерпретацию полученных результатов можно представить следующим образом. Введение в уравнение 4 значения  $\pi$  говорит о том, что взаимодействие определенных процессов у рассматриваемых деревьев, например, определяющих их состояние, находится в противофазе. Т.е. когда одно из деревьев находится в лучшем состоянии, то другое, наоборот, оказывается в худшем. Наибольшее значение амплитуды колебания наблюдается у Д.46. В первую очередь, это связано с большими приростами древесины у Д.46 в сравнении с Д.48. О лучшем состоянии Д.46 можно судить и по несколько меньшей частоте колебательного процесса ( $w_{46} = 0.06$  рад/с) по сравнению с Д.48 ( $w_{48} = 0.08$  рад/с). Это говорит о том, что Д.46 является более устойчивым к факторам окружающей среды. Увеличение же

частоты со временем у Д.46 ( $k_{46}=0.007$ ) в сравнении с Д.48 ( $k_{48}=0.004$ ) может быть связано с ухудшением состояния Д.46 в дальнейшем. По коэффициентам затухания  $a$  (коэффициенты равны) можно характеризовать естественное замедление физиологических процессов у растений к концу вегетационного сезона. Графики, построенные по уравнениям 3 и 4, показаны на рисунке 1 красным цветом.

Оба подхода приемлемы для целей математического моделирования. Однако, второй подход, в сравнении с первым, является намного информативнее. Кроме этого, наряду с возможностью сравнения сходных процессов, его применение дает возможность давать достаточно полные характеристики и отдельно взятого исследуемого процесса. Мы предполагаем, что в таком ракурсе взаимоотношение между конкурирующими растениями представляется впервые.

## СВЯЗЬ ПЕРВИЧНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА С ФИТОМАССОЙ ДЛЯ БИОМОВ ЕВРАЗИИ И ЕЕ РОЛЬ В МОДЕЛЯХ БИОТИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА В ЭКОСИСТЕМАХ ПОЛЯРНОГО ПОЯСА

Завалишин Н.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук,  
Москва, Россия  
[nickolos@ifaran.ru](mailto:nickolos@ifaran.ru)

**Аннотация:** Проведен анализ общедоступных баз данных о фитомассе и первичной продуктивности наземных экосистем Евразии с целью установления функциональной зависимости между ними в среднегодовом масштабе времени. Установлено, что для каждого климатического пояса характерна своя зависимость продуктивности от фитомассы, выражающая смену травяных растительных сообществ лесными. По данным баз Базилевич-Титляновой и Усольцева аппроксимированы функциональные формы зависимостей продуктивности от фитомассы в основных климатических поясах Евразии. На основе общности выявленных форм поставлена и решена математическая задача об определении коэффициентов зависимостей на основе минимизации длины аппроксимирующей кривой и метода наименьших квадратов. Одна из таких зависимостей, характерная для полярного пояса Евразии, используется при построении и бифуркационном анализе биотического круговорота в экосистемах тундры, лесотундры и северной тайги криолитозоны Западной Сибири. Исследуется эволюция биотического круговорота в этих экосистемах при изменениях климата по двум сценариям протокола СМIP5, отвечающим умеренному и экстремальному потеплению.

Формирование первичной биологической продукции является одной из важнейших и системообразующих функций растительного покрова в наземных экосистемах (Базилевич и др., 1986). Этот процесс, выраженный как один из основных потоков вещества, играет одну из главных ролей в биологическом круговороте углерода в наземных экосистемах и определяет его продукционную ветвь. Поэтому в любой математической модели биологического круговорота в наземных экосистемах на любом масштабе времени в уравнении углеродного баланса растительности выражение для чистой первичной продуктивности (ЧПП), т.е. разность фотосинтеза и автотрофного дыхания, как функция фитомассы и погодных параметров всегда играет определяющую роль. Опад и отчуждение растительности на среднегодовом интервале времени превышают ЧПП только в деградирующих или подверженных антропогенной нагрузке экосистемах. Поэтому линейное представление зависимости ЧПП от фитомассы, как правило, неадекватно для моделирования естественного функционирования биотического круговорота, поскольку ведет к экспоненциальному росту плотности фитомассы с течением времени, чего в действительности не наблюдается. В ряде биосферных моделей ЧПП вовсе не зависит от фитомассы, а определяется основными абиотическими факторами окружающей среды: поглощаемой фотосинтетически активной солнечной радиацией (ФАР), среднегодовой температурой приземного воздуха, годовой суммой осадков, влажностью почвы и т.п. (Голубятников, Денисенко, 2001). Зависимости ЧПП от указанных факторов, безусловно, имеют место, но вместе с этим ясно, что плотность фитомассы также должна играть роль в величине первичной продукции, отражая как внутреннюю конкуренцию растительного покрова за ресурсы, так и факт отсутствия ЧПП при нулевой фитомассе.

Идея настоящей работы состоит в том, что функциональные зависимости ЧПП от фитомассы необходимо искать отдельно для каждого климатического пояса, поскольку внутри него есть наборы экосистем с низкими (травяные) и высокими (лесные) значениями фитомассы, а климат сравнительно однороден. Эта идея не нова: в классической монографии (Базилевич и др., 1986) она предложена для классификации элементарных экосистем Северной Евразии. Реализация этой идеи проводится с помощью постановки и решения задачи об аппроксимации данных в каждом климатическом поясе посредством дробно-

рациональных функций, удовлетворяющих определенным условиям, калибровка которых делается на основе метода наименьших квадратов и минимизации длины аппроксимирующей кривой. Данные по одновременным измерениям фитомассы и продуктивности для климатических поясов Евразии обработаны по базам данных монографий (Базилевич и др., 1986; Базилевич, 1993; Базилевич и Титлянова, 2008), а для лесных экосистем использован массив данных из работы (Усольцев, 2010), который подтверждает существование предела ЧПП при высоких значениях фитомассы. Сложность получаемой дробно-рациональной зависимости определяется количеством экстремумов, выделяемых в массиве данных по каждому климатическому поясу. Для полярного пояса получена зависимость с одним максимумом, благодаря которой в динамических блоковых моделях круговорота возникают равновесия, соответствующие травяным (тундра), лесотравяным (лесотундра) и лесным (северная тайга) состояниям.

Для исследования биотического круговорота в экосистемах полярного пояса построены простейшие двухкомпонентные блоковые схемы совместного биотического круговорота углерода и азота. На основе подробной схемы для мохово-кустарничковой тундры п-ова Таймыр (Базилевич и др., 1986) созданы схемы совместного круговорота в притундровых и среднетаежных лиственничных лесах Восточной Сибири (Лесные экосистемы..., 2002; Permafrost ecosystems, 2010). Каждая схема включает углерод живого органического вещества (ЖОВ) и мертвое органическое вещество (МОВ) подстилки, напочвенного покрова и корнеобитаемого слоя почвы (рис. 1). В случае тундры (рис. 1-а) в состав ЖОВ входит биомасса консументов и деструкторов, разлагающих МОВ (потоки  $f_{21}^C$  и  $f_{21}^N$ ) и добавляющих к выходным потокам гетеротрофное дыхание  $y_{12}^C$ , что обусловлено их значительной ролью в динамике тундровой растительности. Для леса (рис. 1-б) данных об этом компоненте экосистем недостаточно, а его роль менее значительна, поэтому изъятие фитомассы фитофагами и потребление МОВ деструкторами представлено выходными потоками. Выбор потоковых функций из ограниченного набора линейных (донорный, реципиентный) и нелинейных (вольтерровский, с насыщением) дает почти все компоненты динамической модели. Взаимодействие между углеродным и азотным циклами обеспечивается двумя основными биохимическими механизмами: 1) интенсивность опада пропорциональна отношению  $C:N$  в фитомассе, и при недостатке азота повышается (азотное голодание растений); 2) интенсивность разложения мертвого органического вещества уменьшается при увеличении отношения  $C:N$  в нем (Alexandrov et al., 1994). Калибровка потоков осуществляется прямым вычислением коэффициентов, либо использованием равновесных соотношений (Zavalishin, 2008). Экологическая интерпретация вычисляемых модельных равновесий осуществляется по работе (Абаимов, 2005), а сравнение среднегодовых значений запасов согласуется с наблюдавшимися в нескольких типах тундр по (Карелин и Замолодчиков, 2008). Анализ бифуркаций равновесий делается в пространстве параметров, отвечающих величине притока МОВ в систему извне, интенсивностям ассимиляции углерода растительностью из атмосферы, стока и разложения мертвого органического вещества. Дополнительный приток мертвого органического вещества связан с особенностями зоны многолетней мерзлоты: углерод, скованный в мерзлых слоях почвы, при оттаивании способен дать существенную добавку к обычному пулу МОВ.

Перемещение через границы устойчивости равновесий соответствует переходу экосистемы в другое стационарное состояние или к колебательному режиму в зависимости от типа границы. Такое перемещение и порождается изменением коэффициентов модели, зависящих от климатических величин – средней температуры и годовой суммы осадков, сценарий изменения которых предлагается какой-либо климатической моделью. В данной работе используются два сценария RCP-26 и RCP-85 модели IPSL с умеренным и экстремальным потеплением. При экстремально теплом сценарии в первые десятилетия этого периода лесотундра наступает на тундровые сообщества, а лиственничники продвигаются в лесотундру. Однако степень их продвижения сильно лимитирована

доступным азотом в почве, количество которого поначалу растет. При экстремально теплом сценарии оттаивающая мерзлота резко повышает влажность, тундра и лесотундра заболачиваются, что сопровождается ростом эмиссии ранее захороненного в многолетнемерзлых грунтах углерода, а в дальнейшем уменьшением доступного растениям азотного питания. Умеренно теплый сценарий способствует приросту живой биомассы и ускорению разложения МОВ, но недостаток почвенного азота также лимитирует рост фитомассы. Биотический круговорот в тундровых биогеоценозах при определенных значениях параметров демонстрирует колебательную динамику, подтверждая точку зрения биологов об отсутствии явно выраженного климаксного состояния тундровых растительных сообществ.

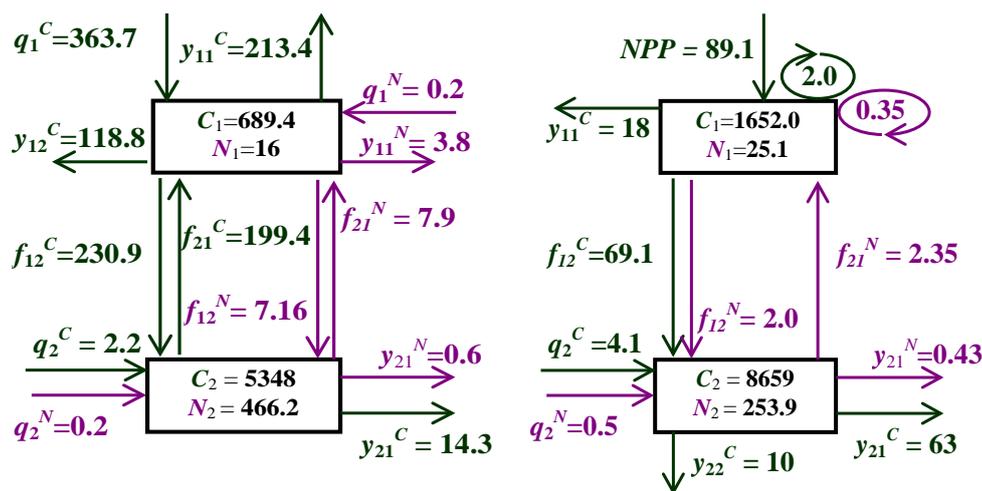


Рис. 1. Агрегированные двухкомпонентные схемы совместного биотического круговорота углерода и азота.

- а) мохово-кустарничковая тундра на Таймыре (ЖОВ включает фитофагов и деструкторов);
- б) лиственничник 105 лет в Туре, средняя тайга Вост. Сибири (ЖОВ не включает фитофагов и деструкторов).

Запасы углерода ( $гC/м^2$ ), азота ( $гN/м^2$ ):  $C_1, N_1$  – живое органическое вещество;  $C_2, N_2$  – опад, подстилка, органическое вещество корнеобитаемого слоя почвы. Потоки ( $гC/м^2$ год для углерода,  $гN/м^2$ год для азота):  $q_1^C$  – ассимиляция углерода растительностью,  $q_1^N, q_2^N$  – привнос азота из соседних экосистем и фиксация атмосферного азота микроорганизмами,  $q_2^C$  – привнос мертвого органического вещества из соседних экосистем,  $y_{11}^C$  – автотрофное дыхание;  $y_{12}^C, y_{12}^N$  – вынос со стоком и потребление фитофагами (б) и гетеротрофное дыхание (а),  $y_{21}^C, y_{21}^N$  – разложение деструкторами и денитрификация,  $y_{22}^C, y_{22}^N$  – вынос МОВ со стоком,  $f_{21}^N$  – потребление азота растительностью из доступного почвенного или торфяного пула,  $f_{12}^C, f_{12}^N$  – опад,  $f_{21}^C$  – потребление МОВ деструкторами (а).

*Работа поддержана Программой № 11 Отделения наук о Земле РАН «Влияние современных изменений климата и окружающей среды на процессы в атмосфере и криосфере» и проектом 13-05-00781а РФФИ.*

## Литература

- Абаимов А.П., Особенности и основные направления динамики лесов и редколесий в мерзлотной зоне Сибири. // *Сибирский экологический журнал*, 2005, № 4, с. 663-675.
- Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А., Географические особенности структуры и функционирования экосистем. – М., Наука, 1986, 297 с.
- Базилевич Н.И., Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М., Наука, 1993, 293 с.
- Базилевич Н.И., Титлянова А.А., Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в наземных экосистемах. - Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2008.
- Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Углеродный цикл в криогенных экосистемах. – М., Наука, 2008, 344 с.

- Лесные экосистемы Енисейского меридиана. // под ред. Ф.И. Плешикова, Изд-во СА РАН, Новосибирск, 2002, 356 с.
- Усольцев В.А., Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. – Екатеринбург, УрО РАН, 2010, 569 с.
- Permafrost ecosystems: Siberian larch forests. // eds. Osawa A., Zyryanova O.A., Matsuura Y., Kajimoto T., Wein R., 2010, Springer Ecological Studies series, v. 209.
- Zavalishin N.N., Dynamic compartment approach for modeling regimes of carbon cycle functioning in bog ecosystems. *Ecological Modelling*, 2008, v. 213, p. 16-32.

## ДИФфуЗИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ И СТРУКТУРЫ ТЬЮРИНГА В МОДЕЛЯХ ТРОФИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ТИПА «РЕСУРС-ПОТРЕБИТЕЛЬ» С ТАКСИСОМ

Завалишин Н.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук,  
Москва, Россия  
[nickolos@ifaran.ru](mailto:nickolos@ifaran.ru)

**Аннотация:** Стационарные состояния в пространственно-неоднородных моделях трофических цепей типа «ресурс-потребитель» могут терять устойчивость посредством механизма Тьюринга с образованием диссипативных структур. Учитывая в исследовании таких цепей явление таксиса по ресурсу, можно получить динамические пространственные модели с кросс-диффузионными слагаемыми. Получены необходимые и достаточные условия возникновения бифуркации Тьюринга в открытых однокомпонентных цепях с ресурсом при изменении скорости притока ресурса извне и значений промысла на верхнем уровне.

Для биологических сообществ с вертикальной структурой, которые и называются трофическими цепями, если их последовательные компоненты связаны между собой отношениями типа «хищник-жертва» (Свирижев, Логофет, 1978), характерно существенно нелинейное поведение, богатое различными типами бифуркаций равновесий и периодических колебаний и сценариями возникновения странных аттракторов. Особый интерес представляют эксплуатируемые трофические цепи с точки зрения прогноза численности участвующих популяций при вариациях промысла и с позиций оценки изменений структуры и функционирования экосистемы под действием климатических изменений. Существуют два различных модельных представления трофических цепей: одно основано на уравнениях динамики популяций, взаимодействующих по типу хищник-жертва, а второе рассматривает цепь с точки зрения поступающего на вход ресурса, явно задавая его баланс в системе. При этом один уровень такой цепи могут составлять целые группы видов, имеющих сходные функциональные роли в экосистеме. Такую цепь будем называть трофической цепью типа «ресурс-потребитель». Если плотности составляющих уровней неоднородны по пространству, то возникает задача реакции-диффузии. В результате потери устойчивости пространственно-однородного решения в трофической цепи «ресурс-потребитель» может появиться устойчивое пространственно-неоднородное равновесие, называемое диссипативной структурой (Свирижев, 1987). В работах последних лет показано, что эффект таксиса (движение потребителя по градиенту ресурса) играет важную роль в появлении диссипативных структур в системах реакции-диффузии (Березовская и Карев, 1999). Диффузионная неустойчивость и образование диссипативных структур в трофических цепях типа «ресурс-потребитель» исследовались в работах 80-х годов (Свирижев, 1987). Однако важный с биологической точки зрения эффект таксиса как направленного движения особей по градиенту ресурса учтен в моделях этого типа цепей не был. Учет этого природного эффекта приводит к появлению кросс-диффузионных слагаемых в обычных уравнениях реакции-диффузии. В водных экосистемах на динамику трофических цепей сильное воздействие оказывает перенос ресурса и потребителей течениями (адвекция).

Пусть трофическая цепь состоит из  $n$  уровней с плотностями  $N_i$ , первый из которых потребляет ресурс  $R$ , поступающий в систему с фиксированной скоростью  $Q$  (рис. 1). Удельная зависимость скорости выедания жертв  $N_{i-1}$  особями хищников  $N_i$  от плотности популяции жертв называется трофическим откликом  $V_i$  и в произведении с численностью хищников дает поток биомассы от одного уровня цепи к другому. Балансовые уравнения ТЦ имеют вид:

$$\frac{dN_0}{dt} = Q_0 - V_0(N_0)N_1 + \sum_{i=1}^n a_i m_i N_i, \quad (1)$$

$$\frac{dN_i}{dt} = k_i V_{i-1}(N_{i-1})N_i - V_i(N_i)N_{i+1} - m_i N_i, N_{n+1} \equiv 0$$

где  $m_i$  - коэффициенты смертности,  $a_i$  - коэффициенты утилизации ресурса,  $k_i$  - коэффициенты усвоения ресурса на  $i$ -ом уровне. Частично замкнутой ТЦ называется цепь с  $0 < k_i < 1$ ,  $0 < a_i < 1$  и  $Q_0 > 0$ . Замкнутой ТЦ называется цепь с  $k_i = a_i = 1$  и  $Q_0 = 0$ . В этом случае общее

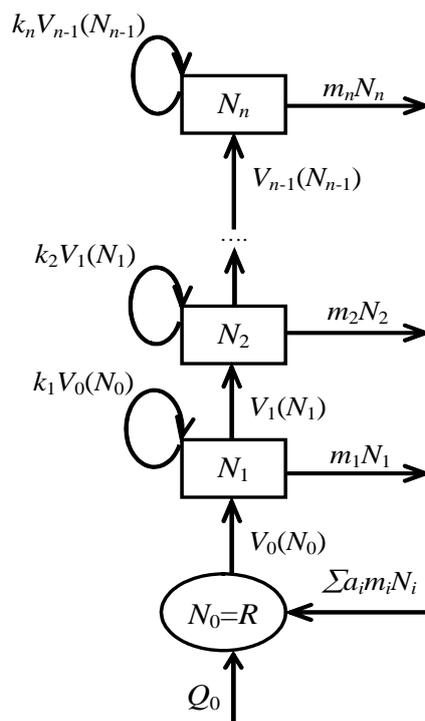


Рис. 1.

Частично замкнутая трофическая цепь длины  $n$  с явным описанием поступающего с интенсивностью  $Q_0$  извне ресурса  $R$ .

$N_i$  - плотность или биомасса  $i$ -ого уровня,  $V_i$  - функциональный (трофический) отклик  $i$ -го уровня,  $m_i$  - естественная смертность + интенсивность промысла,  $a_i$  - показатель восстановления ресурса,  $k_i$  - коэффициент усвоения ресурса на  $i$ -м уровне.

количество вещества сохраняется:  $\sum_{i=1}^n x_i = C = const$  и является естественным параметром динамической системы. Пространственно-неоднородная трофическая цепь типа “ресурс-потребитель” вид:

$$\frac{\partial R}{\partial t} = D_R \frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + Q(x) - V_0(R)N_1 + \sum_{i=1}^n a_i m_i N_i,$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial N_1}{\partial x} D_1 - \Psi_1(N_1)N_1 - \frac{\partial R}{\partial x} \Phi_1(R, N_1) \right] + k_1 V_0(R)N_1 - V_1(N_1)N_2 - m_1 N_1, \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\partial N_i}{\partial x} D_i - \Psi_i(N_i)N_i \right] + k_i V_{i-1}(N_{i-1})N_i - V_i(N_i)N_{i+1} - m_i N_i, N_{n+1} \equiv 0$$

где учитываются случайные перемещения особей (диффузия) с коэффициентами  $D_R, D_i$ , направленные перемещения по градиенту ресурса (таксис) и адвективные перемещения,

обусловленные физическими процессами в окружающей среде. К этим уравнениям добавляются начальные условия и граничные условия Дирихле, либо Неймана, либо смешанного типа.

Далее будем рассматривать одноуровневую систему (2) с  $n=1$  на одномерном отрезке  $\Omega=[0,L]$  без учета адвективных движений (динамика цепи определяется только биологическими факторами). Ресурс  $N_0$  обозначен через  $R$ . Функция  $\Phi$  характеризует таксис по ресурсу: следуя работам (Березовская, Карев, 1999) и (Ванаг, 2008), выберем интенсивность таксиса  $\Phi(R, N_1)$  в мультипликативном виде  $\Phi(R, N_1) = \gamma P(R)S(N_1)$ , где  $\gamma$  – коэффициент интенсивности. Интенсивность входного потока ресурса  $Q$  зависит от точки пространства. Тогда получим систему из двух уравнений реакции-диффузии, в которых учет таксиса приводит к появлению кросс-диффузионного слагаемого:

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial t} = D_R \frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + Q(x) - V_0(N_0)N_1 + a_1 m_1 N_1, \\ \frac{\partial N_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} - \gamma \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial R}{\partial x} P(R)S(N_1) \right) + k_1 V_0(R)N_1 - m_1 N_1 \end{cases} \quad (3)$$

Модель (3) дополняется начальными условиями и граничными условиями Неймана:

$$\begin{cases} R(x,0) = R_0(x) \\ N_i(x,0) = N_i^0(x) \end{cases} \text{ и } \begin{cases} \left. \frac{\partial R}{\partial x} \right|_{\partial\Omega} = 0 \\ \left. \frac{\partial N_i}{\partial x} \right|_{\partial\Omega} = 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Задача (3)-(4) имеет единственное стационарное решение, однородное по пространству:  $[R^*; N_1^*] = [V_0^{-1}(\frac{m_1}{k_1}); \frac{Q}{m_1(1/k_1 - a_1)}]$ . Для локальной системы оно асимптотически устойчиво,

поскольку из вида матрицы Якоби

$$J_L = \begin{pmatrix} -N_1^* \frac{dV_0}{dR} \Big|_{R^*} & a_1 m_1 - V_0(R^*) \\ k_1 N_1^* \frac{dV_0}{dR} \Big|_{R^*} & k_1 V_0(R^*) - m_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ d & e \end{pmatrix} \text{ следует выполнение условий Рауса-Гурвица:}$$

$\det J_L > 0$   $\text{tr} J_L < 0$ . Матрица Якоби системы (3) выражается через якобиан локальной системы ОДУ:

$$J_M = J_L - \mu^2 \begin{pmatrix} D_R & 0 \\ \gamma P(R^*)S(N_1^*) & D_1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где  $\mu$  - волновое число. Необходимым условием неустойчивости Тьюринга является неравенство  $\det J_M < 0$ . Равенством определяются критические значения волнового числа, при которых происходит бифуркация Тьюринга, в результате которой однородное по пространству равновесие может смениться диссипативной структурой. Определитель матрицы  $J_M$  имеет вид:

$$\det J_M = D_1 D_R \mu^4 + \mu^2 (b \gamma P(R^*)S(N_1^*) - a D_1) - b d < 0. \quad (6)$$

Ветви параболы направлены вверх, поэтому неравенство (6) удовлетворяется для тех значений  $\mu$ , которые попадают в интервал между корнями полинома при условии  $b \gamma P(R^*)S(N_1^*) - a D_1 < 0$  и неотрицательном дискриминанте биквадратного полинома в (6). Отсюда следует необходимое условие неустойчивости Тьюринга однородного равновесия простейшей трофической цепи (3):

$$\frac{D_1 Q}{m_1(1/k_1 - a_1)} \frac{dV_0}{dR} \Big|_{R^*} > 2 \sqrt{D_R D_1 Q k_1 \frac{dV_0}{dR} \Big|_{R^*}} + m_1(1/k_1 - a_1) \gamma P(R^*)S(N_1^*) \quad (7)$$

**Теорема.** Пространственно однородное стационарное состояние системы (3) с начальными и граничными условиями (4), асимптотически устойчивое для локальной системы, теряет устойчивость путем бифуркации Тьюринга в том и только в том случае, если выполнено неравенство (7), и среди собственных чисел оператора  $-\Delta$  с граничными условиями Неймана  $0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \dots$  найдется хотя бы одно, лежащее в интервале  $(\mu_1, \mu_2)$  корней полинома из (6).

В случае простейшей билинейной формы таксиса с  $P(R) = R$  и  $S(N_1) = N_1$  неравенство (7) принимает форму:

$$\frac{D_1 Q}{m_1(1/k_1 - a_1)} \left. \frac{dV_0}{dR} \right|_{R^*} > 2 \sqrt{D_R D_1 Q k_1 m_1 \left. \frac{dV_0}{dR} \right|_{R^*}} + \gamma Q V_0^{-1} \left( \frac{m_1}{k_1} \right). \quad (8)$$

Собственными значениями оператора  $-\Delta$  с граничными условиями Неймана на отрезке  $\Omega$  являются  $\lambda_n = (\pi n/L)^2$  с  $n=0,1,2,\dots$ . Следовательно, достаточным условием возникновения диффузионной неустойчивости однородного стационарного решения задачи (3)-(4) является попадание хотя бы одного из этих собственных чисел в интервал между корнями  $(\mu_1, \mu_2)$  из (6). Это означает, что длина интервала должна превышать как минимум  $\pi/L$ :  $\mu_1 - \mu_2 \geq \pi/L$ , т.е.  $(\mu_1 - \mu_2)^2 \geq (\pi/L)^2$ . Это неравенство эквивалентно  $aD_1 - \gamma b P(R^*) S(N_1^*) - 2 \det J_L \geq D_R D_1 (\pi/L)^2$ , которое после подстановки выражений для  $a, b$  и функции таксиса принимает вид:

$$Q \left[ \left. \frac{dV_0}{dR} \right|_{R^*} \left( \frac{D_1}{m_1(1/k_1 - a_1)} - 2k_1 \right) - \gamma V_0^{-1} \left( \frac{m_1}{k_1} \right) \right] \geq D_R D_1 \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) ясно, что диффузионный фактор может являться источником неустойчивости однородного стационарного решения однокомпонентной трофической цепи даже и без таксиса. Сравнение выражений (8) и (9) показывает, что достаточное условие неустойчивости обеспечивает более широкий интервал устойчивости пространственно-однородного равновесия, чем необходимое. Из неравенства (8) видно, что присутствие таксиса повышает порог значений скорости притока внешнего ресурса  $Q$ , при которой происходит потеря устойчивости пространственно однородного стационарного состояния трофической цепи, по сравнению со случаем, когда диффузия является единственным пространственным фактором.

Т.о., показано, что даже для простой одноуровневой ТЦ типа “ресурс-потребитель” учет фактора таксиса ведет к потере устойчивости однородного стационарного состояния по механизму Тьюринга. Причем важно то, что в пространственно агрегированной ТЦ с одним уровнем не происходит потери устойчивости единственного нетривиального равновесия. Поэтому следующим логическим шагом является доказательство возможности кросс-диффузионной неустойчивости в ТЦ длины два и более, а также численно-аналитическое исследование свойств образующихся в этом случае диссипативных структур.

*Работа частично поддержана проектом РФФИ № 13-04-01836-а.*

## Литература

- Березовская Ф.С., Карев Г.П., Бифуркации бегущих волн в популяционных моделях с таксисом. //Успехи физических наук, 1999, т. 169, № 9, с. 1011-1024.  
Свирижев Ю.М., Логофет Д.О., Устойчивость биологических сообществ. – М., Наука, 1978.  
Свирижев Ю.М., Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. – М., Наука, 1987, 366 с.  
Ванаг В.К., Диссипативные структуры в реакционно-диффузионных системах: эксперимент и теория. – “РХД”, Москва-Ижевск, 2008, 300 с.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБМЕННОГО ФОРМАТА DARWIN CORE ДЛЯ СОЗДАНИЯ WEB-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПО РАСПРОСТРАНЕНИЮ РЕДКИХ ВИДОВ, СОВМЕСТИМОЙ С МЕЖДУНАРОДНОЙ БАЗОЙ ДАННЫХ GBIF

Иванова Н.В.<sup>1,3</sup>, Шашков М.П.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт математических проблем биологии, Пущино, Россия

[natalya.dryomys@gmail.com](mailto:natalya.dryomys@gmail.com)

<sup>2</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, Пущино, Россия

[max.carabus@gmail.com](mailto:max.carabus@gmail.com)

<sup>3</sup>Пущинский государственный естественно-научный институт, Пущино, Россия

**Аннотация:** На примере базы данных о распространении охраняемого лишайника лобарии легочной (*Lobaria pulmonaria*) по территории России описаны возможности использования международного обменного формата Darwin Core для обобщения данных о находках редких видов.

Анализ международного и российского опыта разработки информационных систем в области биоразнообразия показал, что для создания баз данных о находках видов наиболее целесообразно использовать общепринятые мировые стандарты, используемые в международной базе данных GBIF ([gbif.org](http://gbif.org)) (Иванова, Шашков, 2014). В области организации информации о находках видов таким стандартом является формат обмена данными Darwin Core (Wieczorek et al., 2012). Формат Darwin Core позволяет описать данные об экспонатах, находящихся в музейных коллекциях, гербарных образцах, полевых находках и наблюдениях, а также литературные сведения о находках видов. Также есть возможность вносить данные о точках, где целевой вид не был обнаружен.

Получая данные о находках видов через портал GBIF, пользователь загружает на локальный компьютер так называемый «датасет» или набор данных (Dataset). Он представляет собой архив (Darwin Core Archive), состоящий из нескольких файлов (рис. 1). Файл(ы) с метаданными (Descriptor file) содержат описание загруженного набора данных в xml-формате. Непосредственно информация о находках видов (Core Data) находится в файле occurrence.txt. Кроме того, в архиве содержится дополнительная информация (Extension Data), в т.ч. о правилах цитирования данных (файл citations.txt), приводится перечень всех источников, из которых собран конкретный набор данных. Цитирование всего набора данных возможно посредством уникального идентификатора электронного объекта (doi), который присваивается каждому «датасету». Важно отметить, что все файлы, содержащиеся в компонентах Descriptor file и Extension Data, представляют собой формализованные сводки на основе информации о находках (компонент Core Data).

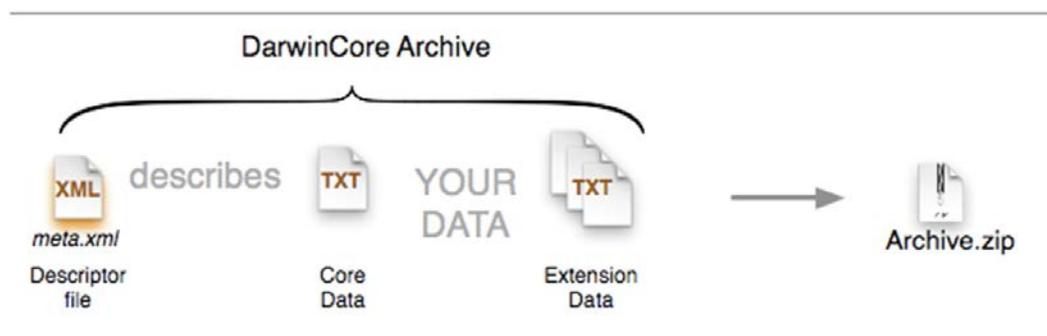


Рисунок 1 – Компоненты формата Darwin Core (по Global Biodiversity Information Facility). Пояснения в тексте.

Ранее нами была разработана веб-ориентированная информационная система для изучения распространения редкого охраняемого лишайника *Lobaria pulmonaria* по территории России (Шашков, Иванова, 2012). Разработка основана на базе данных, организованной средствами СУБД PostgreSQL. На апрель 2015 г. в базе содержались данные о 502 находках лобарии легочной из 40 субъектов РФ. Для наполнения базы использованы литературные данные (35 источников), данные гербарных коллекций, информация из открытых баз данных (GBIF, CRIS), устные сообщения исследователей. Интерактивная карта распространения *Lobaria pulmonaria* доступна в сети Интернет ([http://www.lobaria.ru/map/lobaria\\_map.html](http://www.lobaria.ru/map/lobaria_map.html)).

Для совмещения данных базы с форматом, используемым в системе GBIF, потребовалось привести атрибутивные данные о находках *Lobaria pulmonaria* в соответствие формату Darwin Core. Первоначально структура базы о распространении лобарии легочной включала поля, описывающие авторов находки, местоположение и время находки, характеристики местообитания, особенности дерева (форофита), на котором обнаружена *Lobaria pulmonaria*, а также описание ее популяции. Эти характеристики предусмотрены форматом Darwin Core в рамках компонента Core Data в разделах Местонахождение (Location), Находка (Occurrence) и Наблюдение (Observation). Для приведения данных базы о распространении лобарии легочной к международному стандарту потребовалось расширение и уточнение содержащейся в ней атрибутивной информации.

Так, в исходной базе данных географическая привязка находки была возможна на уровне субъекта РФ, административного района субъекта или географических координат. Раздел Location формата Darwin Core помимо этих полей предусматривает сведения о точности географической привязки находки, способе привязки, перечень использованных для привязки источников, состоянии верификации привязки и некоторые другие. В рамках разделов Occurrence и Observation были более полно описаны места обитания лобарии легочной, особенности ее форофитов и популяций. Добавлены поля, содержащие информацию о счетных единицах и единицах измерения обилия *Lobaria pulmonaria*, методах полевых исследований. Кроме того, потребовалось обновить информацию базы в рамках раздела Record-Level Terms, который включает сведения о правообладателях, условиях использования данных, библиографические (или другие) ссылки для цитирования данных, сведения об организациях, в которых хранятся гербарные образцы и др.

Таким образом, на основе стандарта Darwin Core находки лобарии легочной были описаны более полно, что обеспечивает сравнимость данных полученными разными исследователями и из разных источников. Мы считаем, перспективным использование данного формата как основу для обобщения данных о распространении редких видов разных систематических групп.

## Литература

- Иванова Н.В., Шашков М.П. Перспективы создания открытого всероссийского информационного ресурса по биоразнообразию на основе международного стандарта GBIF // Математическая биология и биоинформатика. 2014. Т. 9. Вып. 2. С. 396-405.
- Шашков М.П., Иванова Н.В. Web-ориентированная информационная система по изучению ареала редкого лишайника лобарии легочной (*Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm.) // Математическая биология и биоинформатика. 2012. Т. 7. Вып. 1. С. 334-344.
- Global Biodiversity Information Facility – free and open access to biodiversity data. URL: [www.gbif.org](http://www.gbif.org) (дата обращения: апрель 2014).
- Wieczorek J., Bloom D., Guralnick R., Blum S., Dorring M., Gilovanni R., Robertson T., Vieglais D. Darwin core: An Evolving Community-Developed Biodiversity Data Standart. PLoS ONE. 2012. V. 7. № 1. P. 1–8.

## ЭКОТОН КАК ЗОНА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ВТОРОГО РОДА

<sup>1</sup>Иванова Ю.Д., Суховольский В.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*  
[lulja@yandex.ru](mailto:lulja@yandex.ru)

<sup>2</sup>*Институт леса им.В.Н.Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия*  
[soukhovolsky@yandex.ru](mailto:soukhovolsky@yandex.ru)

**Аннотация:** предложена модель экотона как переходной зоны между растительными сообществами разного типа. Для описания пространственного градиента растительности предложена модель фазового перехода второго рода. Введено понятие экотонного барьера, для описания которого использован показатель нормированного энтропийного индекса разнообразия. Модель верифицирована на данных о высотно-зональных поясах растительности в горных условиях Саян.

Экотон определяется как контактная «зона» между соседними растительными сообществами или между соседними экосистемами (Clements, 1928; Одум, 1985; Коломыц, 2003). В зоне экотона образуются сообщества, характеризующиеся специфическим составом и пространственной структурой. Изменение характера межвидовых взаимодействий в зоне экотона приводит к тому, что видовой состав экотона характеризуется наличием пространственных градиентов разных видов растений, встречающихся в экотоне. В связи с этим экотон сложно описать как точечный экологический объект. И для анализа процессов, происходящих в пространстве и времени на границе различных экосистем, необходимо ввести количественные характеристики, определяющие состояние экотона.

### Объекты и методы исследований

Для описания экотонов в горных лесах были проанализированы данные по видовому составу древесных растений вдоль трех высотных трансект в Саянах (юг Средней Сибири), от высоты 300 м н.у.м. до высоты 1700 м н.у.м. В нижней части этих трансект преобладают береза и осина, на высоте около 1000 м н.у.м. преобладает пихта сибирская, далее к высоте 1500 м н.у.м. лесной пояс постепенно сменяется горным лугом (Суховольский и др., 2014).

Для описания видового состава ценозов А и В и экотона рассматривалась линейная трансекта  $(-\infty, L, +\infty)$  где  $L$  – некоторая произвольная точка на трансекте, точка  $-\infty$  соответствует левой границе ценоза А, а точка  $+\infty$  – правой границе ценоза В. Для описания изменений видового состава древесных растений вдоль трансекты рассмотрена модель экологических фазовых переходов второго рода с двумя параметрами порядка (Суховольский и др., 2008; Суховольский и др., 2014).

В качестве параметра порядка  $q_1(j)$  введена доля растений вида  $j$  в произвольной точке  $L$  на трансекте. В качестве параметра порядка  $q_2$  введена величина нормированной энтропии сообщества:

$$q_2(L) = 1 - \frac{H(L)}{\ln n} = 1 - \frac{-\sum_{r=1}^n p(r, L) \ln p(r, L)}{\ln n}$$

где  $n$  – число видов древесных растений, наблюдаемых в пределах изучаемой системы, состоящей из ценозов А и В и экотона),  $p(r, L)$  – доля вида  $r$  в точке  $L$ ;  $r = 1, \dots, n$ .

В произвольной точке  $L$  на трансекте параметры порядка  $q(L)$  могут изменяться в пределах от 0 до 1.

### Результаты и обсуждение

На рис.1. показано изменение величины  $q_1^2$  для фазового перехода «лес – горный

луг» на северном и южном мегасклонах Саян.

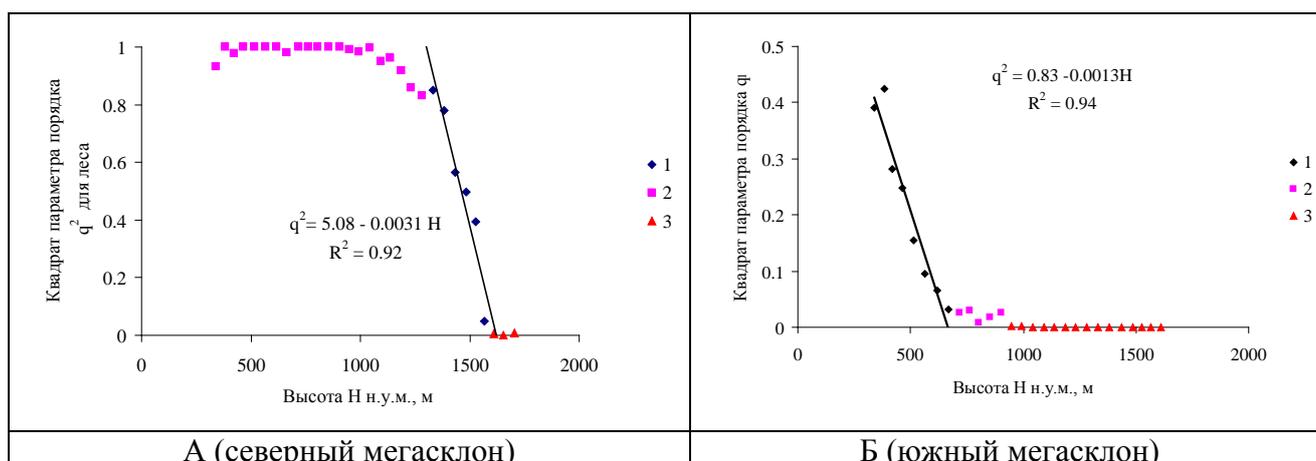


Рисунок 1. Изменение  $q_1^2$  при экологическом фазовом переходе «лес – луг» на северном и южном мегасклонах (1 – зона фазового перехода, 2 – лесной ценоз, 3 – луг).

Из модели фазового перехода второго рода можно оценить верхнюю критическую высоту лесного ценоза  $H = 1333$  м на северном мегасклоне и нижнюю критическую высоту лугового ценоза  $H_{min} = \frac{5.08}{0.0031} = 1639$  м. Разность высот в пределах экотона составляет  $1639$  м –  $1333$  м =  $306$  м.

Наряду с фазовыми переходами второго рода на границе ценозов может существовать зона экотонного барьера, которая характеризует участок трансекты с минимальными значениями параметров порядка  $q_1$  и  $q_2$  (рис.1 Б и 2Б).

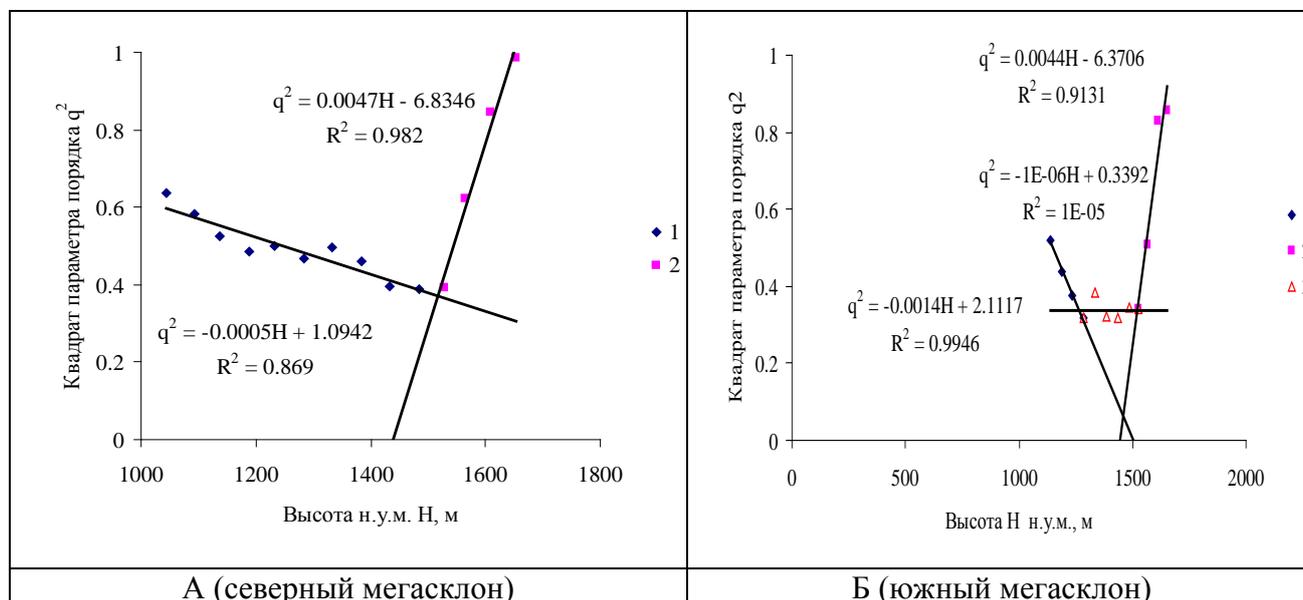


Рисунок 2. Изменение  $q_2^2$  вдоль трансекты при экологическом фазовом переходе «лес – луг» (1 – лесной ценоз, 2 – луг, 3 – экотонный барьер).

Функциональная роль экотонного барьера может заключаться в разграничении лесного и лугового сообществ и «торможении» смещения по трансекте зоны фазового перехода второго рода и сдвигов границы сообществ. Если восприимчивости параметров порядка  $\frac{\partial q_1}{\partial H}$  и  $\frac{\partial q_2}{\partial H}$  к воздействию внешнего модифицирующего фактора  $H$  в пределах

экотонного барьера низки, то экотонный барьер может надежно «экранировать» возможности смещения в пространстве соседних сообществ при различных внешних воздействиях на эти сообщества и поддерживать неизменной в пространстве и времени границу между сообществами. Однако возможна и ситуация, когда экотонный барьер отсутствует (рис. 1А и 2А). В этом случае, по всей видимости, возможно смещение границ сообществ вдоль высотной трансекты (например, при изменении климатических условий).

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты №№ 15-29-02697 и №15-45-04034 р\_сибирь\_a).*

## **Литература**

- Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды. - М.: Наука, 2003. - 371 с.
- Одум Ю. Основы экологии. - М.: Мир, 1975. - 740 с.
- Суховольский В.Г., Исхаков Т.Р., Тарасова О.В. Оптимизационные модели межпопуляционных взаимодействий. Новосибирск: Наука, 2008. - 162 с.
- Суховольский В.Г., Овчинникова Т.М., Бабой С.Д. Высотно-поясная зональность древесных пород в горных условиях Саян: модель экологических фазовых переходов второго рода// Журнал общей биологии. 2014. т. 75. № 1. - С. 38 – 47.
- Clements F. E. Plant Succession and Indicators. N.Y: The H. W. Wilson Company. 1928. - 453 pp. (reprinted 1973).

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ПОТОКИ CO<sub>2</sub>

Иванов Д.Г.<sup>1,2</sup>, Авилов В.К.<sup>1</sup>, Курбатова Ю.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт проблем экологии и эволюции А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия  
[ivanovdg19@gmail.com](mailto:ivanovdg19@gmail.com)

<sup>2</sup>РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

**Аннотация:** В работе приведены сравнения использования нелинейных функций для описания потоков CO<sub>2</sub> в гидроморфных экосистемах Центрально-Лесного заповедника. В результате установлено, что на дыхание верхового болота в большей степени влияют уровень грунтовых вод и температура воздуха, на депонирование – фотосинтетически активная радиация, а на дыхание в заболоченном ельнике все факторы оказывают влияние в равной степени.

Обмен и потоки углерода в естественных экосистемах являются сложными, многофакторными и, заведомо, нелинейными процессами. Однако, в различных экосистемах отдельные факторы влияют в большей или меньшей степени. В гидроморфных экосистемах это, прежде всего, термические условия и уровень грунтовых вод. Чаще всего нелинейные модели используются при описании этих процессов в методике микровихревых пульсаций (Glenn, 2006; Wang, 2007). В данной работе эти модели были применены для оценки результатов измерений потоков углерода методом статических камер в болотных и лесных экосистемах.

Исследования проводились на протяжении летне-осеннего сезона 2014 г. на территории Центрально-Лесного заповедника (Тверская обл. N56°28', E33°02'). Выбранные гидроморфные участки включали в себя экосистемы верхового болота (высокий, низкий рьямы и грядово-мочажинный комплекс) и ельник сфагново-черничный.

Для измерения потоков использовался метод статических камер, включавший в себя, цилиндрическую камеру объемом 0.005 м<sup>2</sup>, оснащенную вентилятором и датчиком температуры и инфракрасный газоанализатор Li-820 (Li-Cor Inc.), измерявший концентрацию CO<sub>2</sub> с частотой 1 раз в секунду. Время экспозиции составляло около 200 секунд. Кроме дыхания (Re), также измерялось депонирование CO<sub>2</sub> (GPP) для верхового болота. В качестве внешних факторов определялись: уровень грунтовых вод (УГВ, см), температура почвы и воздуха, а также фотосинтетически активная радиация (ФАР).

Прирост концентрации CO<sub>2</sub> (ppm/сек) в камере измерялся с помощью экспоненциальной функции, которая, в отличие от линейной, дает более точный результат для нелинейных потоков. При этом разница при сравнении использования линейной и экспоненциальной функций для расчета одних и тех же значений составляла от десятков, до сотен ppm/сек.:

$$C_t = C_x + (C_0 - C_x) * e^{-at} \quad (1)$$

где C<sub>t</sub> – изменения концентрации CO<sub>2</sub> в камере, C<sub>x</sub> – концентрация CO<sub>2</sub> в почве, C<sub>0</sub> – концентрация CO<sub>2</sub> в камере в начальный момент измерения, а – константа скорости пропускания, t – время экспозиции.

Расчет компонентов функции проводился в программе TableCurve 2D (Systat Software inc) с дальнейшим пересчетом потоков в мгCO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>\*ч. Стоит отметить, что потоки, близкие к линейным, наблюдались практически только на мочажинах с высоким уровнем грунтовых вод, а на остальных участках только в осенний период при низкой температуре и интенсивности потоков. Далее статистическая оценка зависимости потоков от сопутствующих факторов производилась в программе Statistica 10 (StatSoft inc.).

Для выражения температурной зависимости было выбрано модифицированное уравнение Аррениуса (Burne, 2005). Зависимость от уровня грунтовых вод определялась

простой параболической функцией, учитывающей оптимум. Фотосинтетическая активность для депонирования выражалась функцией Михаэлиса-Ментена (Wang, 2007):

$$Re/GPP = A * e^{E_a * (T_a(T_s) - T_r) / R * (T_a(T_s) - T_o) * (T_r - T_o)} \quad (2)$$

где  $A$  – константа Аррениуса,  $E_a$  – энергия активации,  $T_s(T_a)$  – температура почвы или воздуха ( $^{\circ}C$ ),  $T_r$  – референсная температура ( $25^{\circ}C$ ),  $T_o$  – температура абсолютного нуля ( $-273.16^{\circ}C$ )  $R$  – газовая постоянная ( $kJ/(mol \cdot K)$ ).

$$Re/GPP = b_1 + b_2 * Wt + b_3 * Wt^2 \quad (3)$$

где  $Wt$  – УГВ (см),  $b_1$  – коэф. искривления,  $b_2$  – коэф. симметрии,  $b_3$  – коэф. смещения параболы.

$$GPP = \frac{GP_{max} * a * PAR}{GP_{max} + a * PAR} \quad (4)$$

где  $PAR$  – фотосинтетически активная радиация ( $μmol/m^2 \cdot c$ ),  $GP_{max}$  – максимальный GPP при оптимальных условиях (const),  $a$  – коэф. эффективности ФАР (const).

Исходя из полученных коэффициентов детерминации функций (табл. 1), было установлено, что на верховом болоте дыхание в большей степени зависит от уровня грунтовых вод (со средним оптимумом 38.1 см) и в меньшей - от температуры воздуха и почвы. Это связано с тем, что при повышении УГВ дыхание снижается гораздо более резко, чем при изменении температуры. При этом зависимость от температуры почвы гораздо ниже, чем от температуры воздуха.

Таблица 1. Функции параметров потоков

Параметр	Функция	$R^2$
Темп. почвы (болото)	$GPP = 578 * \exp((48800 * (T_s - T_r)) / (R * (T_s + T_o) * (T_r + T_o)))$	0.3
	$Re = 777 * \exp((52117 * (T_s - T_r)) / (R * (T_s + T_o) * (T_r + T_o)))$	0.13
Темп. почвы (ельник)	$Re = 4745 * \exp((99532 * (T_s - T_r)) / (R * (T_s + T_o) * (T_r + T_o)))$	0.37
Темп. воздуха (болото)	$GPP = 304 * \exp((29057 * (T_a - T_r)) / (R * (T_a + T_o) * (T_r + T_o)))$	0.2
	$Re = 396 * \exp((39486 * (T_a - T_r)) / (R * (T_s + T_o) * (T_r + T_o)))$	0.45
Темп. воздуха (ельник)	$Re = 1143 * \exp((39960 * (T_a - T_r)) / (R * (T_s + T_o) * (T_r + T_o)))$	0.32
УГВ (болото)	$GPP = 190.2 + 31.6 * Wt - 1.09 * Wt^2$	0.13
	$Re = 21.4 + 38.1 * Wt - 0.53 * Wt^2$	0.5
УГВ (ельник)	$Re = 51.1 * Wt - 0.37 * Wt^2$	0.35
ФАР (болото)	$GPP = (657.4 * 1.35 * PAR) / (657.4 + 1.35 * PAR)$	0.28

В отличие от дыхания, депонирование за весь период измерений очень сильно изменялось как во времени, так и между участками и даже камерами, поэтому смоделировать четкую зависимость было сложно, и коэффициенты детерминации оказались довольно низкими. В ельнике влияние всех трех факторов оказалось примерно равным, что возможно связано с активным дыханием, как при низких температурах, так и при повышенным уровнем грунтовых вод.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №14-05-00797 и гранта РНФ № 14-27-00065.*

## Литература

- Byrne K.A., Kiely G., Leahy P. CO<sub>2</sub> fluxes in adjacent new and permanent temperate grassland // Agricultural and Forest Meteorology, 135(1-4), 2005 p. 82-92.
- Glenn, A. J., Flanagan L. B., Syed K. H., Carlson P. J. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of two peatlands with contrasting vegetation in northern Alberta, Canada // 27th Conference on Agricultural and Forest Meteorology. 2006.
- Wang C. L., Zhou G.Y., Wang X., Tang X.L., Zhou C.Y., Yu G.R. Below-canopy CO<sub>2</sub> flux and its environmental response characteristics in a coniferous and broad-leaved forest in Dinghushan, China. // Acta Ecologica Sinica, 2007, 27. p. 846-854.

## ВЫЯВЛЕНИЕ СУКЦЕССИОННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ ПРИ ПОМОЩИ ФИТОИНДИКАЦИОННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ШКАЛ

Кантор Г.Я.<sup>1,2</sup>, Домнина Е.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

<sup>2</sup>Вятский государственный гуманитарный университет, Киров, Россия  
ecolab2@gmail.com

**Аннотация:** предложен метод расчета точности оценки экологического режима фитоценозов по шкалам Цыганова, что необходимо для статистического обоснования выводов о характере и направленности сукцессионных процессов. Рассмотрен пример использования метода для анализа данных экологического мониторинга одного из техногенных объектов в Кировской области.

При сравнения, классификации и ординации геоботанических описаний с использованием экологических шкал (Раменский и др., 1956; Цыганов, 1983; Ellenberg, 1974; Landolt, 1977) погрешность определения факторов экологического режима обычно не оценивается, хотя во многих случаях имеет принципиальное значение. В настоящей работе предложен метод, позволяющий получать такого рода оценки, что дает возможность более надежно обосновывать выводы, получаемые при анализе совокупности геоботанических описаний. При расчете величины какого-либо фактора, характеризующего условия существования фитоценоза, обычно вычисляется средневзвешенное значение экологического оптимума по этому фактору для всех видов растений, составляющих данный фитоценоз:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n p_i x_i}{\sum_{i=1}^n p_i},$$

где  $n$  – число видов в описании, для которых известна величина оптимума по данному фактору;  $p_i$  – балл обилия вида (по проценту проективного покрытия или одной из шкал обилия – Друде, Браун–Бланке, Миркина и др.);  $x_i$  – оптимальное значение некоторого экологического фактора для  $i$ -го вида,  $y$  – характеристика фитоценоза по этому фактору.

Для получения исчерпывающей информации о любой статистической характеристике необходимо знание её функции распределения, но в данном случае вид функции распределения среднего балла экологической шкалы по фитоценозу неизвестен. Кроме того, статистически корректная оценка экологических характеристик фитоценоза затруднена довольно высокой неопределенностью границ диапазонов толерантности (для шкал Раменского и Цыганова), причем эта неопределенность сильно варьирует от вида к виду. В таких случаях эффективны численные статистические методы, нечувствительные к виду функции распределения, в частности, так называемый "метод складного ножа" (Орлов, 2002). Применительно к рассматриваемой задаче сущность метода состоит в следующем. Пусть геоботаническое описание включает в себя  $n$  видов. Поочередно удаляя из описания каждый из видов, можно получить  $n$  различных описаний по  $n-1$  видов в каждом. Рассчитав какую-либо статистическую характеристику (например, вышеупомянутый средний балл по экологической шкале) для каждого из этих описаний, получим выборку, содержащую  $n$  числовых значений и имеющую распределение, близкое к нормальному, что позволяет использовать классические статистические методы оценки параметров, основанные на хорошо известных свойствах нормального распределения и распределения Стьюдента. В частности, таким способом может быть получена оценка погрешности определения средних баллов экологических шкал по геоботаническому описанию фитоценоза.

Разработанный нами программный комплекс Phyto ("Фито") включает блок обработки геоботанических описаний по шкалам Цыганова аналогично программе EcoScale (Грохлина, Ханина, 2006) с оценкой величины 95-процентных доверительных интервалов методом

"складного ножа". Исходными данными для расчетов могут служить текстовые файлы или документы Microsoft Office (Word или Excel), содержащие таблицы геоботанических описаний. Структура таблиц может быть произвольной, но должна быть одинаковой для всех описаний. Наглядным графическим образом экологического режима местообитания служит диаграмма типа "радар", представляющая собой 10 лучей (по количеству шкал), на каждом из которых отложено средневзвешенное значение фактора в баллах соответствующей шкалы по всем встреченным видам с учетом погрешности, вычисленной вышеописанным методом.

В качестве примера такого подхода можно рассмотреть результаты мониторинга растительности, который проводится в Кировской области на месте захоронения некондиционных химикатов сельскохозяйственного назначения ("Кильмезский ядомогильник"). На рисунке 1 показана серия диаграмм экологического режима растительного сообщества, сформировавшегося на поверхности ядомогильника.

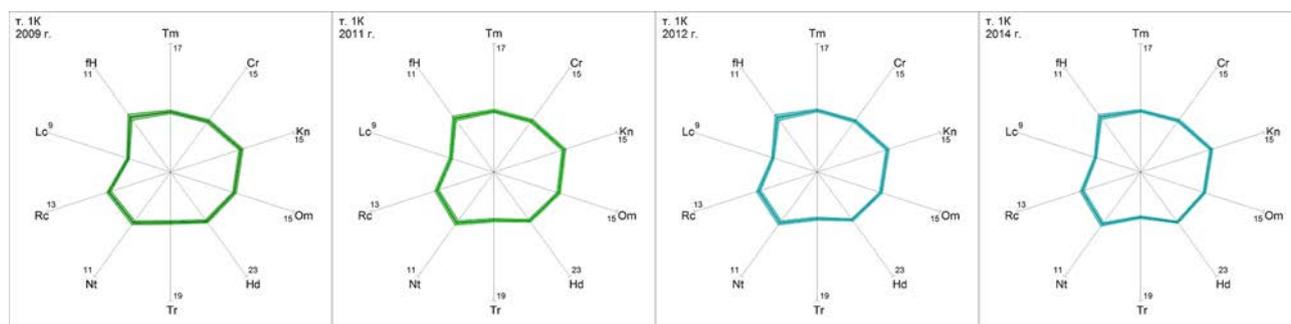


Рисунок 1 - Серия диаграмм экологического режима растительного сообщества на поверхности Кильмезского ядомогильника по геоботаническим описаниям 2009–2014 гг.

В нижней части диаграммы хорошо заметно характерное изменение формы фигуры, являющееся следствием уменьшения значения фактора Tr (солевое богатство почвы). Результаты расчетов программой Phyto, приведенные в таблице 1, подтверждают наличие статистически значимой ( $p < 0.01$ ) зависимости данного фактора от времени.

Таблица 1 – Динамика изменения фактора солевого богатства почвы на поверхности Кильмезского ядомогильника за период 2009–2014 гг.

Год	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Значение Tr	$7.42 \pm 0.14$	$7.53 \pm 0.13$	$7.11 \pm 0.14$	$6.90 \pm 0.13$	$6.70 \pm 0.11$	$6.67 \pm 0.11$

Анализ сводной таблицы геоботанических описаний показывает, что наблюдаемый тренд фактора Tr обусловлен быстрым ростом проективного покрытия трёх видов (Вейник наземный, Ястребинка волосистая и Люпин многолистный) с крайне низкими значениями нижней границы шкалы Tr (1–2 балла) в начальной стадии процесса почвообразования на изначально бедном элементами минерального питания насыпном грунте.

## Литература

- Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипов Н.А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. - М.: Сельхозгиз, 1956. - 472 с.
- Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. - М.: Наука, 1983. - 196 с.
- Ellenberg H. Zeigerwerte der Gefasspflanzen Mitteleuropas. Gottingen: Goltze, 1974. - 97 s.
- Landolt E. Okologische Zeigerwerte zur Sweizer Flora. - Veroff. Geobot. Inst. ETH. Zurich., 1977. H.64. S. 1-208.
- 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.
- Орлов А.И. Эконометрика. - М.: Экзамен, 2002. - 576 с.

## **ВЫДЕЛЕНИЕ ТИПОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПО ВОССТАНОВЛЕННОЙ КРИВОЙ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ NDVI (НА ОСНОВЕ ДАННЫХ MODIS)**

Колесов Д.А.<sup>1</sup>, Филиппов И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*NextGIS, Казань, Российская Федерация*

[kolesov.dm@gmail.com](mailto:kolesov.dm@gmail.com)

<sup>2</sup>*Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Российская Федерация*

[filip83@yandex.ru](mailto:filip83@yandex.ru)

**Аннотация:** Рассматриваются вопросы фильтрации кривых NDVI от высокочастотных компонент, появляющихся из-за различий в состоянии атмосферы и условий съемки. Параметры очищенных от шумовых компонент кривых NDVI далее используются как признаки в задаче выделения «трудных» типов растительного покрова.

Традиционно классификация изображений производится с привлечением к анализу одномоментных снимков и в случае использования мультиспектральных данных этот подход зачастую позволяет получить приемлемый результат (Шовенгердт, 2013). В некоторых сложных случаях, например при отделении лесов и лесных болот можно попытаться дополнительно привлечь снимки за разные периоды вегетации, чтобы задействовать информацию об особенностях фенологии экосистем. Однако, чем большие ряды снимков мы вовлекаем в анализ, тем большее влияние на результат классификации оказывает зашумление данных высокочастотными артефактами разного происхождения: неоднородность атмосферы, флюктуации влажности, угла съемки и др. В данной работе рассматривается задача разделения классов плохо отделяющихся по одномоментной съемке на примере зарастающих березой гарей и залесенных березой низинных болот распространенных в Западной Сибири.

В литературе встречается описание различных методов восстановления данных ДЗЗ от шумов. Обычно это методы, основанные на подгонке различного рода кривых под фактические данные, в частности в (Jonsson & Eklundh, 2002, 2004; Hird & McDermid, 2009), приводятся различные модификации процедур подгонки методом наименьших квадратов, медианных фильтров и фильтров на базе взвешенного среднего или использующие преобразование Фурье (Lhermitte et al, 2008).

В качестве исходных данных для анализа были взяты 16-ти дневные серии NDVI (MOD13Q1, 2015) за 2011-2013 годы. Этот продукт хотя и представляет собой очищенный от атмосферных шумов временной ряд NDVI, тем не менее он содержит высокочастотные артефакты (Рисунок 1А). Для данного продукта производилось преобразование Фурье с последующей фильтрацией для очистки от высокочастотных компонент.

В ходе работы было определено число коэффициентов разложения, описывающих основную структуру NDVI для ключевого участка. С использованием процедуры перекрестной проверки мы выяснили, что наиболее значимыми коэффициентами являются коэффициенты с частотами 0 (константа, которую можно трактовать как среднее значение NDVI за год), 3, 6 и 9. То, что индексы значимых коэффициентов кратны трем, объясняется тем, что в анализе использовались данные за три года. По выбранным коэффициентам при помощи обратного преобразования Фурье была восстановлена кривая NDVI (Рисунок 1В). Lhermitte et al (2008) показали, что растры содержащие коэффициенты преобразования Фурье рядов NDVI могут эффективно использоваться для кластеризации изображений классическими методами.

Гари и залесенные березой болота достаточно хорошо отделяются уже при использовании лишь 0 и 3 коэффициентов (Рисунок 1С), поскольку имеют более низкое среднегодовое значение NDVI и большую амплитуду ее колебания. Стоит обратить внимание, что вегетационный сезон на болоте короче: береза там распускается позже и

желтеет раньше, чем на гарях. Скорее всего это объясняется угнетающим воздействием высоко стоящих болотных вод, и, возможно, более поздним протаиванием торфяной залежи.

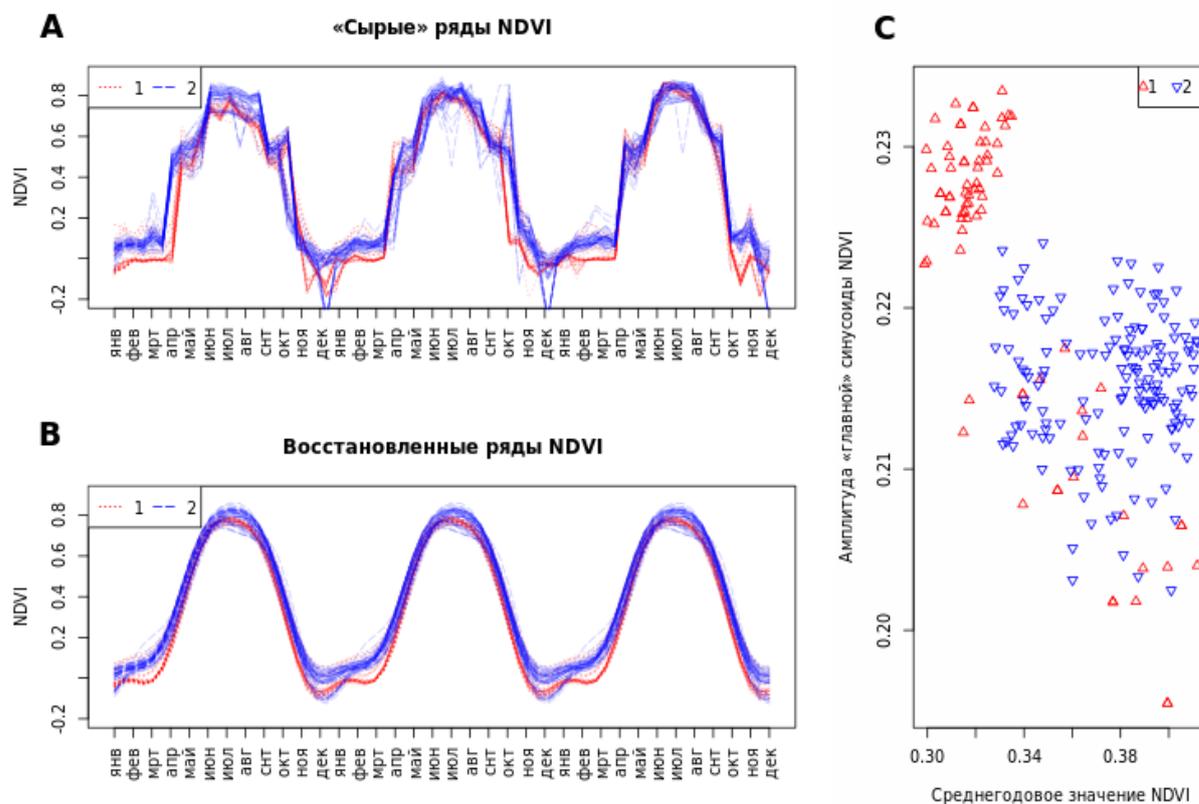


Рисунок 1. А) Выборка значений «сырых» рядов NDVI, извлеченных непосредственно из MOD13 для: 1 - залесенных березой болот; 2 - зарастающих березой гарей. В) Пример кривых NDVI после удаления высокочастотных компонент. С) Проекция точек на плоскость амплитуд гармоник с частотами 0 (константа) и 3 (основная частота).

Таким образом, сезонная спектральная кривая (унифицированная за много лет и очищенная от шума) является хорошим дополнением к классическим методам классификации данных ДЗЗ и позволяет добиться уверенного разделения классов (для природных объектов) там, где разделение по разовому спектральному эталону затруднено. В дальнейшем планируется поиск аналогичной методики для восстановления кривых NDVI по данным Landsat имеющим большее пространственное, но существенно меньшее временное разрешение.

## Литература

- MOD13Q1, 2015, Данные доступны по ссылке: [https://lpdaac.usgs.gov/products/modis\\_products\\_table/mod13q1](https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod13q1) (Дата обращения 11.04.2015).
- Jönsson P., Eklundh L. TIMESAT – a program for analyzing time-series of satellite sensor data //Computers & Geosciences. – 2004. – Т. 30. – №. 8. – С. 833-845.
- Jonsson P., Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data //Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. – 2002. – Т. 40. – №. 8. – С. 1824-1832.
- Lhermitte S. et al. Hierarchical image segmentation based on similarity of NDVI time series //Remote Sensing of Environment. – 2008. – Т. 112. – №. 2. – С. 506-521.
- Hird J. N., McDermid G. J. Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques //Remote Sensing of Environment. – 2009. – Т. 113. – №. 1. – С. 248-258.
- Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений //М.: Техносфера, 2013.–592 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СМЕШАННЫХ ДРЕВЕСНЫХ СООБЩЕСТВ

Колобов А.Н.

*Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия*  
[alex\\_0201@mail.ru](mailto:alex_0201@mail.ru)

**Аннотация:** Рассмотрены результаты исследования модельных и реальных данных пространственного размещения деревьев в одновидовых, разновозрастных и смешанных древостоях. Моделирование горизонтальной структуры древостоя проводилось на основе имитационной модели. Показано, что в результате действия процессов конкуренции пространственное расположение деревьев светолюбивых видов определяется размещением теневыносливых деревьев. Взаимное расположение деревьев теневыносливых видов независимо друг от друга.

### 1. Объекты и методы

В данной работе приводятся результаты исследования модельных и реальных данных пространственного размещения деревьев в одновидовых, разновозрастных и смешанных древостоях. Моделирование горизонтальной структуры древостоя проводилось на основе имитационной компьютерной модели (Колобов, 2014). Эта модель позволяет проводить вычислительные эксперименты с различными комбинациями видовой и возрастной структуры древесных сообществ, произрастающих на территории с умеренным климатом, где основным системообразующим фактором формирования и развития лесных экосистем является свет. В основе построения модели используется индивидуально-ориентированный подход, согласно которому моделирование динамики древостоя, складывается из описания роста каждого дерева с учетом его видовых характеристик и локально доступных ресурсов. Исследование особенностей формирования горизонтальной структуры смешанных древесных сообществ, проводили на основе фактических данных собранных с четырех постоянных пробных площадей, расположенных в заповеднике «Бастак» Еврейской автономной области. Данные включают в себя координаты каждого дерева, диаметр ствола и его видовую принадлежность.

Полученные таким образом модельные и реальные пространственные данные, обрабатывали с помощью статистических методов, вложенных в программу R-статистика, в частности, пакет spatstat. Анализ характера размещения деревьев в одновидовых древостоях осуществляли с помощью парной корреляционной функции  $g(r)$  (Грабарник, 2010), значения которой позволяют сделать заключения о типе пространственной структуры: случайный (отсутствие структуры в расположении деревьев: они распределены равномерно и независимо), кластерный (деревья образуют скопления), регулярный (находятся на определенном расстоянии друг от друга). Для исследования конкуренции между деревьями разных видов, а также размерных классов использовали кросс-корреляционную функцию  $g_{ij}(r)$ , где  $i, j$  соответствуют различному типу точек (Грабарник, 2010). Значения этой функции позволяют проверить нулевую гипотезу о «случайном маркировании» или независимости взаимного расположения точек относящихся к разному типу.

### 4. Обсуждение результатов

Анализ пространственных данных размещения деревьев на реальной и модельной площадках выявил групповой характер распределения «мелких» деревьев и относительно регулярное размещение «крупных» (Рисунок 1). Таким образом, показано, что использованная для генерации пространственных данных модель, отражает основные механизмы формирования ярусно-мозаичной структуры древостоя, которая наблюдается в природных сообществах. В дальнейшем это позволяет использовать данную модель для

изучения особенностей формирования пространственной структуры смешанных древесных сообществ, развивающихся под действием внутренних (конкуренция) и внешних (рубки, ветровалы, фитофаги и т.д.) факторов.

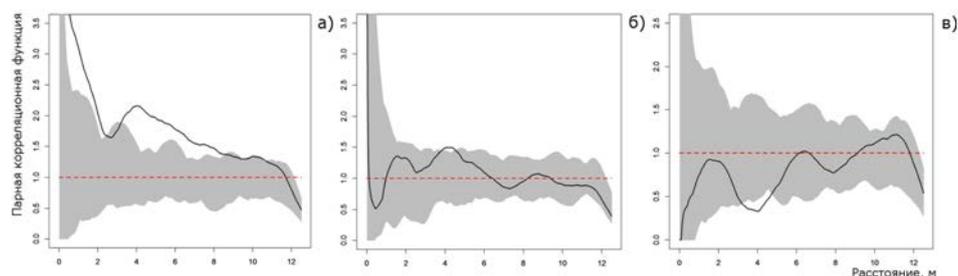


Рисунок 1 - Оценки парной корреляционной функции и области принятия нулевой гипотезы о случайности размещения для темнохвойных видов (ель, пихта, кедр) деревьев трех размерных классов, произрастающих на территории заповедника «Бастак»: а) «мелкие»; б) «средние»; в) «крупные» деревья.

Статистический анализ пространственного размещения деревьев теневыносливых и светолюбивых видов относительно друг друга показал, что в среднем вокруг произвольно выбранного дерева теневыносливого вида существует область, в пределах которой возможность встретить дерево светолюбивого вида меньше, чем была бы при их случайном размещении. Аналогичная связь обнаруживается во взаимном расположении «крупных» теневыносливых деревьев и «мелких», «средних» светолюбивых деревьев. При этом показано, что взаимное расположение «крупных» светолюбивых деревьев и «мелких», «средних» теневыносливых деревьев не отличается от случайного размещения. Таким образом, в результате действия процессов конкуренции пространственное расположение деревьев светолюбивых видов определяется размещением теневыносливых деревьев (Рисунок 2). Расположение светолюбивых деревьев не влияет на местоположение теневыносливых. Взаимное размещение теневыносливых деревьев разных видов, в частности, ели, пихты и кедра независимо друг от друга.

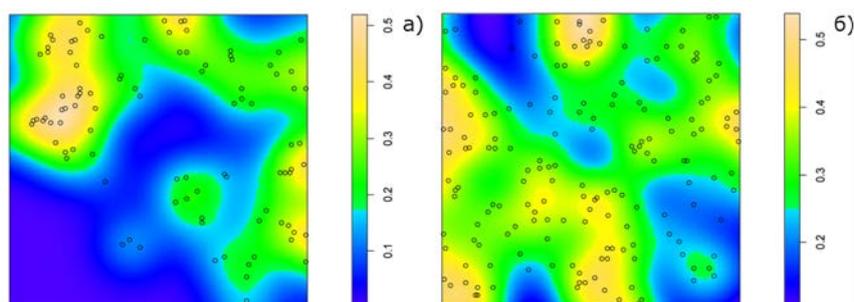


Рисунок 2 – Модельные данные пространственного расположения деревьев березы желтой (а) и ели аянской (б) в елово-березовом древостое (разным цветом обозначена различная степень плотности деревьев)

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-29-02658).

## Литература

- Колобов А. Н. Моделирование пространственно-временной динамики древесных сообществ: индивидуально-ориентированный подход // Лесоведение. 2014. № 5. с. 72–82.  
Грбарник П. Я. Анализ горизонтальной структуры древостоя: модельный подход // Лесоведение. 2010. № 2. С. 77–85.

## МОДЕЛЬ ГУМИФИКАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ ROMUL\_NUM С УЧЕТОМ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОЧВЕННОЙ ФАУНЫ

Комаров А.С.<sup>1</sup>, Чертов О.Г.<sup>2</sup>, Быховец С.С.<sup>1</sup>, Шашков М.П.<sup>1</sup>, Фролов П.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино  
Московской области  
as\_komarov@rambler.ru*

<sup>2</sup>*Бингенский политехнический университет, г. Бинген на Рейне, Германия  
oleg\_chertov@hotmail.com*

**Аннотация:** Приводится описание структуры модифицированной модели динамики органического вещества лесных почв ROMUL с учетом вклада почвенной фауны в формирование исходных продуктов гумификации, а именно экскрементов и мортмассы почвенных животных. Тестирование модели показало возможность количественной оценки вклада продуктов метаболизма в процессы формирования органического вещества почв.

Современные модели динамики органического вещества почв (OpВП) практически не рассматривают механизмы гумусообразования и роль почвенной фауны в процессах закрепления OpВП в почве. Авторами был проведен анализ опубликованных данных по влиянию почвенной микрофауны трофических сетей (ТС) и мезофауны дождевых червей на формирование продуктов их метаболизма и мортмассы как исходного материала гумификации (Чертов, 2015) для их интеграции в модель динамики OpВП лесных почв ROMUL (Chertov et al., 2001). Теоретической основой работы являлась холистическая концепция биологической и экологической стехиометрии с акцентом на интеграцию различных уровней биологической и экологической организации и математическое моделирование (Elser, 2006) и концепция «форм гумуса» с выделением сообществ организмов-деструкторов (Chertov et al., 2001).

Было выявлено, что в почвенных ТС существуют аллометрические соотношения между гетеротрофным дыханием организмов при минерализации OpВП и продуктами метаболизма биоты. Поэтому появилась возможность определения продуктов метаболизма почвенной фауны по соотношению с минерализацией OpВП по методике анализа ТС (Hunt et al., 1987; Чертов 2015). На основе этих материалов по экофизиологическим параметрам фауны ТС вычислены соотношения выхода экскрементов и мортмассы по отношению к дыханию в ТС. По этой же методике были вычислены функции для расчета продукции доступного азота в зависимости от C:N OpВП. Для оценки активности почвенно-подстилочных дождевых червей были собраны данные об их экофизиологических параметрах и определены масштабы процессов в свежих копролитах, где наряду с быстрой минерализацией OpВП и азота наблюдается активная азотфиксация (Умаров и др., 2008; Костина и др., 2011), а также формирование стабильного гумуса.

На основе этих материалов получен набор параметров для модифицированной модели динамики OpВП ROMUL. Были созданы модули активности микрофауны ТС и почвенно-подстилочных дождевых червей. В модуле ТС сначала вычисляется отношение грибов к бактериям в составе ТС, по которому проводится разделение минерализованного углерода (т.е. дыхания почвенной биоты) на грибной и бактериальный «энергетические каналы» (Holtkamp et al., 2011). Далее по ним рассчитываются величины выхода экскрементов и мортмассы почвенной микро- и мезофауны. В модуле дождевых червей определяется потребление опада в зависимости от его качества группой почвенно-подстилочных червей с перенесением материала из органического в минеральный горизонт. Далее определяется скорость продукции свежих копролитов, являющихся ключевым компонентом как в отношении

минерализации ОрВП, так и по отношению к формированию стабильного гумуса (устойчивого ОрВП). Эти модули были интегрированы в модель ROMUL без изменения ее базовой структуры (Рис. 1). Новая версия модели реализована в Powersim Studio 2005. Включение этих модулей позволило также уточнить процедуру расчета минерализации азота по алгоритму анализа ТС на основе оценки различий концентрации и массы азота в жертвах и хищниках по разным уровням ТС (Hunt et al., 1987; Holtkamp et al., 2011).

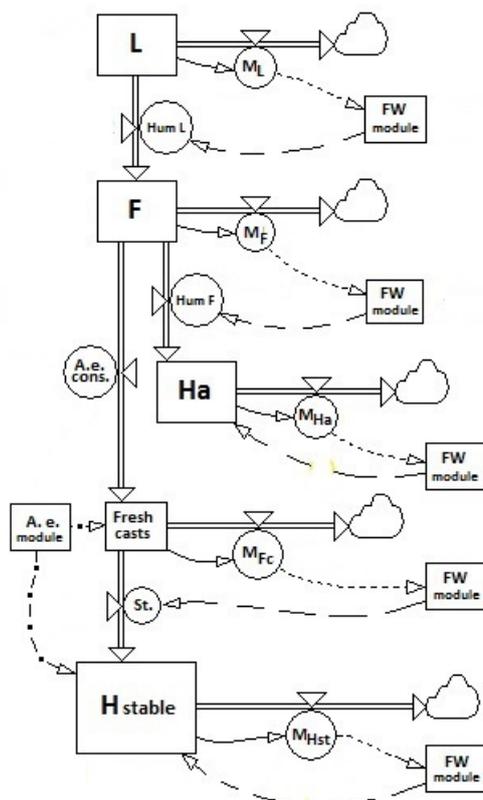


Рисунок 1. Обобщенная схема модели Romul\_Hum как расширение модели ROMUL без изменения ее базовой структуры. Представлена схема для одной когорты почвенно-подстилочных дождевых червей. L – слабразложившаяся подстилка и дернина; F – среднеразложившаяся подстилка; Ha – сильноразложившаяся гумифицированная подстилка; Fresh casts – свежие копролиты; H stable – стабильный гумус/устойчивое ОрВП в A1/E;  $M_i$  – минерализация соответствующих пулов ОрВП; Hum L, Hum F – поток трансформированного ОрВП из L в F и из F в Ha соответственно; A.e. cons. – потребление органического вещества дождевыми червями; St. – выход стабилизированного ОрВП при старении копролитов; FW module – модуль вычисления экскрементов и мортмассы в ТС; короткие пунктиры – скорость минерализации как дыхание биоты (Rh) для вычисления продуктов метаболизма в ТС; A.e. module – модуль вычисления гумусообразования почвенно-подстилочными дождевыми червями; длинные пунктиры – данные для расчета пропорции продуктов фауны в соответствующих пулах ОрВП; штрих пунктиры обозначают модуль дождевых червей. Параметры и переменные модели ROMUL детально описаны ранее (Chertov et al., 2001).

Было проведено тестирование модели Romul\_Hum (Рис. 2) для подзолистой (профильно дифференцированной, альбелювисоли) почвы тайги Европейской России при поступлении 3 т/га в год опада различного качества (разное содержание азота: 0.4, 1.0, 1.6, 2.4%), которое показало, что в потоках ОрВП от опада к подстилке и к гумусовому горизонту пропорция продуктов метаболизма фауны колеблется от 0.5 до 10%, варьируя в зависимости от концентрации азота, температуры и влажности. Накопление этого материала происходит во всех пулах, но в F с быстрым выходом на стационар в отличие от Ha и H stable верхнего горизонта минеральной почвы.

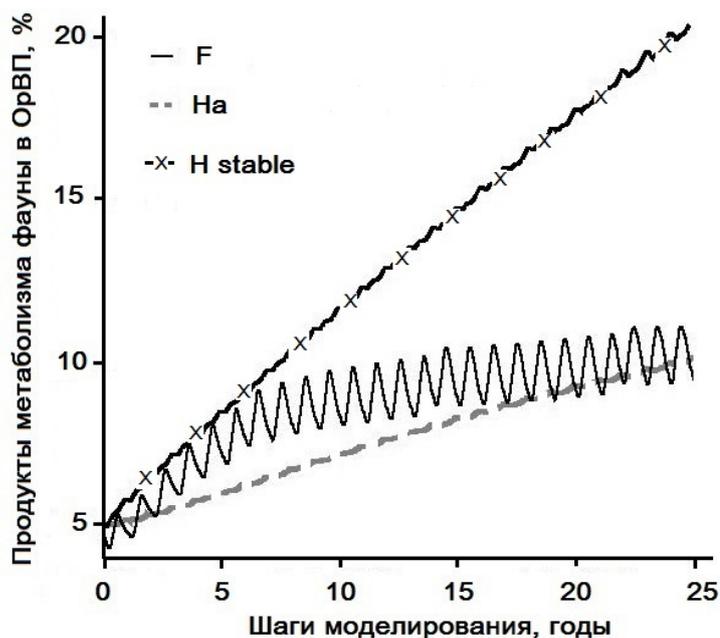


Рисунок 2. Имитированное моделью Romul\_Hum изменение пропорции продуктов метаболизма фауны в составе ОрВП разных горизонтов лесной почвы при заданной исходной доле продуктов метаболизма 5%.

Приведенные данные показывают возможность учета продуктов метаболизма фауны ТС как источников гумусовых веществ и ОрВП копролитов дождевых червей в моделях динамики ОрВП.

## Литература

- Костина Н.В., Богданова Т.В., Умаров М.М. Биологическая активность копролитов дождевых червей // Вестник МГУ. Сер. 17 Почвоведение - 2011. - № 1. - С. 20-26.
- Умаров М.М., Стриганова Б.Р., Костин Н.В. Особенности трансформации азота в кишечнике и копролитах дождевых червей // Изв. РАН. Сер. биол. -2008. - № 6. - С. 746-756.
- Чертов О.Г. Количественная оценка продуктов метаболизма и мортмассы почвенной фауны как материала для гумификации в лесных почвах // Почвоведение. - 2015. - № 11. - В печати.
- 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 modelling // Ecological Modelling. - 2001. - Vol. 138. - P. 289-308.
- Elser, J. Biological stoichiometry: a chemical bridge between ecosystem ecology and evolutionary biology. // American Naturalist. - 2006. - Vol. 168. - P. S25–S35.
- Holtkamp R., van der Wal A., Kardol P. et al. Modelling C and N mineralisation in soil food webs during secondary succession on ex-arable land // Soil Biology & Biochemistry. - 2011. - Vol. 43. - P. 251-260.
- Hunt H.W., Coleman D.C., Ingham E.R. et al. The detrital food web in a shortgrass prairie // Biology and Fertility of Soils. - 1987. - Vol. 3. - P. 57-68.

## КЛАСТЕРИЗАЦИЯ В МОДЕЛЯХ МЕТАПОПУЛЯЦИЙ

Кулаков М.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия*  
[k\\_matvey@mail.ru](mailto:k_matvey@mail.ru)

**Аннотация:** Данное исследование посвящено исследованию феномену кластеризации, возникающему в моделях миграционно-связанных популяций (метапопуляций). Показано, что формирование и трансформация кластеров имеет бифуркационную природу, а усложнение динамики реализуется через каскад удвоения периода и рождение сложной иерархии мультистабильных режимов.

### 1. Постановка задачи

Изучение сложной динамики распределенных популяций животных или метапопуляций часто приводит к необходимости использования в качестве моделей их динамики системы или решетки связанных отображений. Для чего, непрерывный плоский ареал представляется системой примыкающих друг к другу субареалов, с проживающими в них локальными популяциями (субпопуляциями), которые связаны между собой миграционными переходами. Динамика каждой локальной популяции может быть описана одномерным рекуррентным уравнением, а миграционная связь представлена аддитивными членами к каждому уравнению. В этом случае мгновенное значение численности каждой одиночной популяции складывается из динамики всех субпопуляций, с кем она непосредственно связана. В этом случае динамика метапопуляций будет намного более сложная, чем у одиночной локальной популяции или биологического сообщества. Такие системы способны демонстрировать как синхронную динамику между отдельными субпопуляциями или синхронную в большой группе субпопуляций, так и несинхронную между всеми локальными популяциями или несинхронную между группами. Вообще, образование групп синхронных элементов – доменов синхронной динамики, или кластеров является одним из интереснейших феноменов динамики связанных колебательных элементов. Исследованию этого явления и посвящена данная работа.

Если пронумеровать, каким либо образом, каждую локальную популяцию от 1 до  $N$  и через  $x_n^{(i)}$  обозначить численность в  $i$ -м ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) очаге в дискретный момент времени  $n$ , то уравнения пространственной динамики распределенной популяционной системы можно записать в виде системы глобально-связанных отображений:

$$x_{n+1}^{(i)} = \sum_{j=1}^N m_{i,j} f(x_n^{(j)}) \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (1)$$

где  $0 \leq m_{i,j} \leq 1$  ( $i \neq j$ ) – коэффициент миграции особей из  $j$ -й популяции в  $i$ -ю,  $f(x)$  – функция локального воспроизводства в качестве которой рассматривалась унимодальная зависимость запас-пополнение Рикера:  $f(x^{(i)}) = a^{(i)} x^{(i)} \exp(-x^{(i)})$ , где  $a^{(i)}$  – репродуктивный потенциал  $i$ -й популяции, то есть скорость её максимально возможного годового воспроизводства в отсутствие лимитирования. В случае, когда все субареалы равны, равными оказываются и соответствующие границы. Следовательно, все коэффициенты миграции оказываются равными  $m$ , кроме явно нулевых для несвязанных субпопуляций, и кроме  $m_{i,i} = 1 - \sum_{j=1}^N m_{j,i}$ . Коэффициент  $m_{i,i}$  указывает на вклад локальной динамики, определяемой одиночным уравнением Рикера, в динамику  $i$ -го элемента после его взаимодействия со всеми остальными, и равен доли особей оставшихся в  $i$ -й субпопуляции после эмиграции.. В этом случае все  $a^{(i)}$  в (1) также будут равны.

## 2. Результаты

При исследовании систем вида (1) очень важной оказывается задача описания условий и механизмов синхронизации и десинхронизации динамики каждой из ее фазовых переменных, а так же образование групп синхронных осцилляторов (кластеров). В ходе исследования системы (1) было обнаружено, что формирование подобных групп или кластеров однозначно, хотя и достаточно не тривиально, определяется начальным распределением особей по ареалу  $x_0^{(i)}$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ). Изначально неравные плотности каждой субпопуляции не всегда приводят к формированию несинхронной динамики всех локальных популяций, а равные начальные плотности не гарантируют когерентной (полностью синхронной) динамики всех субпопуляций (Кулаков, 2015), особенно при различных видах связи (диссипативная или инерциальная) и их комбинациях (Кулаков, 2013).

На рисунке 1 приведены бассейны некоторых кластеров, возникающие в системе (1) при фиксации начальной точки в виде  $X_0 = x_0^{(1)} = x_0^{(2)} = \dots = x_0^{(70)} \neq Y_0 = x_0^{(71)} = x_0^{(72)} = \dots = x_0^{(100)}$ , т.е. исследуются два кластера, состоящие из 70 и 30 субпопуляций. Полученные области указывают на начальные условия, приводящие к той или иной динамике кластеров. Примечательно, что такие жестко зафиксированные начальные условия в некоторой части фазового пространства приводят к кластерам с иными размерами (рисунок 1б) или даже трем кластерам (рисунок 1в).

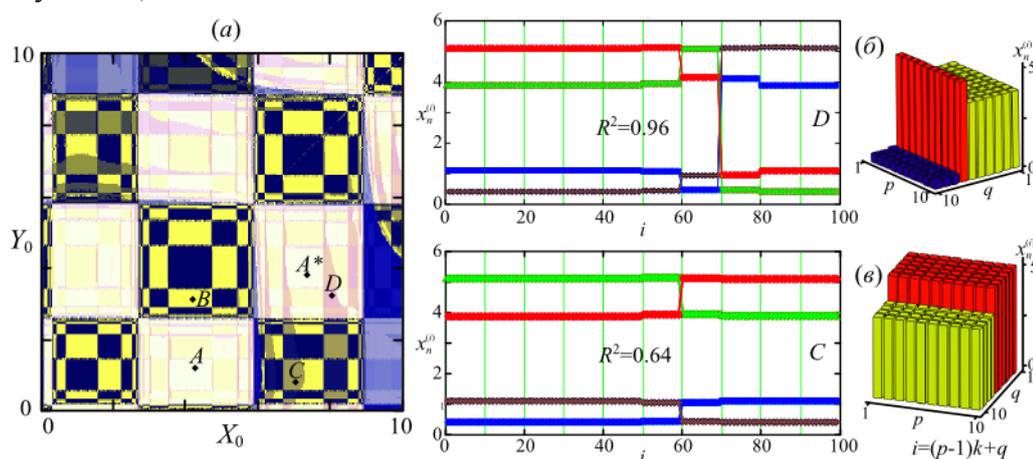


Рисунок 1 – (а) Бассейны притяжения некоторых фаз кластеризации системы (1) для ареала квадратной формы состоящей из 100 субпопуляций, (б-в) примеры динамики кластеров, при  $a = 14$  и  $m = 0.01$

Исследование сценариев потери устойчивости системы (1) показало, что формирование и трансформация кластеров имеет бифуркационную природу. Усложнение динамики идет через образование несинхронных режимов и их дальнейшее удвоение. В результате динамические режимы системы (1) представлены сложной иерархией мультистабильных режимов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-01-31443 мол\_а и № 15-29-02658 офу\_м.*

## Литература

- Кулаков М.П., Фрисман Е.Я. Бассейны притяжения кластеров в системах связанных отображений // Нелинейная динамика. 2015. Т. 11. № 1. С. 51-76.
- Кулаков М.П., Аксенович Т.И., Фрисман Е.Я. Подходы к описанию пространственной динамики миграционно-связанных популяций: анализ синхронизации циклов // Региональные проблемы. 2013. Т. 16. № 1. С. 5-14.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ ОРГАНИЧЕСКИМИ АЗОТСОДЕРЖАЩИМИ КОМПОНЕНТАМИ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

Курочкина Г.Н.

*Учреждение Российской Академии наук Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, Пущино, Россия*

[colloid41@rambler.ru](mailto:colloid41@rambler.ru)

**Аннотация:** В модельном эксперименте методом ЭПР - спектроскопии установлено влияние токсичного компонента ракетного топлива - несимметричного диметилгидразина (НДМГ) на парамагнитную активность гумуса серой лесной почвы. Проведен математический анализ указанного влияния. Полученные данные показали, что построенная регрессионная модель зависимости интенсивности спектра ЭПР от дозы НДМГ в изученном интервале концентраций лучше согласуется с экспериментом, чем стандартная полиномиальная модель.

### Введение

Главной экологической функцией почвы в биосфере является функция катаболизма – окислительно-восстановительный процесс трансформации сложных органических веществ. К числу таких веществ относится основной и наиболее токсичный компонент ракетного топлива - несимметричный диметилгидразин (НДМГ), относящийся к классу органических аминов и обладающий сильными восстановительными свойствами.

**Цель работы** - В модельном эксперименте с помощью метода ЭПР - спектроскопии установить влияние концентрации НДМГ на парамагнитную активность гумуса серой лесной почвы и провести математический анализ этого влияния.

### Объекты и методы

Исследования проводили на серой лесной почве Московской области, верхнеокского района. Использовали пахотный горизонт (0-20 см) серой лесной почвы, имеющей следующие физико-химические характеристики: содержание гумуса, %:  $2.3 \pm 0.05$ ; рН солевой –  $5.5 \pm 0.07$ ; гидролитическая кислотность, мг-экв./100 г:  $2.4 \pm 0.09$ ; сумма обменных оснований, мг-экв./100 г:  $17.8 \pm 0.52$ ; физическая глина, %:  $37.4 \pm 0.31$ ; физический песок, %:  $62.6 \pm 0.31$ ; частицы менее 0.001 мм, %:  $14.3 \pm 0.28$ ). В качестве загрязняющих веществ использовали несимметричный диметилгидразин, а также его аналоги – азотсодержащие органические основания (моноэтаноламин, тетраметилендиамин).

### Результаты и обсуждение

Ранее нами (Курочкина и др., 1999, Курочкина и др., 2006, Курочкина, Гайдалович, 2010, Курочкина, 2013) была разработана математическая модель зависимости интенсивности спектра ЭПР от концентрации компонента ракетного топлива (НДМГ) для зонально-генетического ряда почв Убсу-Нурской котловины. Были использованы различные способы обработки результатов с помощью компьютерной системы «MAPLE» и «Mathcad» :

- 1) сплайнами третьей степени,  $f(x)$
- 2) аппроксимацией многочленами 4-й степени методом наименьших квадратов (полином)  $P^4(x)$ ,
- 3) функциональной аппроксимацией методом наименьших квадратов, при этом функцию

$$h(x) = a_0 e^{-b_0 x} + a_1 e^{-b_1 x} + \frac{a_2}{1+x} + \frac{a_3}{1+100(x-c)^2} \quad (1)$$

подбирали по характеру изменения интенсивности спектра ЭПР при увеличении дозы НДМГ. Как видно, установленная функция  $h(x)$  состоит из показательных, гиперболического слагаемых и локона Аньези.

Эффективность методов полинома  $p(x)$  п. 2) и функции  $h(x)$  п.3) оценивалась с помощью величины:

$$\Delta_H = \sum_{i=1}^6 (H(x_i) - z_i)^2 \quad (2)$$

равной сумме квадратов отклонений опытных данных от теоретических, где  $x_i$  – доза НДМГ,  $H(x_i)$  – значение аппроксимирующей функции,  $z_i$  – соответствующее значение интенсивности спектра ЭПР,  $c$  – значение концентрации, при которой достигается максимум интенсивности для 4-го слагаемого.

Выявлено, что для всех типов почв Убсу-Нурской котловины, определяющим слагаемым в моделирующей функции является второе показательное слагаемое, задающее основную закономерность снижения интенсивности в зависимости от дозы НДМГ, однако для каждой отдельной почвы ее характерные особенности определяются другими слагаемыми этой функции.

В данной работе при проверке полученной математической модели (1) влияния доз НДМГ на интенсивность спектра ЭПР континентальной серой лесной почвы получены следующие результаты:

1. Полиномиальная регрессия,  $n = 4$ .

$$f(x) = 46.242 - 17.691x - 14.117x^2 + 7.288x^3 - 0.573x^4 \quad (3)$$

Средняя дисперсия

$$S_p^2 = \frac{1}{8-5} \sum_{i=k}^8 (I_k - f(x_k))^2 = \frac{\Delta_p}{3} = \frac{673,814}{3} = 224,605 \quad (4)$$

2. Разработанная функциональная регрессия

$$h(x) = 30,31e^{-0,067x} + 0,994e^{-0,5x} + \frac{44,448}{1+100(x-0,108)^2} - \frac{15,794}{1+x} \quad (5)$$

Средняя дисперсия

$$S_h^2 = \frac{1}{8-5} \sum_{k=1}^8 (I_k - h(x_k))^2 = \frac{\Delta_h}{3} = \frac{112,894}{3} = 37,631 \quad (6)$$

Отношение дисперсий

$$\frac{S_p^2}{S_h^2} = 5,97 \approx 6 \quad (7)$$

Как видно из отношения (7) и рис.1. полученные результаты на серой лесной почве - объекте, не относящегося к Убсу-Нурским образцам, подтвердили эффективность модели, разработанной на материале Убсу-Нурских почв. Так вышеприведённые вычисления показали, что отклонение модельной интенсивности от экспериментальной, измеряемой средней дисперсией, почти в 6 раз меньше отклонения при стандартной полиномиальной регрессии, что имеет практическое значение для использования разработанной модели для других почв России при загрязнении их НДМГ или его аналогами.

Таблица 1. Статистическая оценка математической модели для серой лесной почвы

почва	$n$	$A, \%$	$R$	$k_1, k_2$	$F$	$F_{критич.}$
Серая лесная	8	11.8	0.9706	3, 4	21.69	6.59

Пояснение к таблице:  $n$  – число наблюдений,  $A$  – средняя ошибка аппроксимации  
 $R$  – индекс корреляции,  $k_1, k_2$  – степени свободы соответственно равны 3 и  $n - 4$ ,  $F$  – критерий Фишера, найденный по формуле  $k_2 R^2 / k_1 (1 - R^2)$ ,  $F_{критич.}$  – критические значения распределения Фишера-Снедекора при уровне значимости  $\alpha = 0.05$ .

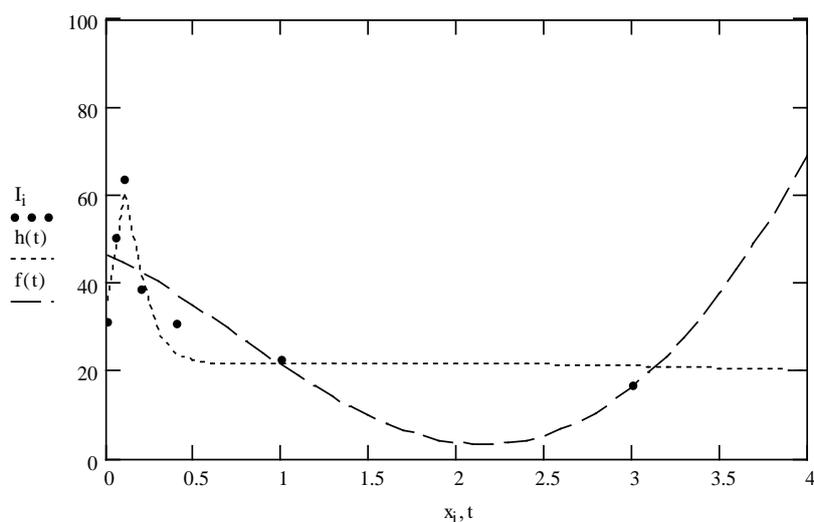


Рис.1. Зависимость интенсивности спектра ЭПР от концентрации НДМГ для серой лесной почвы при различных способах моделирования –

●●●●●●●●●● опытные данные  
- - - - - полином 4-ой степени  
..... функция

Таким образом, проведен математический анализ указанного влияния, и смоделирована функциональная зависимость интенсивности спектра ЭПР от концентрации компонента ракетного топлива. Полученные данные показали, что построенная регрессионная модель зависимости интенсивности спектра ЭПР серой лесной почвы от дозы НДМГ в изученном интервале концентраций лучше согласуется с экспериментом, чем стандартная полиномиальная модель, что представляет практический интерес.

## Литература

- Курочкина Г.Н. Оценка влияния загрязнения почв токсичным компонентом ракетного топлива – несимметричным диметилгидразином. Материалы III конференции «Математическое моделирование в экологии» Эко-МатМод. 2013. Пущино. С 139.
- Курочкина Г.Н., Гайдалович В.Г. Анализ влияния концентрации несимметричного диметилгидразина на почвы Убсу-Нурской котловины. // Агрехимия. 2010. № 5. С. 59-71.
- Курочкина Г.Н., Гайдалович В.Г., Хакимов Ф.И. Парамагнитная активность органического вещества почв Убсу-Нурской котловины // Почвоведение. 2006. № 7. С. 812-823.
- Курочкина Г.Г., Керженцев А.С., Соколов О.А. Физико-химическое исследование загрязнения почв компонентами ракетного топлива. // Почвоведение. 1999. №3. С. 359-369.

## ПЕРЕСТРОЙКА СТРУКТУРЫ СООБЩЕСТВА МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ – ПРЕДВЕСТНИК ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМА ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ?

Кшнясев И.А., Давыдова Ю.А.

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
[kia@ipae.uran.ru](mailto:kia@ipae.uran.ru)

**Аннотация:** Исследована многолетняя (1982–2014) динамика плотности населения и структуры сообщества мелких млекопитающих (СММ) в южно-таежных лесах. Показаны существенные перестройки СММ в ответ на нарушения (вывал леса, пожар и последующие сукцессии) биоценозов при сохранении трехлетней цикличности и последующее «спонтанное» изменение режима – переход к квазидвухлетней периодичности. Предложен сценарий, объясняющий различный наблюдаемый режим флуктуаций.

Различный режим (амплитуда, период) динамики популяций грызунов в географическом градиенте или его изменение в фиксированной точке приписывается (Hansson, Henttonen, 1985; Кшнясев, 2001; Hörnfeldt, 2004; Cornulier et al., 2013; Korpela et al., 2014) эффектам внешних факторов – особенностям: климата (и/или его изменению), структуры сообщества хищников (соотношению специалистов/генералистов). Мы высказываем (основанное на наших наблюдениях) предположение, что не менее правдоподобна и противоположная версия – влияние изменений условий среды вследствие внешних воздействий (как аналога климатического градиента) может быть опосредовано (усилено или, наоборот, демпфировано) перестройкой структуры СММ. Изменение «композиции» СММ вследствие особенностей (трофической специализации, различного репродуктивного потенциала, привлекательности для хищника и др.), составляющих его видов способно порождать заметные сдвиги внутри- и межвидовой конкуренции в СММ и взаимодействий со специализированными хищниками – миофагами, и далее отражаться в сохранении или *vice versa* в изменении режима динамики численности.

В мониторинговых исследованиях (по контрасту с управляемым экспериментом) главный вызов (или «логическая ловушка») для интерпретатора – отделение симптомов от причин. Некоторую надежду на «объективность» теории (на фоне априорных представлений и прошлого опыта) дает рассмотрение результатов ВАСИ – «натурных экспериментов» – реакции (как подвергнутых воздействию – I (impact), так и интактных – C (control) сообществ на нарушения (B – before A – after), и последующую интерпретацию в духе “*post hoc, ergo propter hoc*”.

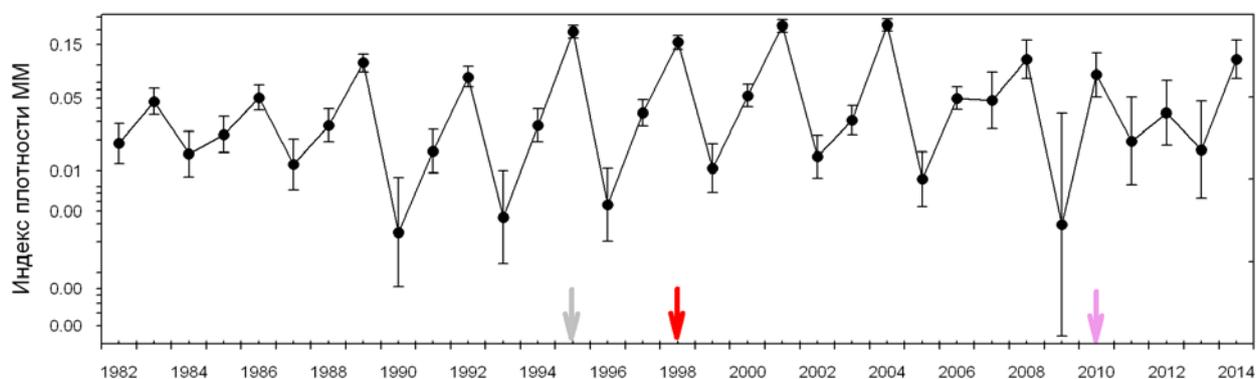


Рисунок 1. Плотность населения СММ весной ( $p=n/N$ , 95% ДИ, логит шкала). Стрелки – нарушения: вывал леса (1995), пожар (1998, 2010); подчеркнутые годы – утрата трехлетней периодичности. Средний Урал, южная тайга, Висимский заповедник; 1982-2014.

Динамика плотности населения СММ (рисунок 1) до 2006 г. может быть представлена (если опустить непостоянство амплитуды) как простой трехлетний цикл, и изменения ее режима не выявляются. Однако в композиции СММ четко обнаруживается отклик (идеально согласующийся с представлениями об экологических нишах видов) на изменения условий среды (рисунок 2). Перестройке структуры СММ можно приписать и последующее изменение динамики численности населения, вследствие неидентичности репродуктивного потенциала, особенностей внутри- и межвидовой конкуренции (асимметрия и «порог включения»). Например, после 2004 года, мы уже не наблюдали (ранее весьма специфичного «симптома» фазы пика) блокировки созревания сеголеток у доминирующего вида – рыжей полевки.

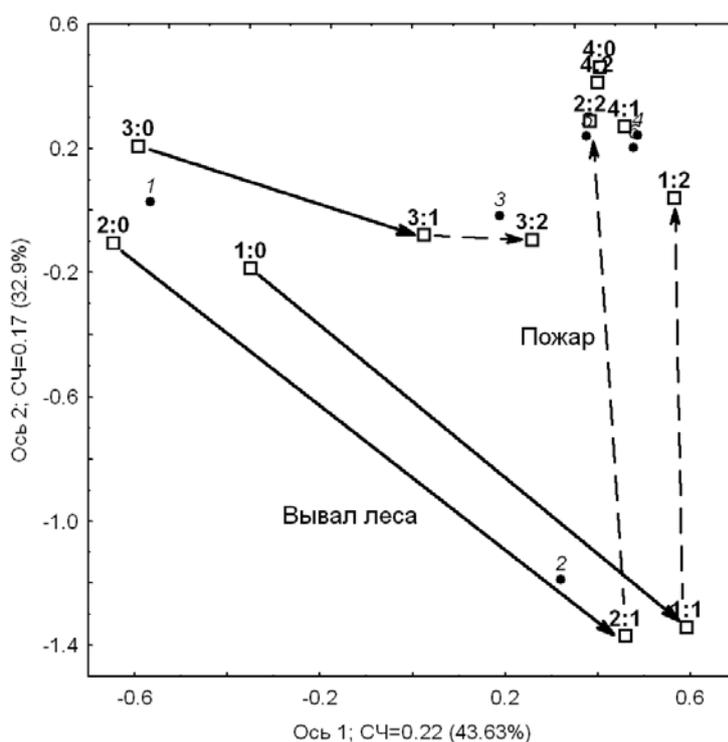


Рисунок 2. Перестройка структуры сообщества ММ. Результаты ординации матрицы  $6 \times 12$ : «виды»(6) $\times$ время(3: 1982<sup>0</sup>–1995<sup>1</sup>–1998<sup>2</sup>–2006)-участки(4), проекция на плоскость двух первых канонических осей. Видеы $\times$ Время:  $X^2(10)=1647.27$ .

Точки – виды ММ (1-3 – лесные и 4 – серые полевки, 5 – бурозубки, 6 – лесная мышь); квадраты – участки: 1 и 2 – коренной лес в горной части, 3 – вторичный лес на равнине, 4 – зарастающая лесом елань; до нарушения (:0) → после вывала леса (:1) → после пожара (:2). Средний Урал, южная тайга, Висимский заповедник, 1982-2006.

## Литература

- Кшнясев И.А. Одна популяция – два режима динамики? // Современные проблемы популяционной, исторической и прикладной экологии: Мат. конф. Вып. 2. - Екатеринбург, 2001. - С. 132-137.
- Cornulier T., and 20 other. Europe-wide dampening of population cycles in keystone herbivores // Science. - 2013. - № 340. - P. 63-66.
- Hansson L., Henttonen H. Gradients in density variations of small rodents: the importance of latitude and snow cover // Oecologia. - 1985. - V. 67. № 3. - P. 394-402.
- Hörnfeldt B. Long-term decline in numbers of cyclic voles in boreal Sweden: Analysis and presentation of hypotheses // Oikos. - 2004. - V. 107. № 2. - P. 376-392.
- Korpela K., and 9 other. Predator–vole interactions in northern Europe: the role of small mustelids revised // Proc. R. Soc. B. - 2014. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2014.2119>

## АНАЛИЗ ДАННЫХ С МЕЗООЛИГОТРОФНОГО БОЛОТА МЭДЛА-ПЭВ-НЮР

Лапина Л.Э.<sup>1</sup>, Михайлов О.А.<sup>2</sup>, Успенский И.М.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>*Отдел математики Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия*  
[lapina@dm.komisc.ru](mailto:lapina@dm.komisc.ru)

<sup>2</sup>*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия*  
[mikter@mail.ru](mailto:mikter@mail.ru)

**Аннотация:** Анализируются данные с 1 по 31 августа 2012 г., полученные на мезоолиготрофном болоте Медла-Пэв-Нюр методом главных компонент. Для анализа использованы 54 переменных, включая некоторые взаимодействия. Показано, что простые регрессионные модели не охватывают весь спектр основных переменных, влияющих на концентрации парниковых газов.

### Объект исследования

Исследования проводили с 1 по 31 августа 2012 г. на мезоолиготрофном болоте Медла-Пэв-Нюр, расположенном в подзоне средней тайги на Европейском Северо-Востоке России, в 40 км на северо-запад от г. Сыктывкара (Республика Коми, 61° 56' с.ш. 50° 13' в.д.). Измерительная система включала ультразвуковой анемометр (CSAT3, Campbell Scientific Inc, USA) и инфракрасный газоанализатор открытого типа (Li-7500A, Li-Cor Inc., USA). Отбор проб воздуха проводили на высоте 3.93 м. Регистрация данных производилась с частотой 10 Hz. Параметры микроклимата (температуру воздуха и почвы, интенсивность ФАР, падающей и отраженной солнечной радиации и др.) и глубину снежного покрова регистрировали автоматической метеостанцией с помощью регистратора CR3000 (Campbell Scientific Inc., США). Температура и объемная влажность почвы измеряются на глубинах 25 см (глубина 1) и 15 см (глубина 2).

### Анализ данных

В статье проводится факторный анализ посуточно данных за август 2012 года. Для анализа используется 54 переменных: концентрация метана (ммоль/куб.м.), концентрация углекислого газа ( ммоль/куб.м.), концентрация водяного пара (ммоль/куб.м.), температура воздуха (°C), компоненты вектора скорости  $U_x, U_y, U_z$  (м/с), атмосферное давление, квадраты пульсаций компонент скорости, потоки пульсационных потоков тепла, метана, углекислого газа, водяного пара, компоненты скорости трения на плоскости, производные концентраций метана, углекислого газа, водяного пара, температуры, компонент вектора скорости, атмосферного давления, а также некоторые взаимодействия в виде произведений: концентраций метана и углекислого газа, концентраций метана и водяного пара, концентраций метана и температуры, концентраций и соответствующих компонент вектора скорости, концентрации метана и атмосферного давления, концентрации водяного пара и температуры, концентрации углекислого газа и температуры, концентрации углекислого газа и водяного пара, атмосферное давление, осредненное по 30 минутным интервалам, плотность воздуха, поток углекислого газа, поток скрытого тепла, относительная влажность, суммарная радиация, альbedo, коротковолновая радиация падающая и отраженная, длинноволновая радиация падающая и отраженная, температура и влажность почвы на глубинах 1(25 см) и 2(15 см), фар, кинетическая энергия турбулентности, температура на поверхности почвы, рассчитанной по длинноволновой радиации, скорость трения  $U_*$ .

Из значений собственных чисел получаемой корреляционной матрицы по принципу Кэттела выделяется 6 факторов, а по принципу «собственные числа, большие 1» - 13 факторов, причем 13 факторов объясняют примерно 90 процентов дисперсии признаков, а 6 факторов объясняют примерно 70 процентов общей дисперсии, а два фактора – около

половины. Поэтому рассматривается структура первых шести признаков в течение месяца. В разные дни августа она разная.

Обозначения:  $T$  – температура воздуха,  $R$  – суммарная радиация,  $Ts_1, Ts_2$  – температура почвы на глубинах 1 и 2,  $Hs_1, Hs_2$  – объемная влажность почвы на этих же глубинах соответственно,  $Far$  – фотосинтетически активная радиация,  $KET$  – кинетическая энергия турбулентности, которая считалась как сумма кинетических энергий осредненных соответствующих компонент вектора скорости (не пульсаций),  $U_*$  – скорость трения.

В работе (Лапина Л.Э. и др., 2014) было проведено четыре варианта расчетов факторного анализа по данным 1 августа 2012г. Варианты отличались числом рассматриваемых переменных от 8 до 54. При малом числе переменных структура факторов четко не выделялась. Кроме того, информация о существенных параметрах важна для составления дифференциальных уравнений, описывающих динамику основных параметров.

Таблица 1. Факторные нагрузки в отдельные дни августа 2012г

Дата Переменная	02.08.	08.08.	21.08	29.08	31.08
альбедо	0,48 (F1)	0,66 (F1)	-0,69 (F7)	-0,57 (F3)	0,56 (F4)
$T$	0,91 (F1)	0,83 (F1)	-0,71 (F7)	0,88 (F1)	-0,94 (F6)
$R$	0,81 (F1)	0,67 (F1)	0,79 (F1)	0,69 (F1)	-0,96 (F3)
$Ts_1$	0,57 (F2)	0,82 (F8)	0,82 (F3)	-0,77 (F12)	-0,71 (F3) -0,59 (F4)
$Ts_2$	0,80 (F2)	0,79 (F2)	0,64 (F3)	0,92 (F3)	-0,83 (F4)
$Hs_1$	0,58 (F2)	-0,67 (F8)	-0,80 (F3)	0,78 (F12)	0,72 (F4)
$Hs_2$	0,80 (F2)	-0,79 (F2)	0,79 (F3)	-0,92 (F3)	0,83 (F4)
$Far$	0,78 (F1)	0,69 (F1)	0,79 (F1)	0,69 (F1)	-0,96 (F3)
$KET$	-0,83 (F2)	0,80 (F5)	0,81 (F1)	0,56 (F2)	-0,75 (F2)
$U_*$	-0,72 (F2)	0,75 (F5)	0,87 (F1)	0,95 (F2)	-0,88 (F2)

Факторный анализ позволил выделить наиболее часто встречающиеся в главных компонентах показатели, согласно которым, простейшие регрессионные модели, в которых учитывается лишь температура воздуха, представленные, например, в работе (Головацкая и др., 2008), являются недостаточными для прогнозирования значений парниковых газов в отдаленной перспективе.

## Литература

- Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В. Влияние ландшафтных и гидрометеорологических условий на эмиссию CO<sub>2</sub> в торфоболотных экосистемах // Доклады Академии наук. - 2008.- т.418.- N4.-С.539-542.
- Лапина Л.Э., Успенский И.М., Михайлов О.А. Факторный анализ концентраций парниковых газов и других параметров с мезо-олиготрофного болота Медла-Пэв-Нюр // Труды Коми научного центра, N187. - 2014.- С.94-108

## ДВА ПОДХОДА К ОПИСАНИЮ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ.

Левашова Н.Т.<sup>1</sup>, Мухартова Ю.В.<sup>2</sup>, Ольчев А.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

[natasha@npanalytica.ru](mailto:natasha@npanalytica.ru)

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

[muhartova@yandex.ru](mailto:muhartova@yandex.ru)

<sup>3</sup>ИПЭЭ РАН, Москва, Россия

[aoltche@yandex.ru](mailto:aoltche@yandex.ru)

**Аннотация:** Представлено сравнение двух подходов к замыканию системы усредненных уравнений Навье-Стокса: замыкание полуторного порядка и замыкание первого порядка на основании теории контрастных структур.

### 1. Введение

Задача математического моделирования турбулентного движения воздушных потоков в приземном слое атмосферы над горизонтально неоднородной поверхностью со сложным рельефом и растительностью, как правило, сводится к решению системы уравнений, одно из которых – векторное уравнение Навье-Стокса для трех неизвестных компонент скорости ветра:  $\vec{V} = \{U, V, W\}$  и уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V}\nabla)\vec{V} - \frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\Delta\vec{V} + \vec{F}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho, \vec{V}) = 0.$$

Здесь  $\rho$  – плотность воздуха,  $p$  – атмосферное давление,  $\nu\Delta\vec{V}$  – слагаемое, обусловленное процессами диффузии,  $\nu$  – кинематическая вязкость, слагаемое  $\vec{F}$  описывает влияние пространственной неоднородности на движение воздушного потока.

Задача численного решения непосредственно уравнения Навье-Стокса требует большого количества машинных ресурсов, поскольку величины, входящие в это уравнение, характеризуются значительными флуктуациями в пространстве и времени. В целях упрощения вычислительной процедуры в большинстве существующих моделей проводится усреднение по времени и координатам. При использовании осреднения Рейнольдса получается система из четырех уравнений, в которой неизвестными являются средние значения компонент скорости и давления, а также комбинации  $\langle u'^2 \rangle$ ,  $\langle v'^2 \rangle$ ,  $\langle w'^2 \rangle$ ,  $\langle u'v' \rangle$ ,  $\langle u'w' \rangle$ ,  $\langle v'w' \rangle$  величин  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ , являющихся отклонениями компонент скорости от среднего, называемые моментами второго порядка (угловые скобки означают осреднение). Как следствие увеличения количества неизвестных параметров, возникает проблема замыкания осредненной системы уравнений. Для решения этой проблемы составляются дополнительные уравнения, выражающих неизвестные величины через моменты более высокого порядка.

### 2. Два подхода к замыканию

В настоящей работе предложено сравнение двух подходов к замыканию системы осредненных уравнений. В первом случае для замыкания используются моменты второго порядка, имеющие смысл турбулентной кинетической энергии и её диссипации (Мухартова 2015). Уравнения для этих величин составляются на основании дополнительных полуэмпирических допущений. Этот прием называется замыканием порядка 1.5. Второй подход не является общепринятым и представляет собой замыкание первого порядка с использованием теории контрастных структур. Контрастной структурой (КС) называется

функция, внутри области определения которой есть интервал, на котором происходит резкое изменение значений этой функции. Эта область называется внутренним переходным слоем. Идея применения теории КС для моделирования обтекания воздушными потоками пространственных неоднородностей возникла на том основании, что графики функций, описывающих компоненты скорости ветра, имеют резкие переходные слои в окрестности границ открытых участков с обдуваемым препятствием. Такой подход к моделированию систем с диссипацией обычно применяется при описании автоволновых процессов в биологически активных средах или различных фазовых переходах, например таких как горение.

### 3. Результаты численных экспериментов

Для решения задачи о распределении поля скорости ветра в неоднородном растительном покрове было сделано предположение об однородности растительности вдоль некоторого пространственного направления. Задача рассматривалась как двумерная и решалась в плоскости, перпендикулярной этому направлению.

Результаты численных экспериментов по расчету распределения горизонтальной компоненты скорости ветра в пределах вырубki в лесу без подлеска представлены на рисунке 1.

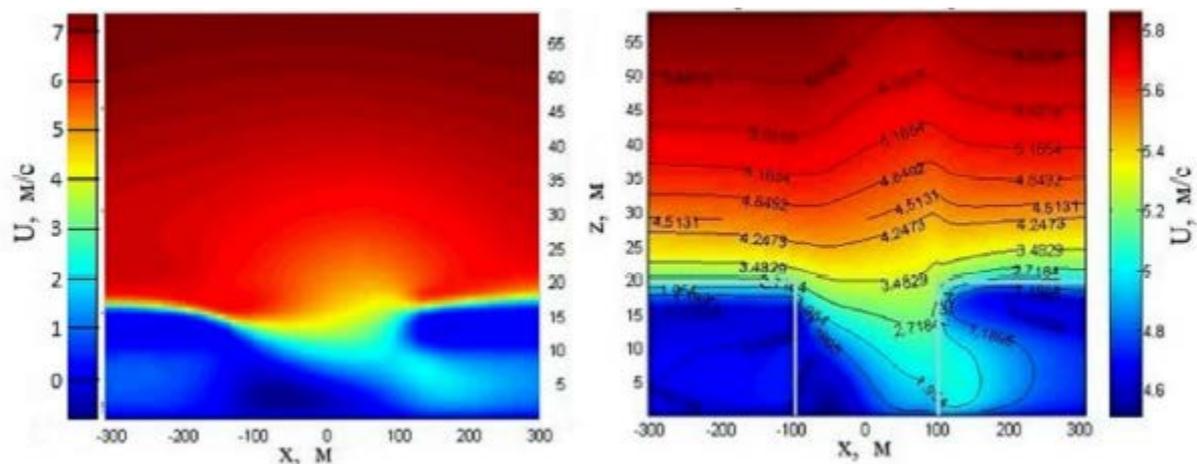


Рисунок 1. Расчет горизонтальной компоненты скорости ветра в пределах вырубki в лесу. Слева представлен результат расчета поля ветра с использованием теории контрастных структур; справа – с помощью замыкания порядка 1.5.

### 4. Выводы.

Результаты численных экспериментов показали в целом хорошее качественное и количественное совпадение полей скорости ветра и коэффициентов турбулентности, рассчитанных с использованием двух различных моделей, одна из которых разработана на основании теории диссипативных контрастных структур, а другая использует замыкание порядка 1.5.

Исследование было выполнено при поддержке РФФИ (грант № 14-04-01568-а и 13-01-00200-а).

### Литература

Мухартова Ю.В., Левашова Н.Т., Ольчев А.В., Шапкина Н.Е.// Применение двумерной модели для описания турбулентного переноса CO<sub>2</sub> в пространственно-неоднородном растительном покрове. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2015. № 1. С. 15-22.

## ДИАЛЕКТИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И МОДЕЛИ: ПОУЧИТЕЛЬНАЯ ИСТОРИЯ ИЗ ЖИЗНИ ВЕЙНИКОВ

Логофет Д.О.<sup>1</sup>, Уланова Н.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

[danielal@postman.ru](mailto:danielal@postman.ru)

<sup>2</sup>*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия*

[nulanova@mail.ru](mailto:nulanova@mail.ru)

**Аннотация:** Экспериментальные данные по динамике ценопопуляций *Calamagrostis* с возрастной и стадийной структурами обусловили новый тип матричных моделей дважды структурированных популяций, однако эти данные содержали «репродуктивную неопределенность». Потребность в надежной калибровке модельной матрицы продиктовала новый план полевого эксперимента, и его результаты выявили новые эффекты в онтогенезе вейника, а также новые модельные ситуации, где популярный в сравнительной демографии показатель  $\lambda_1$  нуждается в уточнении.

### 1. Введение

Виды рода *Calamagrostis* – это многолетние длиннокорневищные злаки, образующие разветвленную систему парциальных кустов разного возраста и активно захватывающие открытые пространства при вегетативном размножении. В прежних проектах по изучению ценопопуляций вейников состояние популяции в терминах возраста и стадии развития растений определяли визуальным учетом всех маркированных и вновь появившихся особей на постоянных пробных площадках согласно давно разработанным шкалам онтогенеза изучаемых видов и оригинальной методике оценки хронологического возраста (в годах, Уланова и др., 2002, 2008). Данные двух последовательных учетов позволяли построить *граф жизненного цикла* (ГЖЦ, на конечной 2-мерной решетке стадийно-возрастных состояний) и вычислить *переходную часть* ( $T$ ) соответствующей графу модельной матрицы  $L = T + F$ , но элементы репродуктивной части  $F$  оставались *неопределенными* (*reproductive uncertainty*, Logofet, 2008), пока корневищная связь каждой особи пополнения с материнским кустом была скрыта в почве.

Репродуктивная неопределенность препятствовала вычислению  $\lambda_1(L)$  – доминантного собственного числа матрицы  $L$  как (специфической по времени и пространству) меры адаптации вида к условиям среды. В качестве методического приема была предложена *гипотеза максимальной адаптации* (Логофет, 2010) и сформулирована соответствующая задача ограниченной максимизации  $\lambda_1(L)$  по коэффициентам репродукции, в которой ограничения определялись данными наблюдений, экспертным знанием и априорными границами (сверху и снизу) для оптимизируемых параметров. Возникающие при этом математические задачи получили свои теоретические решения (Логофет, 2012; Logofet, 2013a), а практика обнаружила критическую роль статус-специфических значений для априорных границ в решении задачи максимизации (Logofet, 2013b).

В докладе представлены результаты экспериментальной проверки гипотезы максимальной адаптации на пробных площадках с доминированием *C. epigeios* в луговом местообитании и на вырубке елового леса. Эти результаты выявили новые эффекты в онтогенезе вейника, а также новые модельные ситуации, где оценка меры адаптации через  $\lambda_1(L)$  уже не адекватна и нуждается в уточнении.

### 2. Объекты и методы

Полевой эксперимент для проверки гипотезы максимальной адаптации проведен по новой методике с модельным видом – *Calamagrostis epigeios* L. – в двух фитоценозах (луг, возникший на месте заброшенной пашни, и вырубка елового леса), где он доминирует в тра-

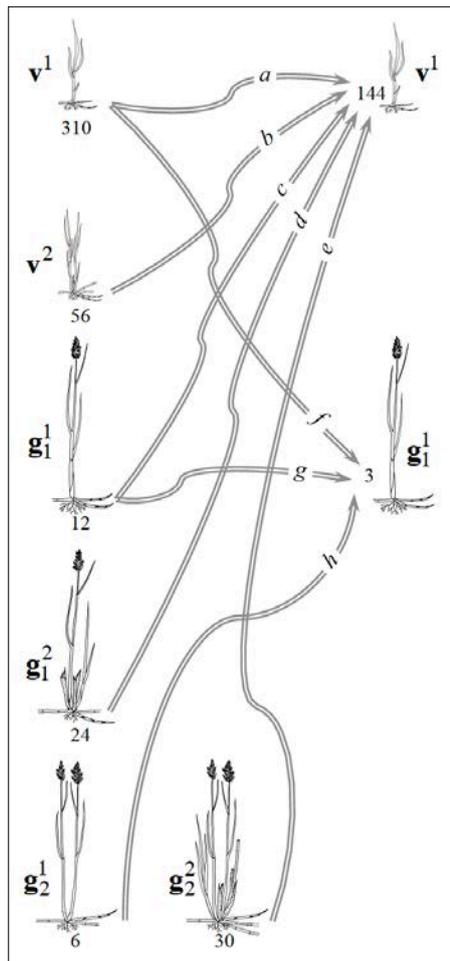


Рисунок 1. Схема выживания корневых отбегов от растений разных родительских групп по результатам раскопа площадки на вырубке. Верхний индекс в обозначениях стадийно-возрастного статуса кустов соответствует возрасту растения в годах. Числа слева показывают количества корневых отбегов, справа – общее число живых дочерних кустов в виргинильной и генеративной стадиях. Параметры  $a, b, \dots, g, h$  обозначают количества дочерних кустов у родительских групп разного статуса.

### 3. Результаты

На рисунке 2 представлен один из четырех полученных ГЖЦ (различающихся по конфигурации; *ibid.*). Конечное число вариантов решения диофантовой системы уравнений и неравенств относительно параметров  $a, b, \dots, g, h$ , позволяет установить точный диапазон значений меры адаптации данной популяции в данное время в виде отрезка  $[\lambda_{1\min}, \lambda_{1\max}]$ . В показанном на рисунке 2 случае получили диапазон  $[0.8833, 1.0331]$ , что в сравнении с результатами других площадок привело к выводам о пригодности метообитаний для роста популяции вейника (*ibid.*).

востое. На каждой площадке (размером  $1 \times 1 \text{ м}^2$ ) все живые и погибшие кусты вейника выкапывали с сохранением системы связующих корневищ с живыми дочерними всех поколений. Это позволило определить материнско-дочерние отношения между кустами и датировать год формирования дочерних кустов, а также определить стадию развития родительского куста в предыдущий год. Каждому кусту давали стадийно-возрастную на момент раскопа (август 2014) характеристику и восстанавливали его статус ровно год назад, а также определяли число живых дочерних корневищ, что служило прямому вычислению фактического вклада каждой возрастно-стадийной группы в пополнение популяции за счёт вегетативного размножения на каждой из четырех площадок в отдельности. Из дальнейшего подсчета кустов по статусным группам получали количественную структуру ценопопуляции в момент раскопа,  $x(2014)$ , а структуру  $x(2013)$  восстанавливали с учетом всех кустов, погибших за прошедший год. Учитывая изменения статуса по всем кустам площадки, формировали полную картину переходов на данной площадке за год, т.е. переходную часть ГЖЦ и матрицу  $T$  в количественной форме.

Чтобы завершить построение ГЖЦ, для каждого куста пополнения определяли по корневой связи его материнский куст и выстраивали общую схему *пополнения* от родителей разных статусных групп с количествами корневых отбегов и дочерних кустов (пример на рисунке 1). Схема задавала очевидные соотношения-равенства на соответствующие суммы параметров  $a, b, \dots, g, h$ , а также и ограничения сверху (число дочерних кустов не может превосходить числа молодых корневищ).

Калибровка матрицы  $L = T + F$  согласно уравнению

$$x(2014) = (T + F) x(2013) \quad (1)$$

сводилась к определению точных значений параметров  $a, b, \dots, g, h$ , которые искали путем решения *диофантовой* (т.е. в целых числах) системы уравнений и неравенств, отражающей схему выживания (рисунок 1). Экспертное мнение о количественной иерархии среди выживания потомков у родителей разного статуса давало дополнительные ограничения (Логофет и др. 2015). Для каждого допустимого варианта решения диофантовой системы вычисляли значение  $\lambda_1(L)$ .

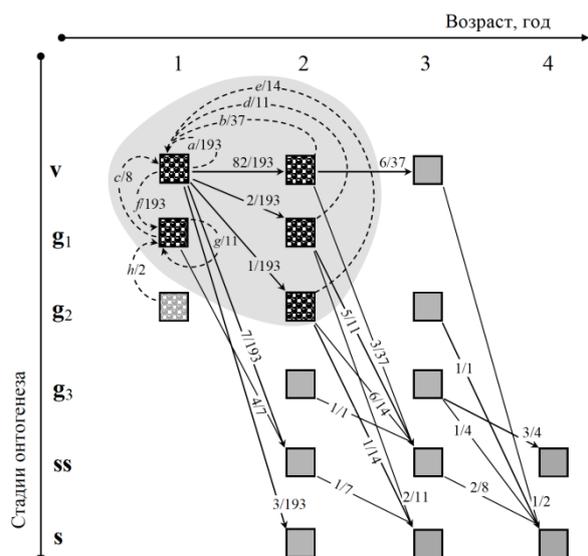


Рисунок 2. ГЖЦ *C. epigeios* по данным раскопа площадки на вырубке в 2014 г. Сплошные стрелки обозначают онтогенетические переходы, состоявшиеся за 1 год, пунктирные – размножение. Репродуктивное ядро ГЖЦ выделено серым фоном.

Калибровка матриц только на той части данных, что соответствует условиям репродуктивной неопределенности, через решение задачи максимизации  $\lambda_1(L)$  с ограничениями и сравнение полученных решений с результатами прямого подсчета коэффициентов репродукции выявили критическую роль априорных границ в вопросе близости гипотетического решения и диапазона точных значений. Так гипотеза максимальности получила подтверждение в уточненной формулировке (*ibid.*).

Согласно рисунку 2 пополнение популяции происходит в две стадийно-возрастных группы, и это стало открытием эксперимента: кусты пополнения, обнаруженные в генеративной стадии, которую они достигли, пропустив стадию виргинильности. Новые репродуктивные пути в ГЖЦ повышают поливариантность онтогенеза. Вместе с новыми путями

возникают и новые (не описанные в литературе) конструкции ГЖЦ с репродуктивными дугами ( $g_2^1 \rightarrow g_1^1$  на рисунке 2) вне репродуктивного ядра (максимального сильно связанного подграфа). Из-за этого  $\lambda_1(L)$  теряет точность как инструмент сравнительной демографии, и мы предлагаем общий метод для уточнения меры адаптации в подобных ситуациях (*ibid.*).

#### 4. Заключение

Двенадцатилетняя история наших проектов *Calamagrostis* иллюстрирует характерные витки диалектической спирали в развитии отношений «эксперимент – модель». Сначала формализация накопленных знаний и данных создала новый тип матричных моделей – неблочную матрицу для популяции с двойной структурой – и количественную меру приспособленности ценопопуляции вида с поливариантным онтогенезом. Затем потребности модели продиктовали новый план эксперимента, в результате которого мы обнаружили не только новый эффект в онтогенезе вейника, но и новые модельные ситуации, потребовавшие развития соответствующего аппарата.

#### Литература

- Логофет Д.О. Свирижевский принцип замещения и матричные модели динамики популяций со сложной структурой // Журн. общ. биологии. - 2010. - Т. 71. - №1. - С. 30–40.
- Логофет Д.О. Ещё раз о проекционных матрицах: индикатор потенциального роста и польза индикации // Фундаментальная и прикладная математика. - 2012. - Т. 17. - № 6. - С. 41–63.
- Логофет Д.О., Уланова Н.Г., Белова И.Н. Поливариантный онтогенез у вейников: новые модели и новые открытия // Журн. общ. биологии. - 2015 (представлено к публикации).
- Уланова Н.Г., Белова И.Н., Логофет Д.О. О конкуренции среди популяций с дискретной структурой: динамика популяций вейника и березы, растущих совместно // Журн. общ. биологии. - 2008. - Т. 69. - С. 478–494.
- Уланова Н.Г., Демидова А.Н., Клочкова И.Н., Логофет Д.О. Структура и динамика популяции вейника седеющего *Calamagrostis canescens*: модельный подход // Журн. общ. биологии. - 2002. - Т. 63. - № 6. - С. 509–521.
- Logofet D.O. Convexity in projection matrices: projection to a calibration problem // Ecol. Modelling. - 2008. - V. 216. - № 2. - P. 217–228.
- Logofet, D.O. Complexity in matrix population models: polyvariant ontogeny and reproductive uncertainty // Ecological Complexity. - 2013a. - V. 15. - P. 43–51.
- Logofet D.O. *Calamagrostis* model revisited: matrix calibration as a constraint maximization problem // Ecological Modelling. - 2013b. - V. 254. - P. 71–79.

## ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ПОИСКА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ТРАЕКТОРИЙ ОДНОМЕРНЫХ УНИМОДАЛЬНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Люлякин О.П.<sup>1</sup>, Саранча Д. А.<sup>1</sup>, Тращев Р. В.<sup>2</sup>, Юрезанская Ю.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ВЦ РАН, Москва, Россия

[dmsaran@yandex.ru](mailto:dmsaran@yandex.ru), [july@ccas.ru](mailto:july@ccas.ru), [oleg2017@yandex.ru](mailto:oleg2017@yandex.ru)

<sup>2</sup> ИФПБ РАН, Пущино, Россия

[tslav85@mail.ru](mailto:tslav85@mail.ru)

**Аннотация:** рассматриваются разностные уравнения в виде одномерных унимодальных отображений (ОУО). Проведено исследование ОУО, полученных при описании динамики численности леммингов, а так же треугольного отображения. Предложены способы распределения циклов по области начальных данных. Приведен порядок возникновения периодических траекторий при изменении бифуркационного параметра, представлено его сравнение с «порядком Шарковского».

Одномерное унимодальное отображение (ОУО) является одним из популярных математических объектов, используемых при моделировании объектов различной природы. В наших исследованиях задача об изучении свойств ОУО возникла при описании динамики численности животных в рамках математических моделей тундровых популяций и сообществ (Тращев и др., 2014; Недоступов и др., 2010). В результате проведенных исследований удалось построить набор взаимосвязанных моделей. Основа набора – детальные имитационные модели, построенные во взаимодействии с биологами. Анализ результатов вычислительных экспериментов с взаимодополняющими моделями сообщества «растительность–лемминги–песцы» и популяции леммингов с учетом возрастной структуры привел к обоснованию упрощенной модели в виде одномерного разностного уравнения (ОУО), связывающего численности леммингов в двух соседних годах. В качестве некоторого приближения к полученной упрощенной модели рассмотрено уравнение вида:

$$X^{t+1} = F_1(X^t) = \begin{cases} 2X^t, & 0 \leq X^t \leq 0.5, \\ 1 - r(X^t - 0.5), & 0.5 < X^t \leq 0.5 + \frac{1-d}{r}, \\ d(0 < d < 1), & 0.5 + \frac{1-d}{r} < X^t \leq 1. \end{cases}$$

Как следует из этой формулы динамика численности популяции леммингов определяется тремя показателями: 1) скоростью прироста биомассы в благоприятный год; 2) максимальной численностью; 3) выживаемостью в наиболее неблагоприятных условиях. Первый показатель характеризует баланс между процессами рождаемости и смертности в отсутствие "давления среды"; второй характеризует экосистему в целом и отражает коэволюцию леммингов и кормовой базы; третий характеризует адаптационные свойства леммингов в экстремальных условиях и во многом определяется локальными характеристиками, в частности рельефом местности в местах перезимовки. Полученные выводы хорошо согласуются с одной из распространенных гипотез о том, что формирует колебания численности популяций не какой-то отдельно взятый фактор, а некоторая их комбинация. Проведенные вычислительные эксперименты (Тращев и др., 2014; Недоступов и др., 2010) показали, что для ОУО такого типа, при изменении параметра  $d$  («ступеньки») от 1 до 0, последовательно возникают зоны стабильности с устойчивыми циклами. Внутри зоны стабильности период циклов постоянный, при переходе от одной зоны к другой период изменяется в последовательности натурального ряда 1, 2, 3, 4... . Зоны стабильности

отделены друг от друга переходными зонами с более сложными режимами. При этом «ширину» переходных зон можно сделать как угодно малой при стремлении параметра  $r$  к бесконечности.

Наличие переходных зон находится в определенном соответствии с зарегистрированной динамикой численности реальных популяций (Тращев и др., 2014).

В статье (Недоступов и др, 2010) для изучения свойств периодических решений введено такое понятие, как *линии возврата (ЛВn)*, позволяющих определить местоположение траектории при  $n$ -ом возврате за положение равновесия. Точки пересечения ЛВn с графиком исходной функции  $F$  находятся на соответствующих периодических траекториях. При этом с помощью ЛВn можно отыскать все периодические траектории с периодом, меньшим или равным  $n$ . Линии возврата связаны со стандартными  $F^i(\cdot) = F(F(\dots(F)))$  –  $i$ -кратными отображениями. ЛВm ( $m=1,2,\dots,k; k < n/2$ ) формируются поворотом  $F^{(n)}$  на 90 градусов. Функции  $F^{(n)}$  формируют периодические траектории периода  $(n+1)$ . Это положение дает возможность определить, какие циклы появляются при различных начальных условиях. Для удобства исследования переходных зон рассматривалось треугольное отображение (ТО),  $X^{t+1} = F_0(X^t) = 1 - 2 \cdot |0,5 - X^t|$ , дополненное горизонтальной линией – «ступенькой». Это позволяет расширить переходные зоны и получить другие преимущества при их исследовании. Инструментарий ЛВ удобен для анализа результатов вычислительных экспериментов с опусканием ступеньки. Если ступенька находится в некотором месте, то ее пересекает набор ЛВm ( $m=1,2,\dots,k$ ), реализуется ЛВm с наименьшим номером, среди тех ЛВm, которые выше графика исходной функции. Для ТО получены уравнения для определения координат точек периодических траекторий. Это позволило провести «бифуркационное исследование» – определение циклов, которые возникают по мере опускания ступеньки. Предложен алгоритм расчета последовательности периодов возникающих циклов. При исследовании первой переходной зоны (опускание ступеньки идет сверху вниз), рассматривая последовательно циклы со все большими периодами, приходим к следующей последовательности периодов циклов:

2, 4, 8, 6;

2, 4, 8, 10, 6;

2, 4, 8, 12, 10, 6;

2, 4, 8, 12, 14, 10, 14, 6;

2, 4, 8, 16, 12, 16, 14, 10, 14, 16, 6;

.....

2, 4, 8, 16, 24 (3\*8), **28 (7\*4)**, 20 (5\*4), 28, 12 (3\*4), 24 (3\*8), 28, 20, 28, 24, 28, 16, 28, 24, 28, 20, 28, 24, 28, **26 (13\*2)**, 22 (11\*2), **26, 18 (9\*2)**, **26, 22, 26, 14 (7\*2)**, 28, **26, 22, 26, 18, 26, 22, 26, 28, 24, 28, 10 (5\*2)**, 20 (5\*4), 28, 24, 28, **26, 22, 26, 28, 18, 28, 26, 22, 26, 28, 24, 28, 26, 14, 28, 26, 28, 24, 28, 26, 22, 26, 28, 18, 28, 26, 22, 26, 28, 24, 28, 20, 28, 24, 28, 26, 28, 16, 28, 26, 28, 24, 28, 20, 28, 24, 28, 26, 22, 26, 28, 6 (3\*2)**.

Эта последовательность не противоречит «порядку Шарковского» и в то же время дает взаимное расположение всех циклов, периоды которых не превышают заданное число.

## Литература

- Недоступов Э.В., Саранча Д.А., Чигерев Е.Н., Юрезанская Ю.С. О некоторых свойствах одномерных унимодальных отображений // ДАН. Т. 430. - 2010. - №1. - С. 23-28.  
 Тращев Р. В., Люлякин О. П., Саранча Д. А., Юрезанская Ю. С. Метод комплексных исследований на примере моделирования популяций леммингов. - М.: ВЦ РАН, 2014. - 115с.

## ИМИТАЦИОННАЯ MSIR МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ АКТИВНОСТИ ПРИРОДНОГО ОЧАГА ХАНТАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ

Маклаков К.В.<sup>1</sup>, Кшнясев И.А.<sup>2</sup>, Жигальский О.А.

*Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

<sup>1</sup> [kvm@ipae.uran.ru](mailto:kvm@ipae.uran.ru); <sup>2</sup> [kia@ipae.uran.ru](mailto:kia@ipae.uran.ru)

**Аннотация:** Данные об активности природного очага хантавирусной инфекции использованы для создания системно-динамической модели MSIR (M – maternally derived immunity, S – susceptible, I – infectious, R – recovered), имитирующей наблюдаемую сезонную динамику распространения инфекции в популяции грызунов.

Понимание механизмов колебаний активности природных очагов и предсказание вспышек хантавирусных (ХВ) эпидемий у человека – актуальная проблема эпидемиологии и медицинской териологии (Бернштейн и др., 2010; Кшнясев и др., 2012; Zhigalskii et al. 2013). Необходим популяционный подход к анализу распространения инфекции, так как данная инфекция переносится в популяциях мелких грызунов. Классическая модель инфекционного заболевания SIR (S –susceptible, I – infectious, R – recovered (immune)) была дополнена с учётом знаний об экологии вирусоносителей (грызунов) и использована в системно-динамическом виде для описания сезонной динамики распространения инфекции.

В модели были учтены следующие специфические особенности:

- 1) фактическая бессимптомность инфекции для хозяина (считается, что ХВ не вызывает дополнительную смертность);
- 2) вирус выделяется с экскретами лишь в начальный период вирусоносительства (около месяца);
- 3) потомки инфицированных/переболевших самок обладают врожденным иммунитетом, который сохраняется лишь 2-3 месяца;
- 4) сезонный характер репродукции (только в сезон размножения);
- 5) численность популяции ограничена ёмкостью среды.

Учитывающая вышеназванные особенности 4-компарментная эпидемическая модель обозначена как MSIR (M – maternally derived immunity, S –susceptible, I – infectious, R – recovered (immune)). Разработанная системно-динамическая модель представляет собой следующую систему уравнений:

$$dM/dt = \alpha\gamma(I+R) - M/m - \delta M$$

$$dS/dt = \alpha\gamma S + M/m - \beta\gamma SI/N - \delta S$$

$$dI/dt = \beta\gamma SI/N - I/i - \delta I$$

$$dR/dt = I/i - (\delta + 1 - \gamma)I,$$

где:  $M$ ,  $S$ ,  $I$ ,  $R$  и  $N$  – плотности особей с врожденным иммунитетом, восприимчивых, инфицированных, переболевших и суммарная ( $N=M+S+I+R$ ) численность соответственно;  $\alpha$  – рождаемость (в день),  $\gamma$  – сезонность ( $\gamma=0$ , если  $f \leq 1$  или  $\gamma=1$ , если  $f > 1$ ;  $f=2\{0.5[1 + \sin(2\pi t/365)]\}^p$ , например, при  $p=3$ , продолжительность репродуктивного сезона  $\approx 4$  мес. (Taylor, White, Sherratt, 2013);  $\delta$  – смертность:  $\delta=\alpha N/K$ , где  $K=200$  особей – ёмкость среды;  $\beta$  – интенсивность заражения;  $m=60$  дней – средняя продолжительность материнского иммунитета;  $i=30-90$  дней – средняя продолжительность инфекционной стадии (выделения вируса).

Системную динамику моделировали в среде AnyLogic University 7.1.2. (<http://www.xjtek.ru/anylogic/>). Значения параметров задавались в соответствии с экологическими условиями южной тайги (сезонность) и экологии рыжей полёвки (*Myodes glareolus*) – резервуарного хозяина ХВ (хантавируса) Пуумала в активных очагах ГЛПС (геморрагическая лихорадка с почечным синдромом).

Имитируемая моделью сезонная динамика распространения инфекции (рисунок 1) была сопоставлена с результатами эпизоотического мониторинга рыжей полевки (РП, *Myodes glareolus*), проводившегося в окрестностях города Ижевск (56°51'СШ 53°13' ВД): 15 лет (1981-1995 гг.) – учёты четыре раза в год, и 25 лет (1981-2005 гг.) – учёт один раз в год в августе. ХВ-антиген (AG<sup>+</sup>) в лёгких животных выявлялся иммуноферментным методом (Бернштейн и др., 2010).

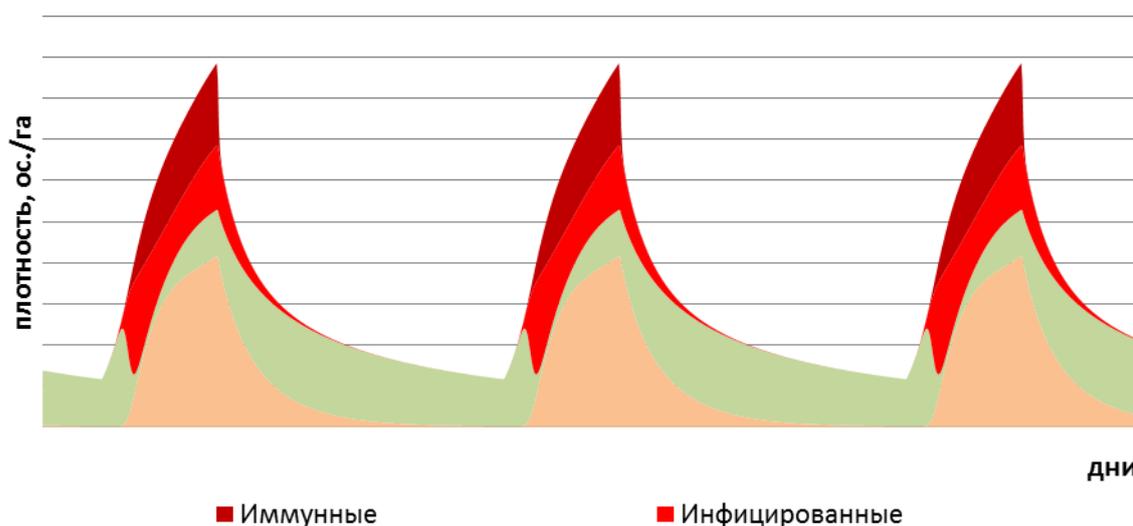


Рис.1. Имитированная динамика (диаграмма накопления) численности вирусоносителей различного статуса с коротким сезоном размножения (4 мес.,  $p=3$ ).

Результаты имитационного моделирования показали, что:

- 1) инфекция не исчезает из популяции в течение года и её динамика воспроизводится без наличия других внешних резервуаров в среде;
- 2) наибольшего значения доля заражённых и переболевших достигает к концу сезона размножения;
- 3) эта доля не превышает 30%.

Приведённые результаты соответствуют эмпирическим показателям эпизоотического мониторинга и позволяют сделать вывод об адекватности модели, которая для полного описания механизмов вспышек хантавирусной инфекции на следующем этапе разработки нуждается в дополнении сезонной динамики многолетней динамикой численности грызунов.

## Литература

- Бернштейн А.Д., Гавриловская И.Н., Алекина Н.С. Особенности природной очаговости хантавирусных зоонозов // Эпидемиология и вакцинопрофилактика, 2010, №2, С. 5-13.
- Кшняев И. А. Бернштейн А. Д. Динамика активности природного очага хантавирусной инфекции: автономные или вынужденные колебания? // Математическое моделирование в экологии / Материалы Третьей Национальной научной конференции с международным участием, 21-25 октября 2013 г. – Пущино, ИФХиБПП РАН, 2013.–С. 152–153.
- Zhigalskii O. A., Bernshtein A. D., Kshnyasev I. A., Apekina N. S. Ecological mechanisms of HFRS activity in European foci: Prognosis of incidence // Russian Journal of Ecology, 2013, Vol. 44, No. 3, pp. 267–270.
- Taylor R.A., White A., Sherratt J.A. How do variations in seasonality affect population cycles? // Proc. R. Soc. B 2013 280: 20122714.

## ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОСТПИРОГЕННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ПОЧВ

Максимова Е.Ю.<sup>1,2</sup>, Абакумов Е.В.<sup>1,2</sup>, Надпорожская М.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти, Россия

[doublemax@yandex.ru](mailto:doublemax@yandex.ru)

**Аннотация:** Рассматриваются вопросы, связанные с моделированием последствий лесных пожаров. Оцениваются перспективы применения методов моделирования влияния разных типов лесных пожаров на динамику органического вещества с помощью систем EFIMOD и ROMUL.

Леса нашей страны обладают огромными сырьевыми запасами и выполняют глобальные экологические функции, являясь стоком углекислого газа. В результате потепления климата (как одного из вероятных сценариев) увеличивается пожароопасность лесов. Возрастание частоты лесных пожаров может быть и вследствие усиления негативного влияния деятельности человека. Лесной пожар – неуправляемое многостадийное горение на покрытой лесом площади (Козодеров, Кулешов, 2012). Пожары повреждают растительный покров, поверхностные органогенные горизонты почв, приводят к выбросу углекислого газа в атмосферу, могут нанести значительный ущерб лесному фонду. Нарушения лесных экосистем после пожаров изменяют характер восстановительных процессов, поскольку приводят и к значительным потерям азота – элемента первого минимума хвойных лесов. С позиций изучения круговорота органического вещества влияние лесных пожаров на лесные почвы рассмотрено недостаточно (Чертов и др., 2012). Количественная оценка долговременных последствий лесных пожаров на практике трудноосуществима. В данном случае для выполнения прогнозных задач мониторинга могут быть применены методы математического моделирования постпирогенных сукцессий. Применение имитационных моделей, учитывающих влияние пожаров на динамику лесной растительности и почв могло бы создать теоретическую основу для прогноза хода сукцессий и расчета скорости восстановления лесных экосистем (Беньков, 2000; Чертов и др., 2012). Математические модели, построенные на универсальных, всеобщих законах, дают возможность без существенных затрат учитывать обширный ряд климатических, почвенных, гидрологических, агротехнических и других условий свойств объекта, а также показать вероятность его изменения при том или ином внешнем воздействии, что зачастую недостижимо в условиях натурального эксперимента (Кокорева и др., 2012). Основы и приемы математического моделирования динамики органического вещества в лесных экосистемах отражены в публикациях (Комаров и др., 2007). По накоплению органического вещества в экосистеме судят о ее внутреннем развитии и стабилизации, а по уменьшению о деградации под влиянием изменения природных или антропогенного факторов (Комаров, Чертов, 2007). В вычислительных экспериментах выявлено, что действие лесных пожаров может оказывать большее негативное воздействие на баланс углерода и продуктивность лесов, чем потепление климата (Комаров, Кубасова, 2007; Чертов и др., 2012). Поэтому необходимо оценивать баланс и динамику запасов углерода лесных экосистем под воздействием лесных пожаров отдельно. Данный вопрос можно решить с помощью системы моделей биологического круговорота углерода и азота в лесных экосистемах EFIMOD (Komarov et al., 2003), которая была уже использована для сравнительного анализа влияния лесных пожаров на лесных территориях России и Канады (Чертов и др., 2012), но авторами отмечена необходимость расширения сети экспериментальных исследований в комплексе с применением математического моделирования.

Объектами исследования являются постпирогенные серогумусовые почвы степных островных сосновых боров в районе г. Тольятти Самарской области. Эти боры чаще всего

формируются на песчаных и супесчаных отложениях эолового или аллювиального происхождения в суббореальном климате. Изучаемые сосновые боры являются реликтами, поэтому крайне важно сохранять эти леса. Известно, что аномальные погодные явления 2010 года в виде чрезвычайно низкого количества осадков и высоких значений температуры воздуха привели к возникновению лесных пожаров на большей части территории России. С начала пожароопасного периода на территории Тольяттинского лесничества произошло 34 лесных пожара. Площадь, пройденная огнем, составила 2083 га, в том числе 1037 га повреждено верховым пожаром. Спустя несколько лет около 80 % выгоревших деревьев были вырублены, и лишь на 40% территории проведены рекультивационные мероприятия. В городских лесах г. Тольятти в 2010 году катастрофические природные пожары привели к образованию пирогенно-трансформированных почв, которые существенно отличаются от ненарушенных по морфологическим признакам и основным химическим и физическим свойствам. Для данного объекта существует возможность характеризовать сукцессионное развитие экосистем после низового и верхового пожаров в отдельности. Несмотря на дефицит данных по растительному опаду, изменению микроклимата постпирогенных почв, проведение вычислительных экспериментов с математическими моделями динамики органического вещества почв ROMUL лесных экосистем EFIMOD может быть полезно в плане построения вероятностных краткосрочных прогнозов 5-10-15 лет и их проверке в натуральных наблюдениях. В настоящий момент по изучаемым постпирогенным территориям есть ряд пятилетних наблюдений. Кроме того, имеются данные по изменению физико-химических свойств почв (рН, объемная плотность, запасы органического вещества и азота и их пространственное варьирование). Проводится наблюдение за видовым составом восстанавливающегося растительного покрова. В вычислительных экспериментах с моделью ROMUL предполагается изучить динамику запасов органического вещества и азота в почве при разных сценариях восстановления растительности и при разных уровнях изменения поступления растительного опада: 1) при интенсивном низовом пожаре: а) зарастание травами и становление лугового типа растительности, б) восстановление соснового леса искусственными посадками саженцев; 2) при верховом пожаре. Послепожарную динамику систем почва-растение предполагается изучить с помощью модели EFIMOD, которая дает возможность оценить восстановление разных древесных насаждений. Моделирование динамики сукцессии лесных биогеоценозов и лесовосстановительных процессов является важной частью в вопросе изучения влияния лесных пожаров на почвенный покров, потому что представляет неотъемлемый элемент разработки лесохозяйственных мероприятий, ориентированных на поддержание устойчивости лесных экосистем.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проектов мол-а 14-04-32132, мол-а-вед 15-34-20844.*

## Литература

- Беньков А.В. Оценка и моделирование лесовосстановительных процессов в южно-таежных лесах Приенисейской Сибири: Дис. ... канд. с.-х. наук. – Красноярск. - 2000.
- Козодеров В.В., Кулешов А.А. Моделирование лесных пожаров и наблюдение разных стадий их развития по данным гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Исследование земли из космоса. – 2012. - № 1. - С. 29-39.
- Кокорева А.А., Умарова А.Б., Вайгель А.Э., Бутылкина М.А. Физически обоснованное моделирование водного режима почвенных конструкций // Материалы докладов VI съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева Всероссийская с международным участием научная конференция «Почвы России: современное состояние, перспективы изучения и использования», Школа-семинар для молодых ученых «Знания о почве-развитию страны». – 2012. - С. 181-183.
- Комаров А.С., Кубасова Т.С. Моделирование динамики органического вещества в хвойно-широколиственных лесах в разных типах местообитаний при пожарах (вычислительный эксперимент) // Известия РАН. Серия Биологическая. – 2007. - №4. - С.490-500.

- Комаров А.С., Чертов О.Г. Сток углерода в почву как критерий устойчивого функционирования лесных экосистем // Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Отв. ред. Кудеяров В.Н. М.: Наука, 2007. - С.233-241.
- Комаров А.С., Чертов О.Г., Михайлов А.В., Быховец С.С., Зудин С.Л. Надпорожская М.А. и Зубкова Е.В. Абакумов Е.В. и др. / Отв. ред. В.Н. Кудеяров / Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. 2007. М.: Наука. 480 с.
- Чертов О.Г., Комаров А.С., Грязькин А.В., Смирнов А.П., Бхатти Д.С. Имитационное моделирование влияния лесных пожаров на пулы углерода в хвойных лесах Европейской России и центральной Канады // Лесоведение. 2012. № 2. С. 3-10.
- Komarov A., Chertov O., Zudin S. et al. EFIMOD 2 – the system of simulation models of forest growth and elements cycles in forest ecosystems // Ecol. Model. 2003. - V. 170. - P. 373-392.

## ДОСТУПНЫЙ АЗОТ КАК ФАКТОР ЭКОСИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ В ФАЗЕ КЛИМАКСА НА ЛЕСНОМ ОЛИГОТРОФНОМ БОЛОТЕ

Маслов А.А.

*Институт лесоведения РАН, Успенское Московской обл., Россия*

[amaslov@ilan.ras.ru](mailto:amaslov@ilan.ras.ru)

**Аннотация:** в течение 30 лет после нескольких волн отмирания соснового древостоя на верховом олиготрофном болоте отмечено появление и быстрый рост подроста березы, за 20 лет сформировавшей второй ярус древостоя. Для объяснения наблюдаемых фактов и построения балансовой модели предлагается рассмотреть гипотезу о том, что динамика древесного яруса определяется высвобождением и поглощением доступного азота.

**Введение.** Экосистему верхового лесного болота в известном смысле можно считать идеальным объектом анализа и математического моделирования. Геохимическая и гидрологическая автономность, бедность видового состава, известные лимитирующие факторы (недостаток азота, кислая среда, переувлажнение) – уменьшают число возможных связей и облегчают анализ причин динамики компонентов. Устойчивость видового состава на протяжении нескольких тысяч лет позволяет считать эти сообщества климаксом. Однако относительно краткосрочные изменения, протекающие без явной смены видового состава, могут не находить должного отклика в составе торфяной залежи и выявляются только по результатам прямых наблюдений (Маслов, 2007). Цель настоящей работы – анализ и выявление механизмов природной динамики сосняка на верховом болоте с формулировкой подходов для разработки балансовой модели фитомассы.

**Объект и методика.** Природная динамика в сосняке кустарничково-пушицево-сфагновом на олиготрофном верховом болоте близ д. Волково (Звенигородский лесхоз, Московской обл.) изучена путем длительных подробных учетов деревьев и нижних ярусов на постоянной пробной площади. На момент начала наблюдений (1981 г.) высокополнотный древостой был сформирован сосной (исключительно); доминантами нижних ярусов были пушица, хамедафна, багульник, клюква и *Sphagnum magellanicum*. Ожидалось, что в общем ряду типов леса сосняк на болоте будет являть собой образец устойчивости и минимальной флуктуационной изменчивости.

**Результаты наблюдений.** За 30 лет наблюдений обнаружены следующие явления и процессы, большинство из которых является неожиданным в данном типе сообществ. 1) В древостое прошли три волны усыхания, в результате чего число живых стволов на га уменьшилось в три раза. 2) Одновременно с гибелью деревьев сосны в сообществе появился и начал быстро расти подрост березы; единично отмечалось появление подроста ели, сосны и даже осины. 3) Оставшиеся живыми сосны показали резкий рывок радиального прироста. 4) Возобновление березы (появление новых особей) прекратилось. 5) За 20 лет береза сформировала второй ярус древостоя. 6) Приросты сосны и березы начали уменьшаться.

**Анализ механизмов динамики и роли азота.** Установлено, что прямой причиной гибели большей части соснового древостоя были вспышки большого соснового лубоеда (Маслов, 2001а). В развитии вспышек определенную роль играли погодные факторы, однако главной причиной гибели сосен являлось ослабление в результате погружения корневой шейки старых деревьев в толщу торфяной залежи (Маслов, 2001а; 2007).

Основную причину внедрения и быстрого роста березы после массового отпада сосны мы видим в «залповом» (но не одновременном) поступлении элементов минерального питания в верхние слои почвы олиготрофного болота. Этим же можно объяснить увеличение приростов выживших сосен. Оценка размеров отпада фитомассы деревьев за время вспышки лубоеда проведена на основе данных о высоте (H) и диаметре (D) каждого дерева. Масса фракций (хвоя, древесина ствола, древесина ветвей, кора сучьев и кора ствола)

рассчитывалась как степенная функция от  $D^2N$  по литературным данным. Аналогичным образом был проведен расчет и доли азота в составе фракций (Маслов, 2001б). Показано, что в результате вспышек лубоеда с отпадом хвои, ветвей, коры и корней деревьев в почву поступило суммарно 134 кг/га азота. Это в 50–80 раз превышает годовую фоновую норму поступления азота из атмосферы. Характерно, что фаза интенсивного поступления в почву азота в результате гибели деревьев, впервые описанная на олиготрофном болоте, хорошо известна в условиях суходольных лесов. Вместо малины и иван-чая использовать данный ресурс на верховом болоте смогла береза (Маслов, 2007).

**Подходы к разработке балансовой модели.** По результатам первых 20 лет исследований, была предложена концептуальная модель динамики сообщества с учетом азота как лимитирующего фактора (Маслов, 2001б; 2007). Согласно этой модели, высвобождение азота из мертвой фитомассы постепенно уменьшается, что, в конечном счете, должно привести к гибели березы в неблагоприятный год. Последние 10 лет наблюдений, в основном, подтверждают предложенную гипотезу. Одна из причин большой длительности процесса – одновременность слома сухостойных стволов сосны и, соответственно, поступления фитомассы стволов в почву.

Накопленные фактические данные и наличие рабочей гипотезы позволяют перейти к разработке модели динамики фитомассы деревьев на верховом сосновом болоте (с учетом азота как главного лимитирующего фактора). В качестве прототипов модели можно использовать балансовые модели болота «Таежный лог» (Alexandrov et al., 1994; Zavalishin, 2008). При разработке математической модели мы предлагаем принять следующие допущения. 1) Основной запас биологически активного азота находится в фитомассе живых деревьев и в древесном отпаде. 2) Суммарный пул активного азота в экосистеме является постоянной величиной; экосистема практически замкнута по балансу азота. 3) Фитомасса нижних ярусов растительности (моховой покров, кустарнички, травы) принимается постоянной величиной. 4) Высвобождающийся при деструкции отпада азот немедленно поглощается живыми растениями, при этом деревья имеют явное преимущество перед видами нижних ярусов. 5) Максимальная фитомасса деревьев лимитирована общим количеством активного азота и достигается при условии полного разложения древесного отпада. 6) Различные виды деревьев (сосна, береза, ель, осина) при наличии «семенного дождя» обладают разной конкурентной способностью к выживанию всходов в кислой среде верхового болота в зависимости от наличия доступного азота в почве. Приживаемость и скорость роста особей разных видов деревьев определяется количеством доступного азота, поступающего из отпада в единицу времени (год). 7) Модель динамики фитомассы деревьев должна учитывать скорость минерализации разных фракций древесного отпада.

Построение модели даст возможность рассчитать примерное время гибели имеющейся березы и проиграть различные варианты циклов динамики древостоя.

## Литература

- Маслов А.А. Динамика соснового древостоя на олиготрофном лесном болоте близ Звенигорода: вспышка большого соснового лубоеда и ее причины // Бюл. МОИП. Отд. биол. – 2001а. – Т. 106, № 3. – С. 45-51.
- Маслов А.А. Динамика древостоя и нижних ярусов на олиготрофном лесном болоте близ Звенигорода: концептуальная модель процессов в масштабе десятилетий // Бюл. МОИП. Отд. биол. – 2001б. – Т. 106, № 4. – С. 71-77.
- Маслов А.А. Механизмы динамики лесного сообщества в фазе климакса на примере олиготрофного сосняка пушицево-сфагнового // Актуальные проблемы геоботаники. III Всероссийская школа-конференция. Лекции. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – С. 349-364.
- Alexandrov G.A., Bazilevich N.I., Logofet D.A., Tishkov A.A., Shytikova T.E. Conceptual and mathematical modeling of matter cycling in Tajozhny log bog ecosystem (Russia) // Wetlands and shallow continental bodies. – The Hague: SPB Academic. – 1994. – P. 45-93.
- Zavalishin N.N. Dynamic compartment approach for modelling regimes of carbon cycle functioning in bog ecosystems // Ecol. Modell. – 2008. – V. 213, – PP. 16-32.

## **АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ ПО ДИНАМИКЕ ФИТОПЛАНКТОНА НАРОЧАНСКИХ ОЗЁР: ХАОС ВДАЛИ ОТ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ ХАОСОМ И СТРОГОЙ УПОРЯДОЧЕННОСТЬЮ**

Медвинский А.Б.

*Институт теоретической и экспериментальной биофизики, Пущино, Россия*  
[medvinsky@iteb.ru](mailto:medvinsky@iteb.ru)

В докладе даётся краткий обзор некоторых методов анализа временных рядов и приводятся результаты анализа рекуррентных диаграмм, полученных по результатам полевых наблюдений колебаний численности планктона в Нарочанских озёрах (Белоруссия). Этот анализ позволил выявить хаос, который характеризуется доминантным показателем Ляпунова, примерно равным 0,4, т.е. лежащим вне той узкой полосы значений этого показателя: от -0,1 до +0,1, – которая характерна для функционирования популяций на краю хаоса.

## **ВЛИЯНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЗАСУХИ НА ПОДЗЕМНЫЙ ТРАНСПОРТ УГЛЕРОДА ПОД РАЗНЫМИ ДРЕВЕСНЫМИ ПОРОДАМИ**

Меняйло О.В., Матвиенко А.И.

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

[menyailo@hotmail.com](mailto:menyailo@hotmail.com)

**Аннотация:** В работе проверялась гипотеза, что древесные породы, способные увеличивать во время засухи долю свежезафиксированного углерода, закачиваемого в подземную биомассу, наиболее устойчивы к засухе. Она подтвердилась для лиственных пород, но не для хвойных, что связано с неодинаковой функцией микориз. У лиственных пород она поставляет, в первую очередь, воду, у хвойных – азот.

### **1. Введение**

Жара и засуха приводят к неблагоприятным экологическим, экономическим и социальным последствиям. Лесные экосистемы страдают от засухи по-разному. Показано, что неодинаковая засухоустойчивость отдельных древесных пород приводит к вымиранию отдельных видов и к изменению состава пород-лесообразователей (Davreux et al., 2011, Frank et al., 2015). Роль микоризы древесных растений в устойчивости деревьев к засухе и в накоплении и стабильности почвенного углерода остается неизученной. Предполагается, что растения изменяют соотношение распределения углерода в надземной и подземной части (Doughty et al., 2015, Hasibeder et al., 2015) и устойчивость различных древесных пород к засухе может определяться способностью перераспределять углерод в пользу подземной биомассы в условиях засухи. Целью данной работы было оценить масштаб подземной аллокации углерода шести основных лесообразующих пород Сибири, произрастающих в одинаковых условиях, в условиях засухливого 2010 и влажного 2011 годов.

### **2. Объект и методы**

Для изучения реакции различных древесных пород и их микориз к засухе, был задействован Сибирский эксперимент лесопосадок. Опыт основан лабораторией лесного почвоведения Института леса им. В.Н. Сукачева по идеи проф. Н. В. Орловского. Он включает шесть основных лесообразующих пород Сибири. Эксперимент расположен на серой лесной почве. В 1971-1972 гг. были посажены 2-3 летние саженцы ели (*Picea abies*), березы (*Betula pendula*), сосны (*Pinus selvestris*), осины (*Populus tremula*), лиственницы (*Larix sibirica*) и кедра (*Pinus cembra*). Участок с каждым древесным видом занимает площадь 2400 м<sup>2</sup>. Подземная аллокация углерода рассчитана по разнице между эмиссией CO<sub>2</sub> и опадом за вегетационные сезоны 2010-11 гг. Эмиссию CO<sub>2</sub> измеряли каждые 2 недели с мая по октябрь с 4-х колец, установленных под каждой древесной породой. Влияние года и породы (и их взаимодействие) на подземную аллокацию тестировали с помощью 2-х факторного дисперсионного анализа.

### **3. Результаты и обсуждение**

Подземная аллокация углерода варьировала от 60 до 370 г С/м<sup>2</sup> год (Рисунок 1). Обнаружен сильный эффект года (P<0.001), породы (P<0.001) и их взаимодействие. Это значит, что некоторые породы в засухливый год увеличили поток С, закачиваемый в корни и микоризу (береза и осина), а другие (все хвойные) – не изменили. В целом, береза и осина в засухливый 2010 год показали максимальные значения подземного транспорта углерода. Это подтверждает гипотезу и том, что породы с максимальной транспортом, являются наиболее засухоустойчивыми. Однако, среди хвойных пород самая чувствительная к засухе порода (засухонестойчивая) – ель – обладала и максимальной аллокацией углерода в подземную

биомассу. Кроме того, сосна, самая засухоустойчивая порода среди хвойных, имела низкие значения подземной аллокации углерода. Таким образом, хвойные породы не поддерживают гипотезу о связи засухоустойчивости с подземной аллокацией углерода. Поскольку в лесных экосистемах большая часть поступившего в корни углерода поступает в микоризу, можно предполагать, что различия между породами в разном отклике на засуху определяются неодинаковой ролью микоризы в водном питании растений. Предполагаем, что у лиственных пород данного эксперимента микориза служит, главным образом, для увеличения всасывания воды. Напротив, микоризу хвойных пород играет меньшую роль в водном питании и большую – в азотном. Итак, у растений, водное питание которых сильно зависит от микоризы, можно ожидать повышенное поступление углерода в почву во время засух.

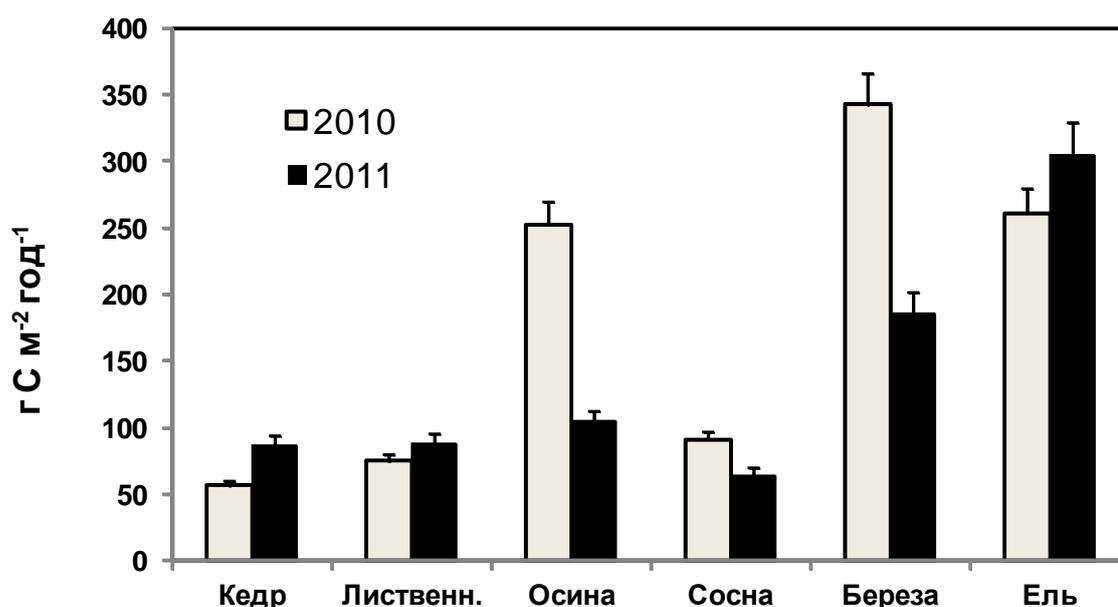


Рисунок 1 – Подземная аллокация углерода шестью древесными породами Сибирского эксперимента лесопосадок в сухом 2010 и влажном 2011 годах. Рассчитана по разнице между годовым потоком  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы и опадом.

## 2. Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ (14-04-01865).

## Литература

- Frank D., Reichstein M., Bahn M. et al., (2015) Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts. *Global Change Biology*, DOI: 10.1111/gcb.12916
- Davreux, T., Godbold, D.L. and Walmsley, J.D. (2011) Climate change and tree species migration. *Quarterly Journal of Forestry* 105: 141-147.
- Doughty, C.E., Metcalfe, D.B., Girardin, C.A.J., et al., (2015) Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia. *Nature*, 519: 78-82.
- Hasibeder R., Fuchslueger L., Richter, A., Bahn M. (2015) Summer drought alters carbon allocation to roots and root respiration in mountain grassland. *New Phytologist* 205: 1117–1127.

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭМИССИИ CO<sub>2</sub> С ПОВЕРХНОСТИ СФАГНУМА В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОИЗРАСТАНИЯ

Молчанов А.Г.

*Институт лесоведения Российской академии наук. Успенское, Московская обл. Россия.  
[a.georgievich@gmail.com](mailto:a.georgievich@gmail.com)*

**Аннотация:** Изучался газообмен CO<sub>2</sub> сфагнома на двух примыкающих участках неосушенного верхового болота (в сосняке кустарничково-сфагновом и в кустарничково-сфагновом с редкой сосной биогеоценозе) в зависимости от солнечной радиации, влажности и температуры почвы, температуры воздуха. Исследования проводились во второй части вегетационного периода при уровне болотных вод ниже 30 см. Выявлена ведущая роль влажности почвы как фактора, влияющего на газообмен сфагнома, затем следует температура почвы и воздуха. Влияние солнечной радиации на эмиссию CO<sub>2</sub> в рассматриваемых условиях было наименьшим. Из-за меньшей влажности почвы эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности сфагнома в сосняке была меньше, чем на открытом участке болота.

Торфяные болота занимают более 8% территории России, а с учетом мелкоотторфованных земель заболоченность страны превышает 20%. При этом, значительная часть болот в таежной зоне представлена верховыми болотами, где доминируют кустарничково-сфагновые биогеоценозы, включая в той или иной степени облесенные (Вомперский и др., 2005, 2011).

Исследований, посвященных эмиссии CO<sub>2</sub> в поверхности болот и ее связи с экологическими факторами, явно недостаточно. Проведенные ранее исследования газообмена CO<sub>2</sub> с поверхности сфагнома в зависимости от уровня грунтовых вод (Молчанов, 2013; Молчанов, Татаринев, 2013) показали, что при уровне грунтовых вод ниже 30 см в заболоченном пушицево-сфагновом сосняке наблюдается только эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности сфагнома. В настоящем исследовании будет рассмотрена зависимость эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности естественно растущего сфагнома вместе с почвой при уровне грунтовых вод ниже 30 см от влажности верхнего слоя почвы, температуры почвы и воздуха и солнечной радиации.

Изучение газообмена CO<sub>2</sub> с поверхности напочвенного покрова проводилось на двух примыкающих участках неосушенного верхового болота в Талдомском районе Московской области: в сосняке кустарничково-сфагновом – т.н. «облесенное кольцо», имеющего сомкнутый полог с пропусканием солнечной радиации 12%, и в кустарничково-сфагновом с редкой сосной биогеоценозе.

Измерение эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности сфагнома проводили одновременно в обоих фитоценозах по открытой схеме по методу Edwards и Sollins (1973) с помощью инфракрасного газоанализатора “LICOR- 820” и “LICOR- 840” (Li-Cor, США). Показания газоанализатора регистрировались логгерами (EMS, Чехия) каждые 10 секунд одновременно с приходящей к поверхности солнечной радиацией (Вт/м<sup>2</sup>), температурой воздуха и почвы (°C). Определение влажности почвы (%) проводилось термовесовым методом. Регистрация значений газообмена CO<sub>2</sub> и экологических параметров проводилась непрерывно с помощью оригинального, изготовленного для записи данных по газообмену растений, автоматического устройства, управляемого логгером. Время опроса камер составляло 20 мин. Газообмен CO<sub>2</sub> с поверхности сфагнома неоднократно во второй половине вегетационного периода 2014 г. при уровне болотных вод, находившегося ниже 30 см: 22-23.07, 07-08.08, 03-04.09 и 03-04.10.

В сомкнутом кустарничково-сфагновом сосняке эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности сфагнома ( $E$ ) в зависимости от температуры воздуха ( $T_a$ ), влажности почвы ( $T_s$ ) и солнечной радиации ( $Q$ ) выразилась уравнением:

$$E=0,000179*T^3-5,7E-6*Hs^2-0,0125*Q+8,15353, n=99, R^2=0,76 \quad (1)$$

Для сосново-кустарничково-сфагнового участка эмиссия  $\text{CO}_2$  с поверхности сфагноума в зависимости от температуры воздуха, солнечной радиации и влажности почвы выразилась уравнением:

$$E=0,011557*T^2-0,00671*Q+0,0014*Hs+1,3397, n=59, R^2=0,89 \quad (2)$$

Измерения на обоих участках проводились параллельно, в одно и то же время. Однако, экологические параметры (солнечная радиация, влажность почвы и др.) для них отличались. Поэтому было решено рассчитать зависимость эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности сфагноума от экологических факторов совместно для обоих участков.

Корреляционный анализ показал значимую корреляцию эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности сфагноума ( $E$ , мкмоль  $\text{CO}_2/\text{м}^2\text{с}$ ) с влажностью почвы, температурой воздуха и почвы, и с солнечной радиацией (-0,71, 0,51, 0,48 и -0,15, соответственно). Это показало, что наиболее значимым фактором является влажность почвы, далее следует температура почвы и воздуха, а солнечная радиация оказывал наименьшее влияние. Уравнение зависимости эмиссии для обоих участков от этих факторов получилось следующим:

$$E=0,0147*Ts^2-1,2E-07*Hs^3-0,00259*Q-0,10299*Ta+9,629, n=184, R^2=0,77 \quad (3)$$

Дисперсионный анализ показал значимую зависимость эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности сфагноума от всех принятых во внимание переменных: влажности почвы ( $Hs$ ), температуры почвы ( $Ts$ ) воздуха ( $Ta$ ) и солнечной радиации ( $Q$ ). Наиболее важной характеристикой оказалась влажность почвы: критерий Фишера  $F$  для нее составил 1160, а для остальных показателей соответственно 121, 82; 63 ( $F$  критическое 3,87). Влажность почвы показала самое высокое значение, затем температура почвы и воздуха и менее всего при таком уровне поверхностных грунтовых вод влияла солнечная радиация. Предшествующие измерения в сосняке пушицево-сфагновом в Ярославской обл. также показали, что солнечная радиация практически не влияла на газообмен с поверхности сфагноума при низком уровне болотных вод (Молчанов, 2013; Молчанов, Татаринцов, 2013).

Проведенные исследования показали, что в условиях южной тайги на контрастных по дренированию и облесению участках верховых болот зависимость газообмена  $\text{CO}_2$  с поверхности естественно растущего сфагноума в условиях, когда уровень болотных вод находится ниже 30 см в наибольшей степени определяется влажностью верхнего слоя почвы. Меньшее влияние оказывает температура почвы и воздуха, а изменение солнечной радиации в приповерхностном слое на эмиссию  $\text{CO}_2$  практически не сказывается.

При низком положении уровня болотных вод снижение влажности верхнего слоя почвы приводит к увеличению эмиссию  $\text{CO}_2$  с поверхности естественно растущего сфагноума. Заметно уменьшается влияние изменения температуры воздуха и, практически полностью, солнечной радиации. Приход последней к поверхности сфагнового покрова зависит от наличия и сомкнутости древесного полога, т.е. облесенности болотных биогеоценозов. Однако, несмотря на это, эмиссии  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы на облесенном участке выше, возможно из-за дыхания корней сосны.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов РФФИ № 14-04-01568-а и 14-05-00797-а и Проекта «Восстановление торфяных болот в России в целях предотвращения пожаров и смягчения изменений климата», финансируемого в рамках Международной климатической инициативы Федеральным министерством окружающей среды, охраны природы, строительства и безопасности ядерных реакторов Федеративной Республики Германия и управляемого через немецкий банк развития KfW (проект № 11 III 040 RUS K Восстановление торфяных болот).

## Литература

- Вомперский С.Э., Сиринов А.А., Цыганова О.П. и др. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // Изв. РАН. Сер. геогр. 2005. № 5. С. 21–33.  
Вомперский С.Э., Сиринов А.А., Сальников А.А. и др. Облесенность болот и заболоченных земель России // Лесоведение. 2011. №5. С. 3-11.

- Минаева Т.Ю., Сирин А.А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Успехи современной биологии. 2011.Т. 131. № 4. С. 393-406.
- Молчанов А.Г. Зависимость газообмена заболоченного пушицево-сфагнового сосняк от уровня почвенно-грунтовых вод // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: Мат-лы Четвертого Межд. полевого симпозиума (Новосибирск, 4-17 августа 2014). Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2014. С. 204-206.
- Молчанов А.Г., Татарин Ф.А. Простая модель оценки влияния уровня грунтовых вод на газообмен сфагнома // Математическое моделирование в экологии. Пущино, ИФХ и БПП РАН, 2013. С.174-176. Edwards N.T., Sollins P. Continuous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest floor components // Ecology. 1973. V. 54. № 2. P. 406–412.

## ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И РЕЛЬЕФА НА ПЕРЕНОС CO<sub>2</sub> И МАЛЫХ ГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Мухартова Ю.В.<sup>1</sup>, Ольчев А.В.<sup>2</sup>, Рыжова М.С.<sup>3</sup>, Левашова Н.Т.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия  
[muhartova@yandex.ru](mailto:muhartova@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской Академии Наук, Москва, Россия  
[aoltche@yandex.ru](mailto:aoltche@yandex.ru)

<sup>3</sup>Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия  
[maria.msu.ff@gmail.com](mailto:maria.msu.ff@gmail.com)

<sup>4</sup>Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия  
[natasha@npanalytica.ru](mailto:natasha@npanalytica.ru)

**Аннотация:** Основная цель данной работы – описать влияние пространственной неоднородности растительности и рельефа на турбулентные потоки парниковых газов и газовых примесей (в частности, CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub>) между земной поверхностью и атмосферой на основе двумерной модели, использующей полуторное замыкание усредненной системы уравнений гидродинамики.

Двумерная математическая модель была использована для решения двух задач по оценке влияния неоднородной растительности на процессы переноса CO<sub>2</sub> и малых газовых компонент в приземном слое воздуха. В первом случае было рассмотрено влияние рельефа и растительности на перенос CO<sub>2</sub> между неоднородной земной поверхностью и атмосферой, а во втором случае рассмотрено влияние лесополосы на горизонтальный перенос пассивной газовой примеси (SO<sub>2</sub>) от источников загрязнения.

В модели рассматривается двумерная область  $x_1 \in [-L, L]$ ,  $x_2 \in [z_0, H]$ , где  $x_1$  – горизонтальная координата,  $x_2$  – вертикальная координата. Компоненты усредненной скорости  $\vec{V} = \{V_1, V_2\}$  удовлетворяют уравнениям Навье-Стокса и неразрывности:

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_i} \delta P - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \delta_{ij} E - K \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \right) - c_d \cdot LAD \cdot |\vec{V}| \cdot V_i, \quad \frac{\partial V_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – плотность воздуха,  $\delta P$  – отклонение давления от гидростатического,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $E$  – турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ),  $K = C_\mu E^2 \varepsilon^{-1}$  – коэффициент турбулентности,  $C_\mu$  – коэффициент пропорциональности,  $\varepsilon$  – скорость диссипации ТКЭ,  $c_d$  – коэффициент сопротивления растительности,  $LAD$  – плотность фитомассы. Функции  $E$  и  $\varphi = \varepsilon E^{-1}$  удовлетворяют системе уравнений:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + V_j \frac{\partial E}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{K}{\sigma_E} \frac{\partial E}{\partial x_i} \right) + P_E - \varepsilon, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial t} + V_j \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{K}{\sigma_\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) + \frac{\varphi}{E} (C_\varphi^1 P_E - C_\varphi^2 \varepsilon) - \Delta_\varphi, \quad (2)$$

где  $\sigma_E$  и  $\sigma_\varphi$  – числа Прандтля,  $P_E$  – сдвиговая генерация ТКЭ,  $C_\varphi^1$  и  $C_\varphi^2$  – модельные константы,  $\Delta_\varphi$  описывает увеличение диссипации ТКЭ за счет взаимодействия с растительностью. Концентрация  $C$  переносимого вещества удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{K}{Sc} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + F_C, \quad (3)$$

где  $Sc$  – число Шмидта,  $F_C$  описывает источники и стоки переносимого вещества в растительности и почве.

Схематическое представление рельефа и растительности рассматриваемой в первой задаче области приведено на рисунке 1. На рисунке 2 представлены вертикальные турбулентные потоки  $CO_2$  на трех высотах при наличии и отсутствии лесных массивов.

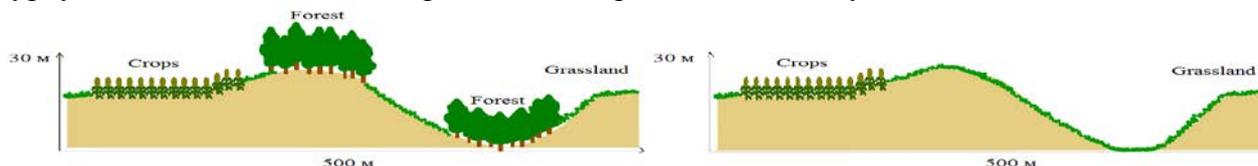


Рисунок 1. Рельеф местности и структура растительности

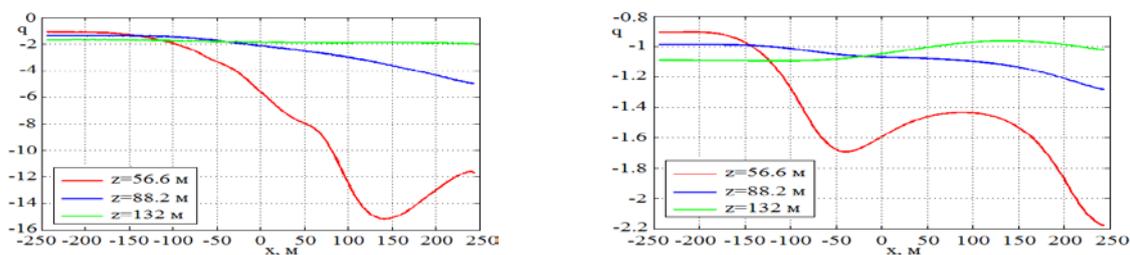


Рисунок 2. Вертикальные турбулентные потоки  $CO_2$ :  $q_z = -\frac{K}{Sc} \frac{\partial C}{\partial z}$ , мкмоль  $m^{-2}c^{-1}$

На рисунке 3 представлены результаты моделирования горизонтального потока  $SO_2$  от автомобильной дороги, расположенной перпендикулярно плоскости рисунка на расстоянии 10 м от лесополосы:  $W(z) = UC - \frac{K}{Sc} \frac{\partial C}{\partial x}$ . Скорость осаждения  $SO_2$  принята равной  $1 \text{ cm s}^{-1}$ .

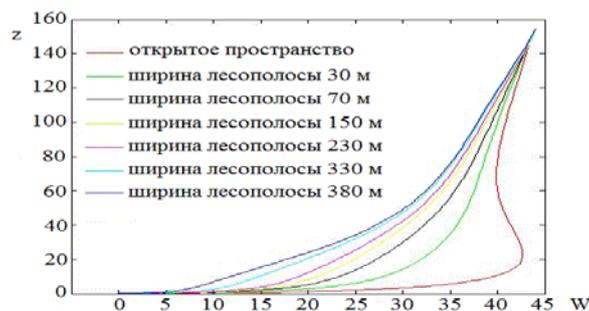


Рисунок 3. Горизонтальные потоки  $SO_2$  ( $\text{мкг м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) за лесополосой на расстоянии 510 м от источника при условии, что ветер дует слева направо

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-04-01568-а и 13-01-00200-а).

## Литература

- Ball J.T., Woodrow I.E., Berry J.A. //Progressin Photosynthesis Research. -1987. -IV (ed. I. Biggins). -p. 221.  
 Erisman J.W., Baldocchi D. Modelling dry deposition of  $SO_2$ // Tellus. -1994.- Vol. 46B. –pp.159-171.  
 Leuning R. // Plant, Cell and Environment. -1995. –Vol. 18. -p. 339.  
 Monsi M, Saeki T. //Japanese Journal of Botany. -1953. –Vol. 14. - p. 22.  
 Мухартова Ю.В., Левашова Н.Т., Ольчев А.В., Шапкина Н.Е. //ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. -2015. -№1. -с. 15-22  
 Oltchev A., Constantin J., Gravenhorst G., Ibrom A. // J. Of Hydrology and Hydromechanics. -1997.–Vol. 45(1-2). -p. 5  
 Sogachev A., Panferov O. // Boundary-Layer Meteorol. - 2006. - Vol. 121. - Issue 2. - p. 229.

## **ПРОБЛЕМА НОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ АЗОТА ЛЕСНЫХ ПОЧВ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ: ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ – ПОДЗОЛЫ НА КВАРЦЕВЫХ ПЕСКАХ**

Надпорожская М.А.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*  
[marinta@mail.ru](mailto:marinta@mail.ru)

**Аннотация:** В работе обсуждены перспективы развития математической модели ROMUL. Предположено, что в лесных подстилках аккумуляция азота в составе гумусовых веществ может быть обусловлена зольным составом опада, наличием реакционноспособных соединений железа и алюминия, образующих железо-алюмо-гумусовые комплексы, способствующих их сосаждению и адсорбции в ферментативном и гумусированном слоях. Данное явление требует количественной оценки для отражения в математической модели.

Теоретической основой модели ROMUL (Chertov et. al, 2001, Комаров и др., 2007; Чертов и др., 2007) является положение о формировании и функционировании комплексов частично разложенных растительных остатков с гумусовыми веществами (КГВ). Предположено, что именно вследствие формирования КГВ происходит замедление скорости разложения свежего опада. Этот процесс локализован в ферментативном и гумифицированном слоях лесных подстилок. Ведущим фактором, регулирующим скорость минерализации и гумификации органического вещества почв, является смена организмов-деструкторов в соответствии с концепцией типов гумуса лесных почв. Основные коэффициенты модели определены по модельным лабораторным опытам, проведенным в контролируемых по температуре и влажности условиях. Влияние изменений температуры и влажности на динамику органического вещества рассчитано по независимым натурным экспериментам. Это условие делает модель универсальной и применимой для различных природных, сельскохозяйственных и нарушенных экосистем. Тестирование первой версии модели ROMUL по результатам независимых модельных опытов (Надпорожская, 2000) показало, что средняя ошибка расчетных данных по минерализации органического вещества составляла  $5,8 \pm 3,4\%$ , а для азота  $37,9 \pm 35,0\%$ . В дальнейшем вопросы оценки динамики азота в модели постоянно разрабатывались, но и до сих пор некоторые аспекты остаются нерешенными.

Азот поступает с опадом преимущественно в белковой форме, в почве может относительно накапливаться в КГВ и гумусе. Зольность опада в модели учтена, но это не чувствительный параметр. Между тем, по литературным данным (для почв разного гранулометрического состава) и в полевых исследованиях для песчаных почв (Надпорожская и др., 2013, 2014; Шаяхметова и др., 2014) обнаружено отсутствие относительной аккумуляции азота по стадиям разложения опада в подгоризонтах лесных подстилок. Наиболее ярко в наших исследованиях олиготрофный статус лесных подстилок выражен в подзолах сосновых лесов на кварцевых песках. Эти почвы предлагала выделить в отдельную классификационную группу по признакам, выраженным в минеральной части профиля, еще И.В. Забоева (1975). Мы обнаружили дополнительные аргументы, подтверждающие особый статус подзолов на кварцевых песках. В генетическом почвоведении лесная подстилка рассматривается только как источник органических кислот для минеральной части профиля почв, а процессы, происходящие в самой подстилке не принимаются во внимание. Зависимость качества зольного состава лесных подстилок от химического состава почвообразующих пород известна, но до сих пор не были исследованы взаимодействия между растворимыми органическими и минеральными компонентами в самих органогенных горизонтах. По классической концепции в процессе гумификации растительных остатков должно происходить относительное накопление азота. Нами в ходе изучения подбуров и

подзолов лесов Ленинградской области было достоверно установлено, что для подзолов на кварцевых песках ( $\text{SiO}_2$  96,0%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0,4%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1,7%,  $\text{CaO}$  0,1%,  $\text{MgO}$  следы) накопление азота по подгоризонтам лесной подстилки, как стадиям трансформации опада, не выражено. Сходные данные для подзолов на кварцевых песках получены в Нидерландах (Nierop, 1999), но не были обсуждены. Полагаем, что влияние литогенного фактора на лесные подстилки является опосредованным. Чем меньше полуторных оксидов в почвообразующей породе, тем меньше их в зольном составе опада и органогенных горизонтов. Дефицит соединений алюминия и железа задерживает проявление процессов адсорбции и соосаждения новообразованных гумусовых веществ на материале лесной подстилки, вследствие этого не происходит относительного накопления азота. Т.е. аккумуляция гумусовых веществ и азота в их составе в почвах на кварцевых песках менее выражена не только в иллювиальных горизонтах (Тонконогов, 1977), но и в органогенных. Роль соединений железа и алюминия в стабилизации азота в органогенных горизонтах еще требует изучения. Полагаем, что найденное нами явление имеет значимое отличие на процессном уровне, и почвы сосновых лесов на кварцевых песках можно выделить как особый вид – подзолы грубогумусные олиготрофные. Следовательно, нужны поиски возможности параметризации закрепления азота в гумусовых веществах при взаимодействии с полуторными оксидами в лесных подстилках и иллювиальных горизонтах почв хвойных лесов. Эта работа должна объединить почвоведов-практиков и экологов-модельеров.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ № 15-04-08707-а.*

## Литература

- Забоева И.В. Почвы и земельные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар: Коми книжное издательство. 1975. 344 с.
- Комаров А.С., Чертов О.Г., Михайлов А.В., Быховец С.С., Зудин С.Л., Надпорожская М.А. и Зубкова Е.В. Абакумов Е.В. и др. / Отв. ред. В.Н. Кудеяров. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. 2007. М.: Наука. 480 с.
- Надпорожская М.А. Моделирование трансформации органического вещества растительных остатков в почве // а/р дисс. на соиск. уч. степени кандидата сельскохозяйственных наук / Санкт-Петербург, 2000. 22 с.
- Надпорожская М.А., Львова Л.Б., Ковш Н.В., Федорос Е.И., Чертов О.Г. Влияние литогенного фактора на трансформацию соединений азота лесных почв // Сборник материалов V Всероссийской научной конференции по лесному почвоведению с международным участием / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук. — Пущино: ИФХиБПП РАН, 2013. 203 с. / С. 88-90.
- Надпорожская М.А., Львова Л.Б., Федорос Е.И., Ковш Н.В., Лысков И.А. Влияние литогенного фактора на трансформацию опада в почвах сосновых лесов на песках разного минералогического состава. // XIX Всероссийская Школа «Экология и почвы» на тему «Почвоведение и смежные науки: методы и подходы; результаты и проблемы взаимодействия по вопросам экологии». 14-16 октября 2014 г. г. Пущино, Московской обл. С. 27-28
- Тонконогов В.Д. Подзолы на кварцевых песках Русской равнины, генезис и пути их использования в народном хозяйстве // Почвы Нечерноземья и перспективы их сельскохозяйственного освоения. Научн. Труды почв. ин-та им В.В. Докучаева. М. 1977. С 45-86.
- Чертов О.Г., Комаров А.С., Надпорожская М.А., Быховец С.С., Зудин С.Л., Зудина Е.В., Михайлов А.В., Зубкова Е.В. ROMUL – имитационная модель динамики органического вещества лесных почв. Учебно-методическое пособие. СПб: изд. СПбГУ. 2007 г. 96 с.
- Шаяхметова А.Ф., Надпорожская М.А., Ковш Н.В. Трансформация соединений азота в почвах сосновых лесов // Материалы IX Межд. Экологической школы-конференции в усадьбе «Сергиевка». СПб.: Изд-во ВВМ, 2014. С. 290-294
- Chertov O.G. Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.A., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modelling // Ecological Modelling. - 2001. – Vol. 138 (1-3). – P. 289-308
- Nierop, K. Origin and fate of organic matter in sandy soils along primary vegetation succession. Veenedaal: Universal Press – Science Publishers. 1999. 160 p.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЛОКАЛЬНОЙ ОДНОРОДНОЙ ПОПУЛЯЦИИ С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

Неверова Г.П.<sup>1</sup>, Фрисман Е.Я.<sup>2</sup>

*Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия*

<sup>1</sup>[galina.nev@gmail.com](mailto:galina.nev@gmail.com)

<sup>2</sup>[frisman@mail.ru](mailto:frisman@mail.ru)

**Аннотация:** Исследуется модель динамики численности лимитированной однородной популяции. Предполагается, что ресурсы необходимые для жизнедеятельности популяции восстанавливаются с запаздыванием. Проведено аналитическое и численное исследование модели. Сделаны выводы о совокупном влиянии процессов саморегуляции и скорости восстановления ресурсов на режимы динамики численности популяции.

### 1. Уравнения динамики

Модель Рикера с запаздыванием является достаточно популярным объектом исследований в работах по математической экологии (Turchin, 1990; Шлюфман, Фишман, Фрисман, 2013; и др.). Однако, не смотря на это, многообразие динамических режимов, возникающих в данной модели, до сих пор мало изучено. Уравнение имеет вид:

$$x_{n+1} = ax_n \exp(-b_0 x_n - b_1 x_{n-1}), \quad (1)$$

где  $x$  – численность популяции,  $n$  – номер периода размножения,  $a$  – репродуктивный потенциал в условиях неограниченности ресурсов популяции. Параметр  $b_0$  характеризует воздействие плотностно-зависимых факторов на популяцию, когда при большой плотности запускаются процессы саморегуляции, приводящие к снижению рождаемости. Параметр  $b_1$  – косвенная величина, характеризующая скорость восстановления кормовой базы.

Несложная замена переменных  $y_n = x_{n-1}$  и переход к новой системе координат  $b_0 x_n \rightarrow x_n$ ,  $b_0 y_n \rightarrow y_n$  позволяют свести модель (1) к виду:

$$\begin{cases} x_{n+1} = ax_n \exp(-x_n - \rho \cdot y_n), \\ y_{n+1} = x_n \end{cases}, \text{ где } \rho = b_1 / b_0. \quad (2)$$

Здесь параметр  $\rho$  характеризует интенсивность влияния плотностных факторов на воспроизводство популяции. При  $\rho = 0$  уравнения (2) сводятся к классической модели Рикера. Следовательно, это позволяет сравнить динамические режимы классической модели Рикера с их модификациями в системе (2), вследствие роста значений коэффициента  $\rho$ .

### 2. Результаты исследования

Проведено подробное аналитическое и численное исследование предложенной модели. Показано, что для любых значений  $\rho$  при  $a < 1$ , система (2), также как и классическая модель Рикера, демонстрирует вырождение популяции. При  $\rho < 1/3$  потеря устойчивости реализуется по сценарию Фейгенбаума, при  $\rho > 1/3$  по сценарию Неймарка-Сакера, при  $\rho = 1/3$  наблюдается простейшая бифуркация коразмерности два: резонанс 1:2.

Для анализа возможных динамических режимов модели (2) были построены карты динамических режимов (рисунок 1). Карты получены следующим образом: в каждой точке плоскости параметров  $(\rho, a)$  численно определялся период цикла отображения (2) и эта точка окрашивалась в определенный цвет в соответствии с полученным периодом.

В рамках данной модели одновременно сосуществует несколько динамических режимов, т.е. наблюдается мультирежимность (Фрисман, Неверова, Кулаков, Жигальский, 2015). Следовательно, при одних и тех же значениях демографических параметров в зависимости от выбора начального приближения может реализовываться либо устойчивая

динамика, либо трехгодичные колебания (рисунок 1 а). Цикл длины 3 рождается в результате касательной бифуркации. Известный факт, что в классической модели Рикера цикл длины 3 возникает в зоне хаотической динамики, на рисунках 1 б и в видно, что к оси ординат, подходит зона зеленого цвета, соответствующая циклу длины 3. При этом рост значений параметра  $\rho$  приводит к тому, что трехгодичные колебания возникают при все более и более низких значениях репродуктивного потенциала. Кроме этого, сравнение рисунков 1 б и в позволяет заключить, что в области нерегулярной динамики в зависимости от выбора начального условия могут проявляться как хаотические, так и трехгодичные колебания, либо двухгодичные и трехгодичные. Увеличение значений параметра  $\rho$  приводит к одновременному сосуществованию стационарного состояния с циклом длины 3 и его последующими бифуркациями. С дальнейшим ростом параметра  $\rho$  смена динамического режима может произойти только в области квазипериодической динамики. Более того, возможно одновременное сосуществование трех динамических режимов, а именно устойчивого равновесия и циклов длины 3 и 4. В рамках данной модели существует два разных цикла длины 4, один возникает в результате бифуркации цикла длины 2 по сценарию Фейгенбаума, а другой в результате касательной бифуркации.

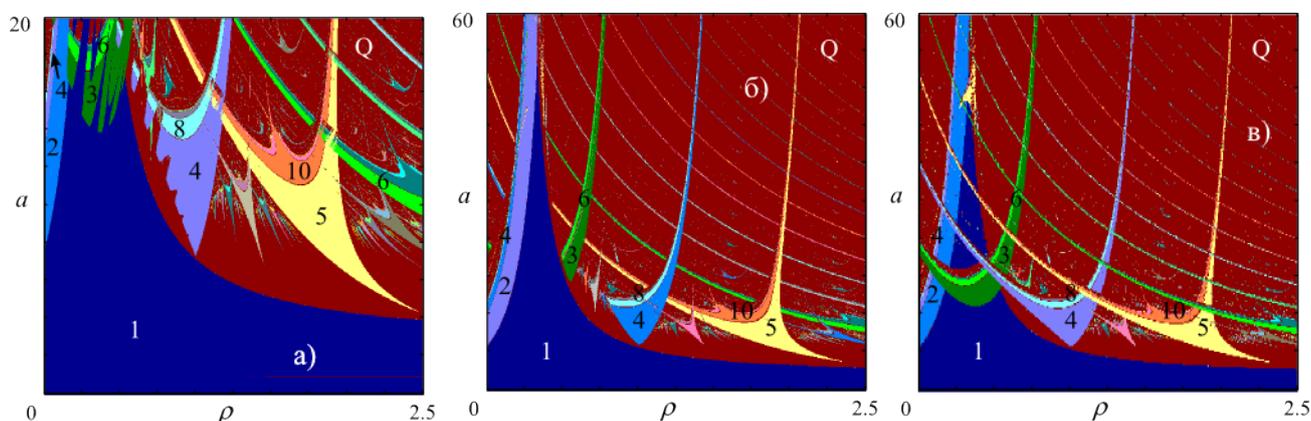


Рисунок 1 - Карты динамических режимов а) при начальном приближении  $x_0 = y_0 = 10$ , б) при начальном приближении, принадлежащем бассейну притяжения устойчивого равновесия; в) при начальном приближении, принадлежащем бассейну притяжения цикла длины 3. Цифры соответствуют длинам наблюдаемых циклов.

Таким образом, чем сильнее динамика численности популяции зависит от состояния экологической ниши местообитания в прошлом году, тем прозаичнее становится ее поведение. Область устойчивости сужается, и рост репродуктивного потенциала ведет к квазипериодическим колебаниям. Однако возможны и периодические колебания, вследствие возникновения языков Арнольда, опирающихся своими основаниями на линию бифуркации Неймарка-Сакера.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-29-02658 офи\_м.

## Литература

- Turchin P. Rarity of density dependence or population regulation with lags? // Nature, 1990. - Vol. 344. - P.660-663.  
Шлюфман К.В., Фишман Б.Е., Фрисман Е.Я. Интервально-периодическая динамика рекуррентных уравнений // Информатика и системы управления, 2013. - №3(37). - С. 66-74.  
Nedorezov L.V., Sadykova D.L. Dynamics of larch bud moth populations: application of Moran - Ricker models with time lag // Ecological Modelling, 2015. - Vol. 297. - P. 26-32.  
Фрисман Е.Я., Неверова Г.П., Кулаков М.П., Жигальский О.А. Явление мультирежимности в популяционной динамике животных с коротким жизненным циклом // Доклады Академии Наук, 2015. - Т.460.- № 4. - С. 488-493.

## ОЦЕНКА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ МАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ СУКЦЕССИИ

Немчинова А.В.

*Костромской государственный университет им. Н.А. Некрасова, Кострома, Россия*  
[nemanvic@rambler.ru](mailto:nemanvic@rambler.ru)

**Аннотация:** Приводится метод моделирования хода сукцессии лесных экосистем с помощью построения марковской цепи. За переходные стадии приняты варианты сформированности вертикальной структуры сообществ и их насыщенности поздне-сукцессионными видами деревьев. Длительность ходов сукцессии определяется по средним числам шагов до попадания в климакс. Оценивается степень структурной деградации и (или) восстановленности экосистем любой размерности и абсолютного возраста с применением показателя восстановительного потенциала.

Восстановление нарушенных лесных экосистем на разных участках может быть неодновременным и разнонаправленным (Смирнова, Торопова, 2008), поэтому ход сукцессии описывается прогностической моделью. Предлагаемый метод нацелен на оценку восстановления пространственной структуры лесных сообществ до исходного состояния – климаксового сообщества – через построение модели в виде дискретной марковской цепи. Ориентированный граф концептуальной модели (Логофет, 2010) состоит из 32 вершин, отождествляемых с возможными стадиями, которые связаны логикой взаимопереходов из подъяруса в верхний подъярус растущих деревьев, прежде всего ключевого таежного вида – ели, чем задается шаг марковской цепи. Вероятности случайных переходов по стадиям за 1 шаг по времени отражаются в матрице переходных вероятностей, откалиброванной по данным встречаемости сообществ в каждом из 32 состояний на изучаемой территории. Правдоподобие альтернативных переходов принимаем пропорциональным частоте встречаемости стадий сообществ, в которые совершается переход, на полигоне исследования. Относительные длительности сукцессионных ходов установлены по средним числам шагов до попадания в климакс как элементам фундаментальной матрицы марковской цепи (Логофет, 2010). Соотнесенные с максимальной величиной, они прогнозируют не только относительное время достижения климакса, но и характеризуют текущее состояние экосистемы – «зрелость» сообществ. Отмечается, что длительности сукцессионных ходов, полученные таким образом, в среднем в 2-3 раза короче длительностей, рассчитанных при допущении их равновероятности, что показывает уровень стохастической детерминированности хода сукцессии. Выявлены стадии вертикальной структуры одинаково часто встречаемые на двух альтернативных по степени антропогенной нарушенности, но сходных по ландшафтным условиям, участках, а также одни и те же стадии с наибольшим числом шагов до климакса. Значения времен достижения климакса включены в состав комплексного показателя – *восстановительного потенциала* сукцессивных экосистем для оценки степени структурной восстановленности лесных экосистем любой размерности и абсолютного возраста. Распределение лесов по 3 категориям показателя в границах изучаемой территории показано на карте, составленной методом эталонной классификации космического снимка, что дает инструмент оценки лесных участков в единой шкале для дальнейших разработок дифференцированного подбора сценариев лесопользования.

### Литература

1. Логофет Д.О. Марковские цепи как модели сукцессии: новые перспективы классической парадигмы // Лесоведение, № 2, 2010. - С. 46–59.
2. Смирнова О.В., Торопова Н.А. Сукцессия и климакс как экосистемный процесс // Успехи современной биологии, т. 128, №2, 2008. - С.129-144.

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ЮГО-ЗАПАДЕ ВАЛДАЙСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Овсянников Т.А.<sup>1</sup>, Газарян В.А.<sup>1,2</sup>, Курбатова Ю.А.<sup>3</sup>, Шапкина Н.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
[tim-ovs@yandex.ru](mailto:tim-ovs@yandex.ru)

<sup>2</sup>Финансовый университет при правительстве РФ, Москва, Россия  
[varvaragazaryan@yandex.ru](mailto:varvaragazaryan@yandex.ru)

<sup>3</sup>Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия  
[kurbatova.j@gmail.com](mailto:kurbatova.j@gmail.com)

**Аннотация:** В работе исследуется динамика среднесуточных показателей температуры воздуха и количества осадков с 1971 по 2000 гг. в Центрально-Лесном природном заповеднике (Тверская обл.). С помощью методов сезонной декомпозиции, регрессионного и Фурье-анализа дана оценка трендов температуры воздуха и осадков, выявлены 3-х и 8-летние циклы в ряду динамики температуры воздуха и 11- летние - в ряду осадков.

Оценка временной изменчивости гидрометеорологических параметров атмосферы на локальном уровне в настоящее время остаётся актуальной задачей современных экологических и климатических исследований. Анализ климатических изменений, как правило, основывается на данных долгосрочных наблюдений (не менее 20 лет) (Дещеревская, 2013). Для оценки современных тенденций в изменении температурно-влажностного режима атмосферы на юго-западе Валдайской возвышенности были привлечены данные метеорологической станции, расположенной на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника за период с 1971 по 2000 годы.

Исследование временных рядов температуры и осадков проведено с помощью метода декомпозиции. В качестве ряда динамики показателя рассматривается упорядоченная по времени последовательность наблюдений  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , где  $X_t$  – значение соответствующего показателя в момент времени  $t = 1, \dots, N$ . Используем аддитивную модель временного ряда:

$$X_t = u_t + C_t + S_t + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $u_t$  – основная тенденция,  $C_t$  – циклическая компонента,  $S_t$  – сезонная компонента,  $\varepsilon_t$  – нерегулярная составляющая (Садовникова, 2001). С помощью метода простой скользящей средней с интервалом сглаживания  $L$  преобразуем исходный ряд  $X_t$  (1) в ряд скользящих средних  $\hat{X}(L)_t = \hat{u}(L)_t + \hat{C}(L)_t + \hat{S}(L)_t + \hat{\varepsilon}(L)_t$ , где  $\hat{u}(L)_t$ ,  $\hat{C}(L)_t$ ,  $\hat{S}(L)_t$ ,  $\hat{\varepsilon}(L)_t$  – ряды скользящих средних соответствующих составляющих ряда  $X_t$  (1),  $t = \frac{L+1}{2}, \dots, N - \frac{L+1}{2}$ .

Для определения основной тенденции построим линейную регрессионную модель  $u_t = \alpha_0 + \alpha_1 t + \gamma_t$ , где  $\gamma_t = -\hat{S}(L)_t - \hat{C}(L)_t - \hat{\varepsilon}(L)_t$ ,  $\hat{u}(L)_t = u_t$  (Longobardi, 2009). Для анализа значимости линейной регрессионной модели  $X_t$  (1) проверяется гипотеза  $H_0: \alpha_1 = 0$  при альтернативе  $H_1: \alpha_1 \neq 0$  на основании критерия Фишера (Боровков, 1984).

Временной ряд  $X_t$  может быть приближен частичной суммой ряда Фурье  $X_t \approx a_0 + \sum_{i=1}^I \left[ a_i \cos\left(\frac{2\pi t}{T_i}\right) + b_i \sin\left(\frac{2\pi t}{T_i}\right) \right]$ , где  $a_i$ ,  $b_i$  – коэффициенты Фурье,  $\omega_i = \frac{2\pi}{T_i}$  – соответствующие частоты,  $T_i$  – период  $i$ -ой гармоники,  $i = 1, \dots, I$ ,  $I$  – число гармоник. Задачей Фурье-анализа временного ряда  $X_t$  является установление цикличности в динамике температуры воздуха и осадков и выделение гармоник ряда Фурье, вносящих наибольший вклад (Садовникова, 2001).

Методом Фурье-анализа в ряду температуры воздуха  $X_t^T$  выявлены циклы с периодами 8 лет и 3 года (Masset, 2008). Результат применения метода скользящих средних с интервалом сглаживания  $L = 8K$ ,  $K = 365$  дней, показан на рисунке 1 (слева). В результате проверки гипотезы  $H_0: \alpha_1 = 0$  при альтернативе  $H_1: \alpha_1 \neq 0$  делается вывод о том, что линейная регрессионная модель ряда температуры  $u_t^T = \tilde{\alpha}_0^T + \tilde{\alpha}_1^T t$ , где  $\tilde{\alpha}_0^T$ ,  $\tilde{\alpha}_1^T$  – МНК-оценки соответствующих параметров регрессии, является значимой на уровне значимости 0,01. Значения  $u_t^T$  и  $t$  связаны сильной корреляционной связью, так как коэффициент линейной корреляции Пирсона  $r^T \in (0,882; 0,892)$  на уровне значимости 0,05.

Во временном ряду количества осадков  $X_t^P$  выделена цикличность с периодом 11 лет. Результат применения метода скользящих средних с интервалом сглаживания  $L = 11K$ ,  $K = 365$  дней, показан на рисунке 1 (справа). Соответствующая линейная регрессионная модель  $u_t^P = \tilde{\alpha}_0^P + \tilde{\alpha}_1^P t$  значима на уровне значимости 0,01,  $u_t^P$  и  $t$  также связаны сильной корреляционной связью:  $r^P \in (0,911; 0,921)$  на уровне значимости 0,05.

В результате применения Фурье-анализа выделены циклическая компонента  $C_t^T$  ряда температуры  $X_t^T - u_t^T$  и циклическая компонента  $C_t^P$  ряда осадков  $X_t^P - u_t^P$  (рисунок 2).

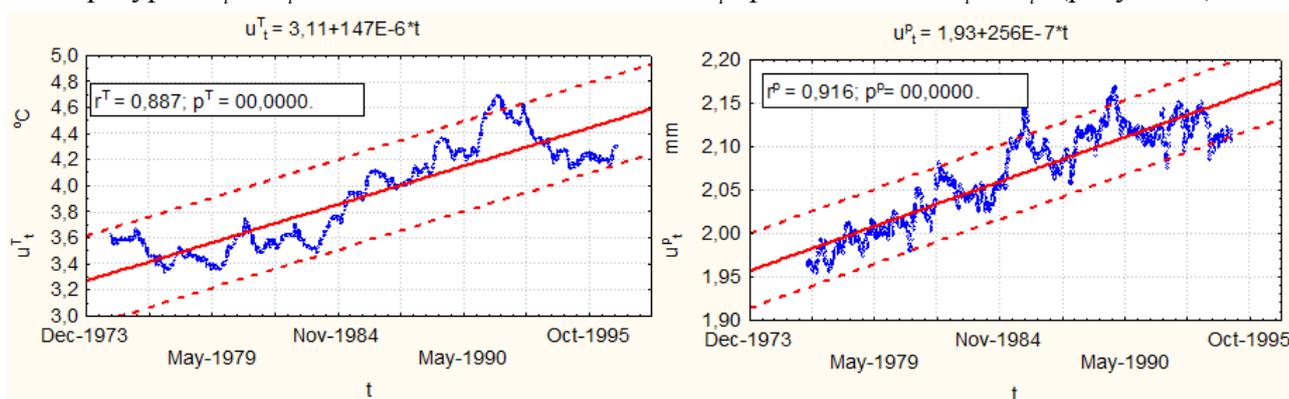


Рисунок 1 – Синим – графики скользящих средних временных рядов температуры  $\hat{X}^T(8K)_t$  (слева) и количества осадков  $\hat{X}^P(11K)_t$  (справа), красным – линейные регрессионные модели температуры воздуха  $u_t^T$  (слева) и количества осадков  $u_t^P$  (справа)

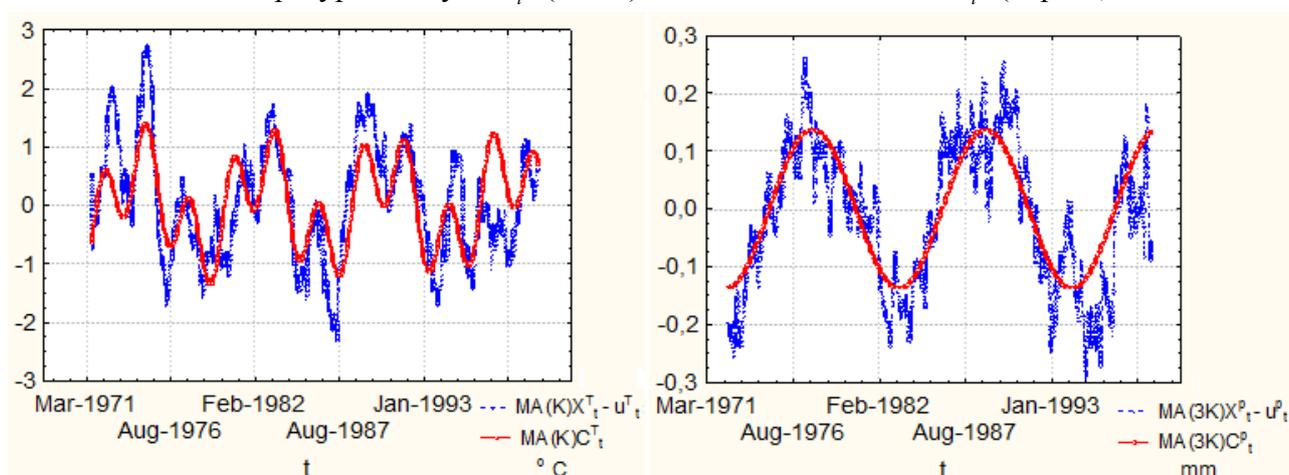


Рисунок 2 – Синим – временные ряды  $\hat{X}^T(K)_t - u_t^T$  (слева) и  $\hat{X}^P(3K)_t - u_t^P$  (справа), красным –  $\hat{C}^T(K)_t$  (слева) и  $\hat{C}^P(3K)_t$  (справа)

В результате проведённого исследования выявлено наличие тенденции к росту температуры воздуха и количества осадков за рассматриваемый период времени. Величина тренда приповерхностной температуры воздуха составляет  $0,54 \frac{^{\circ}\text{C}}{10\text{лет}}$ , осадков –  $0,09 \frac{\text{мм}}{10\text{лет}}$ . В ряду динамики температуры выявлены циклы 3 года и 8 лет, в ряду осадков обнаружен цикл с периодом 11 лет.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-07-00409, 14-05-797, 12-01-00479-а).

## Литература

- Боровков А.А. Математическая статистика. - М.: Наука, 1984. - 472 с.
- Дещеревская О.А. и другие. Современный климат национального парка Кат Тьен (Южный Вьетнам): использование климатических данных для экологических исследований. // Геофизические процессы и биосфера. - 2013. - Т.12. - №2. - С.5-33.
- Садовникова Н.А., Шмойлова Р.А. Анализ временных рядов и прогнозирование. - М.: МЭСИ, 2001. - 67 с.
- Antonia Longobardi and Paolo Villani. Trend analysis of annual and seasonal rainfall time series in the Mediterranean area. // International Journal of Climatology. - 2009. - DOI: 10.1002/joc.2001. - 9 с.
- Philippe Masset. Analysis of Financial Time-Series using Fourier and Wavelet Methods. // SSRN Electronic Journal. - 10/2008.- DOI: 10.2139/ssrn.1289420. - 36 с.

## ДИНАМИКА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ОСИНОВОГО ДРЕВОСТОЯ НА ПОСТОЯННОЙ ПРОБНОЙ ПЛОЩАДИ В ЧЕРНЕВОМ ПОЯСЕ ЗАПАДНОГО САЯНА

Овчинникова Н.Ф.<sup>1</sup>, Овчинников А.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН «Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН», Красноярск, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия  
[nf@ksc.krasn.ru](mailto:nf@ksc.krasn.ru)

**Аннотация:** С помощью статистического анализа выявлены и показаны особенности динамики горизонтальной структуры производного осинового древостоя по склону на постоянной пробной площади в черневом поясе Западного Саяна.

Структура древостоя в основном определяет всю ценотическую структуру лесного фитоценоза и влияет на интенсивность биогеоценотических процессов, эффективность продуцирования и депонирования органического вещества, устойчивость и биосферные функции древесных ценозов.

Динамику структуры осинового древостоя изучали на постоянной пробной площади (ППП), размером 30х40м. Все деревья, подрост и подлесок на ППП были закартированы, а особи высотой более 1,3 м и пронумерованы, что исключало ошибку их определения при периодических сплошных перечетах. У деревьев высотой 2,5 м измеряли высоту и диаметр ствола, размеры кроны, отмечали особенности онтогенеза. В Базе данных 2968 записей (Овчинникова, Овчинников, 2011). Средние древостоя – высоту и диаметр, площадь поперечного сечения и объем ствола. рассчитывали для каждого учета по общепринятым в лесной таксации методикам (Анучин, 1982).

Для описания горизонтальной структуры ППП была условно разбита на полосы: 10 шт. вдоль склона (с севера на юг) - шириной 4 м и 10 шт. поперек склона (с запада на восток) - шириной 3 м. В результате было выделено 100 прямоугольных элементарных участков с координатами по осям  $X0-X30$  и  $Y0-Y40$  и площадью 12 м<sup>2</sup> каждый. Определение количества деревьев и подроста на каждом участке, и представление данных в виде матрицы дало возможность получить их частные распределения по годам учетов.

Проведенный перед закладыванием ППП на вырубке анализ размещения пней, сохранившегося тонкомера и подроста предварительных генераций показал, что горизонтальная структура срубленного коренного древостоя характеризовалась относительно равномерным размещением по площади деревьев и подроста, отражая тем самым однородность экологических условий места изучения (Ермоленко, 1981). Нарушения напочвенного и почвенного покрова при рубке темнохвойного древостоя стимулировали появление корнеотпрысковой поросли у единичных деревьев осины. Через 26 лет после рубки на ППП сформировался высокополнотный древостой I бонитета с составом по густоте 53Ос36П9Б2К и по запасу – 93Ос12П4Б1К.

Из-за выраженной эдификаторной роли верхнего яруса древостоя в таблице приведены результаты статистической обработки матриц густоты деревьев и запасов древесины на выделенных элементарных участках ППП только этого яруса. То есть, представлена динамика естественного изреживания древесного яруса и возрастание объема накопленной стволовой древесины с увеличением возраста насаждения.

Из таблицы видно, что средняя густота и запас на полосе ( $M$ ) меняется со временем, т.е. с возрастом древостоя. Стандартные отклонения ( $\delta$ ), указывающие на разбросанность значений рядов распределения численности деревьев и их запасов в полосах, расположенных вдоль или поперек склона, имеют существенные различия между собой.

При этом значения  $\delta$  для рядов распределения количества деревьев верхнего яруса в полосах, расположенных вдоль склона, в первые два учета почти в 2 раза меньше, чем в

полосах, расположенных поперек склона, а в последующие учеты – почти в 1,5. Поскольку различия значений  $\delta$  имеются во все годы наблюдений, то было целесообразно определить коэффициент корреляции ( $r$ ), характеризующий линейную связь между случайными величинами.

Таблица – Динамика густоты и запаса верхнего яруса древостоя и их статистических показателей в зависимости от положения на склоне

Год	Густота			Запас		
	M, шт. на полосе	$\delta$ и $t^*$ по склону		M, м <sup>3</sup> на полосе	$\delta$ и $t$ по склону	
		вдоль	поперек		вдоль	поперек
1976	32,0	4,99 (20,3)	9,73 (10,4)	2,46	0,55 (14,06)	0,84 (9,29)
1980	27,3	2,83 (30,5)	7,82 (11,04)	3,09	0,72 (11,04)	1,07 (9,12)
1985	18,6	3,53 (16,66)	5,13 (11,47)	3,76	0,97 (11,47)	1,68 (7,07)
1990	15,6	3,37 (14,64)	4,58 (10,77)	4,1	1,16 (10,77)	1,45 (8,93)
1997	12,4	3,1 (12,65)	4,53 (8,66)	5,05	1,46 (8,66)	3,87 (4,12)
2008	7,9	2,28 (10,96)	3,2 (7,62)	5,38	2,03 (7,62)	2,19 (7,77)

\*Критерий Стьюдента, табличное значение  $t$  при уровне значимости 0,01 и числе степеней свободы 9 составляет 2,82.

Определение  $r$  между густотой верхнего яруса древостоя в 1976 г. и его густотой в последующие годы показало, что в элементарных полосах, расположенных вдоль склона, эти коэффициенты составляют: в 1976 г. – 1,0, в 1986 г. – 0,47, в 1997 г. – 0,27 и 2008 г. – 0,67, а в элементарных полосах, расположенных поперек склона, соответственно, 1,0, 0,93, 0,87 и 0,65.

Связь между первоначальной густотой верхнего яруса древостоя и величиной отпада в последующие годы имела иной характер: коэффициент корреляции в элементарных полосах, расположенных вдоль склона – в 1976 г. 1,0, в 1986 г. 0,79, в 1997 г. 0,83 и 2008 г. 0,89, а в элементарных полосах, расположенных поперек склона – в 1976 г. 1,0, в 1986 г. 0,96, в 1997 г. 0,93 и в 2008 г. 0,94.

Поскольку при  $\alpha > 0,05$  и числе коррелируемых пар 10 критическое значение  $r$  составляет 0,632, то можно утверждать, что степень снижения густоты верхнего яруса древостоя с возрастом почти функционально определяется густотой яруса на начало исследований, при этом неравномерность горизонтальной структуры яруса постепенно снижается. Это согласуется с литературными данными о ходе изреживания древостоев с разной начальной густотой (Кузьмичев, 2013).

Использованный для анализа данных длительного мониторинга природного объекта подход позволил выявить и показать особенности динамики распределения и роста древесной растительности по склону. Влияние рельефа на структуру древостоя проявилось на сравнительно небольшой площади – 30 на 40 м, при крутизне менее 5°. Уменьшение показателей численности и роста деревьев и подроста вверх по склону необходимо учитывать при исследованиях лесных экосистем и их моделировании.

## Литература

- Анучин Н.П. Лесная таксация. – М.: Лесн. пром-сть. 1982. – 552 с.  
 Ермоленко П.М. Формирование состава хвойно-лиственных молодняков на вырубках кедровников в черном поясе Западного Саяна // Формирование и продуктивность древостоев. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1981. – С. 53-70.  
 Кузьмичев В.В. Закономерности динамики древостоев. – Новосибирск: Наука. 2013. – 208 с.  
 Овчинникова Н.Ф., Овчинников А.Е. Учеты деревьев на постоянных пробных площадях Красноярского края. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2011620706. зарег. 30.09.2011.

## ОЦЕНКА ПЕРВИЧНОЙ ВАЛОВОЙ И НЕТТО ПРОДУКЦИИ ЛЕСОВ ПО ВЕЛИЧИНЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ РАДИАЦИИ (ФАР)

Ольчев А.В.

<sup>1</sup> *Институт Проблем Экологии и Эволюции имени А. Н. Северцова Российской академии наук, Москва, Россия*  
[aoltche@yandex.ru](mailto:aoltche@yandex.ru)

**Аннотация:** Для влажных тропических лесов Индонезии и еловых лесов Центральной Европы выявлены различия в зависимости интегральных месячных и суточных значений первичной валовой продукции ( $GPP$ ) от величины поглощенной растительностью фотосинтетически активной радиации,  $ФАР$  ( $aQ$ ). Если зависимость  $GPP$  от  $aQ$  для влажных тропических лесов имеет четко выраженный нелинейный характер, то для еловых лесов она близка к линейной. Эффективность использования растениями  $ФАР$  на  $GPP$ , для влажного тропического леса на 36% превосходит значения этого параметра для елового леса.

### 1. Введение

Методика расчетов среднесуточных и среднемесячных значений первичной валовой ( $GPP$ ) и нетто ( $NPP$ ) продукции по величине поглощенной растительным покровом ФАР ( $aQ$ ) основана на гипотезе о наличии линейной зависимости между  $GPP$  и  $NPP$  растительного покрова и  $aQ$ . В качестве коэффициента пропорциональности при этом используется величина, характеризующая эффективность использования растениями  $ФАР$  для  $GPP$  и  $NPP$  ( $\varepsilon_{GPP}$ ,  $\varepsilon_{NPP}$ ). Эти величины для каждого отдельного вида растительности рассматриваются как функции температуры, влажности почвы и фенологической фазы развития растения. В настоящее время данный подход нашел широкое применение для оценки  $GPP$  и  $NPP$  растительных сообществ в региональном и глобальном масштабе. Величины  $\varepsilon_{GPP}$  и  $\varepsilon_{NPP}$  обычно оцениваются экспериментально с использованием данных прямых измерений потоков  $CO_2$  над растительным покровом (метод ковариации турбулентных пульсаций). Расчет  $GPP$  и  $NPP$  проводится с помощью, как различных методических подходов, так и с применением математических моделей.

В рамках проведенного исследования была выполнена проверка классического подхода для определения  $GPP$  и  $NPP$  по величине  $aQ$  на примере влажных тропических лесов в Индонезии и еловых лесах Центральной Европы.

### 2. Методы

В качестве основных природных объектов для изучения зависимости  $GPP$  и  $NPP$  от  $aQ$  в исследовании были выбраны вечнозеленые влажные тропические леса национального парка Лоре Линду, расположенного в центральных районах о. Сулавеси в Индонезии, а также еловые спелые леса, произрастающие в центральной Германии в Золлингском национальном парке. Измерения потоков  $CO_2$  проводились с помощью метода ковариации турбулентных пульсаций (eddy covariance). Расчеты по математической модели Mixfor-SVAT использовались для восстановления непрерывных рядов данных по потокам  $CO_2$  в исследуемых лесных экосистемах в периоды, в которые измерения не проводились или определялись с погрешностями в силу низкой турбулентности приземного слоя, а также расчетов  $GPP$ ,  $NPP$  и  $aQ$ . Для анализа использовались значения  $GPP$ ,  $NPP$  и  $aQ$ , осредненные за сутки и за месяц. Для параметризации зависимости  $GPP$  и  $NPP$  от  $aQ$  использовался как классический подход, основанный на линейной зависимости  $GPP$  и  $NPP$  от  $aQ$

$$GPP = \varepsilon_{GPP} \cdot aQ \quad NPP = \varepsilon_{NPP} \cdot aQ \quad , \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{GPP}$ ,  $\varepsilon_{NPP}$  определяют эффективность использования растениями ФАР для  $GPP$  и  $NPP$ , так и подход, предложенный Монси и Саеки (Monsi, Saeki 1953) и позволяющий описать нелинейный характер зависимости  $GPP$  и  $NPP$  от  $aQ$ :

$$GPP = (a_1 \cdot aQ) / (1 + b_1 \cdot aQ) \quad NPP = (a_2 \cdot aQ) / (1 + b_2 \cdot aQ) - R_a \quad (2)$$

Параметры  $a_1$  и  $a_2$  в (2) определяют углы наклона касательных к графикам функций в точках их пересечения с осями ординат ( $aQ=0$ ) и эквиваленты величинам  $\varepsilon_{GPP}$  и  $\varepsilon_{NPP}$  в (1), а  $b_1$  и  $b_2$  характеризуют степень искривленности кривых (2). При  $b_1, b_2 \rightarrow 0$  нелинейные уравнения (2) превращаются в линейные (1).  $R_a$  - скорость автотрофного дыхания растений.

### 3. Основные результаты

Анализ зависимости интегральных месячных и суточных сумм  $GPP$  и  $NPP$  от  $aQ$  для влажного тропического леса показывает, с одной стороны, хорошо прослеживающийся нелинейный характер зависимости  $GPP$  и от  $aQ$ , а с другой стороны, близкую к линейной зависимость  $NPP$  от  $aQ$  (Рисунок 1) (Ibrom et al. 2008). Для елового леса отмечается близкая к линейной зависимость  $GPP$  и  $NPP$  от  $aQ$  как для среднемесячных, так и для среднесуточных значений. Значение  $\varepsilon_{GPP}$  для влажного тропического леса ( $\varepsilon_{GPP}=1.20$  гС МДж<sup>-1</sup>) на 36% превосходит  $\varepsilon_{GPP}$  для елового леса в умеренных широтах ( $\varepsilon_{GPP}=0.88$  гС МДж<sup>-1</sup>). Для  $\varepsilon_{NPP}$  прослеживается обратная тенденция - в случае елового леса значение  $\varepsilon_{NPP}$  выше, чем для влажного тропического леса ( $\varepsilon_{NPP}=0.55$  и  $0.51$  гС МДж<sup>-1</sup> - для елового и влажного тропического леса, соответственно).

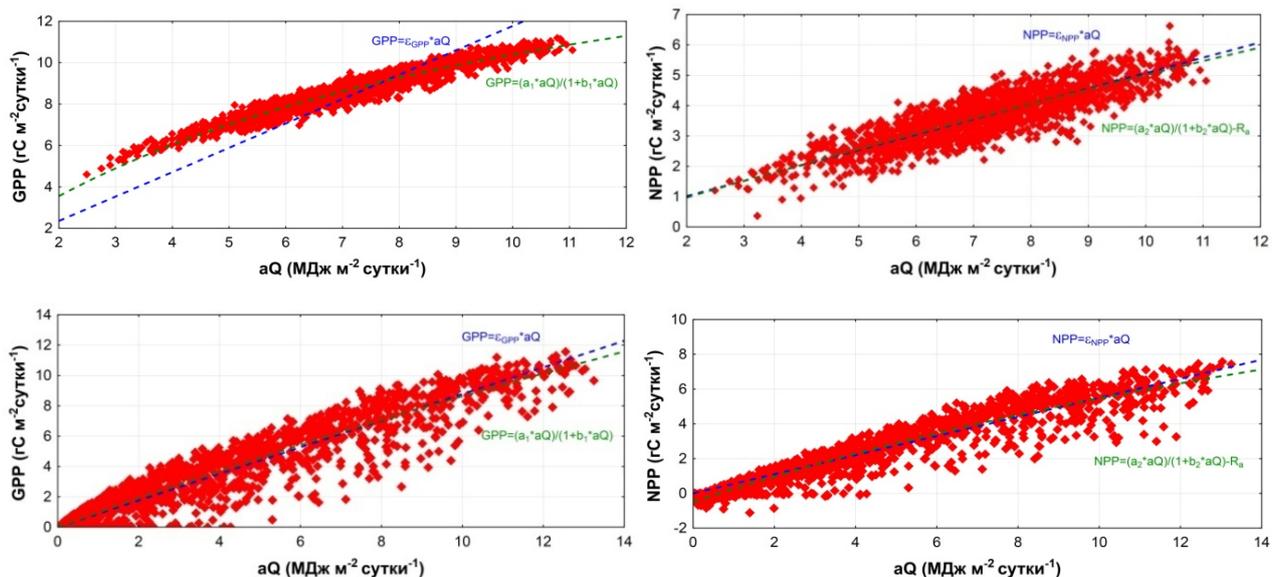


Рисунок 1. Зависимость дневных сумм  $GPP$  и  $NPP$  от  $aQ$  для влажного тропического леса в Барири в Индонезии (вверху) и для елового спелого леса в Центральной Германии (внизу).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского Научного Фонда (РНФ 14-27-00065).

### Литература

- Ibrom A., Oltchev A., June T., Kreilein H., Rakkibu G., Ross Th., Panferov O., Gravenhorst G. Variation in photosynthetic light-use efficiency in a mountainous tropical rain forest in Indonesia // *Tree Physiology*. - 2008. - V. 28. - P. 499–508
- Monsi M., Saeki T. Ueber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion // *Japanese Journal of Botany*. - 1953. - V. 14. - P. 22–52

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ ОСАДКА В ПОЧВЕННОМ ПРОФИЛЕ

Остроумов В. Е.

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*  
[v.ostroumov@rambler.ru](mailto:v.ostroumov@rambler.ru)

**Аннотация:** В докладе описывается модель накопления континентальных осадков, которая позволяет учитывать трансформацию осадочного вещества в период его нахождения в верхних горизонтах толщи под действием факторов почвообразования. Модель позволяет по показателям динамики скорости осадконакопления и интенсивности почвообразовательной трансформации рассчитывать время жизни осадка в заданном диапазоне глубины, степень его трансформации и распределение показателей свойств вещества в осадочной толще.

### 1. Введение

Толщи континентальных осадков, содержащих погребенные почвы, широко распространены и содержат информацию об этапах развития природной среды и климата. Заключенные в них почвенные профили формировались на этапах замедленного осадконакопления, а также при благоприятных биоклиматических условиях, когда скорости трансформации осадочного материала были достаточно велики. В этих случаях время экспонирования осадка в зоне действия факторов почвообразования оказывалось достаточным для значимой трансформации вещества и для формирования почвенных горизонтов. При высокой скорости осадконакопления и при малой интенсивности трансформации осадка вблизи поверхности почвенные профили не успевали формироваться, и изменений осадочного вещества не происходило. Соотношения скорости осадконакопления и интенсивности почвообразовательной трансформации осадка широко используются для индикации перерывов в осадконакоплении и при решении других палеогеографических задач на качественном уровне. До настоящего времени остаются неразработанными модели для количественной интерпретации распределения показателей свойств материала в осадочных толщах с погребенными почвами.

### 2. Структура модели

В докладе представлена модель, которая описывает осадконакопление и трансформацию осадочного вещества при почвообразовании. Модель основана на учете непостоянных во времени скорости поступления на поверхность осадочного материала и интенсивности его трансформации в заданном диапазоне глубины в почвенном профиле. Модель включает следующие блоки: 1) модуль вычисления динамики уровня поверхности за счет поступления осадочного вещества, 2) модуль вычисления возраста осадочного материала вдоль координаты глубины осадочной толщи, 3) модуль расчета времени жизни осадочного материала в пределах заданного диапазона глубин в почвенном профиле, 4) модуль определения степени трансформации осадка на протяжении времени его жизни под влиянием факторов почвообразования на заданной глубине, 5) модуль вычисления распределения степени трансформации материала в осадочной толще.

В качестве входных данных модель использует: 1) описание динамики скорости осадконакопления и интенсивности трансформации осадочного вещества, 2) показатели свойств осадка и материала почвенных горизонтов, а также 3) данные о характерных временах изменения этих свойств. Массивы данных на выходе модели включают: 1) динамику уровня поверхности, 2) время жизни осадка в заданном диапазоне глубин и 3) картину распределения степени почвообразовательной трансформации материала по глубине осадочной толщи.

### 3. Примеры использования

Рассмотрены два примера использования модели для интерпретации распределения показателей свойств погребенных почв и осадочного материала в континентальных осадочных толщах.

Первый пример – распределение магнитной восприимчивости в разрезе многолетнемерзлых осадков ледового комплекса (Колымская низменность, северо-восток Якутии). На фоне восстановительной среды осадка ледового комплекса перепады окислительно-восстановительного потенциала в активном слое приводят к формированию маггемита. В результате в аккумулятивных горизонтах возникают зоны повышенной магнитной восприимчивости. В 22-метровом разрезе осадка ледового комплекса, содержащем несколько погребенных почвенных профилей с разной контрастностью, выполнено около 1600 замеров магнитной восприимчивости.

Во втором примере рассмотрено распределение отражательной способности материала в эоловом осадке (юг Западно-Сибирской низменности). Отражательная способность здесь обратно пропорциональна содержанию органического вещества и снижается в гумусовых аккумулятивных горизонтах (460 измерений в толще мощностью 14 м с двумя погребенными и одной современной почвами). В обоих случаях путем подбора показателей динамики осадконакопления и интенсивности трансформации материала в почвенном профиле достигнуто удовлетворительное сходство вычисленных распределений степени трансформации материала с реальным распределением показателей свойств.

Модель может использоваться для количественной интерпретации данных о распределении свойств материала в толщах континентальных осадков, содержащих погребенные почвы, при решении палеоклиматических, почвенно-хронологических и палеотектонических задач. Она может быть полезна в качестве основы при разработке моделей переноса подвижных фаз в почвах и грунтовых толщах с учетом осадконакопления.

## ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ СЪЕМКИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Охрименко М.А.<sup>1</sup>, Алейников А.А.<sup>2</sup>, Грабарник П.Я.<sup>3</sup>, Иванова Н.В.<sup>1</sup>, Шанин В.Н.<sup>3</sup>,  
Шашков М.П.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия*

[maxim.okhrimenko@gmail.com](mailto:maxim.okhrimenko@gmail.com)

<sup>2</sup>*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия*

[aaacastor@gmail.com](mailto:aaacastor@gmail.com)

<sup>3</sup>*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*

[shaninvn@gmail.com](mailto:shaninvn@gmail.com)

**Аннотация:** Обсуждаются данные дистанционного зондирования Матрешинского и Никулкинского участков лесничеств Пестовского центрального лесничества Новгородской области, полученные с применением технологий лазерной локации, цифровой аэрофотосъемки и спутникового позиционирования. Показаны возможные подходы к их использованию для целей лесной таксации и мониторинга, для анализа пространственной структуры лесных сообществ, верификации моделей роста древостоя.

Использование воздушного лазерного сканирования (ВЛС) и цифровой спектрозональной аэрофотосъемки получило широкое распространение в целях получения количественных и качественных характеристик лесных массивов (Maltamo et al., 2014). По нашим сведениям, в России исследования на данную тему проводит всего лишь один коллектив (Данилин и др., 2013). Несомненно, основным препятствием служит высокая стоимость, как оборудования, так и проведения аэросъемочных работ. В подобных условиях редкие доступные материалы предоставляют уникальную возможность апробации и развития уже существующих за рубежом методов в российских лесах. Особенности технологии ВЛС по сравнению с обычной аэрофотосъемкой являются то, что, во-первых, это активное средство дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), т.е. сенсор излучает зондирующий луч, отражения от которого затем регистрирует приемник сенсора. Во-вторых, зондирующий импульс проникает сквозь полог растительности, в третьих, сенсор регистрирует множественные отклики, что в целом обеспечивает достаточно подробную информацию о всех ярусах растительного сообщества. Лазерная локация подробно описана Е.М. Медведевым с соавторами (Медведев и др., 2007).

В наше распоряжение с целью проведения исследовательских работ были переданы данные аэросъемки Пестовского центрального лесничества Новгородской области. Центр участка съемки находится приблизительно в точке с географическими координатами 58°35' с.ш., 35°59' в.д., площадь участка составляет 610 км<sup>2</sup>. Этот лесной массив относится к южнотаежным лесам, древостои которых сформированы сосной, елью, березой и осиной. Фрагментарно встречаются участки с доминированием липы, клена остролистного, ольхи серой и черной. Преобладают молодые и средневозрастные древостои II-III классов бонитета, сформированные в результате интенсивного лесного хозяйства. В настоящее время, эта территория также вовлечена в активную хозяйственную деятельность.

Набор данных был получен тремя сенсорами в июне-июле 2014 года. ВЛС проводилось системой ALTM Gemini, Optech Inc с частотой импульсов 125кГц воздушным судном Ан 2, одновременно велась съемка среднеформатной камерой DiMAC. Средняя плотность точек лазерных отражений (ТЛО) составила 10 точек на м<sup>2</sup> с размером «пятна» на земле 14 см, геометрическое разрешение снимков True Color камеры Dimac - 6 см. Расчетная точность ТЛО, связанная с дальномером, в плане и по высоте составила 10 см. Траектории воздушных судов были вычислены с использованием метода Precise Point Positioning (PPP), что привело к внутренней сходимости траекторного решения с погрешностью в 15 см.

Снимки RGB&NIR были получены широкоформатной камерой Vexcel UltraCam Lp в отдельном полете на самолете Л410, с регистрацией траектории GPS, но без использования инерциальной системы, с разрешением 27 см на пиксель. В дальнейшем, по снимкам с использованием триангуляции были построены ортофотопланы масштаба 1:10 000.

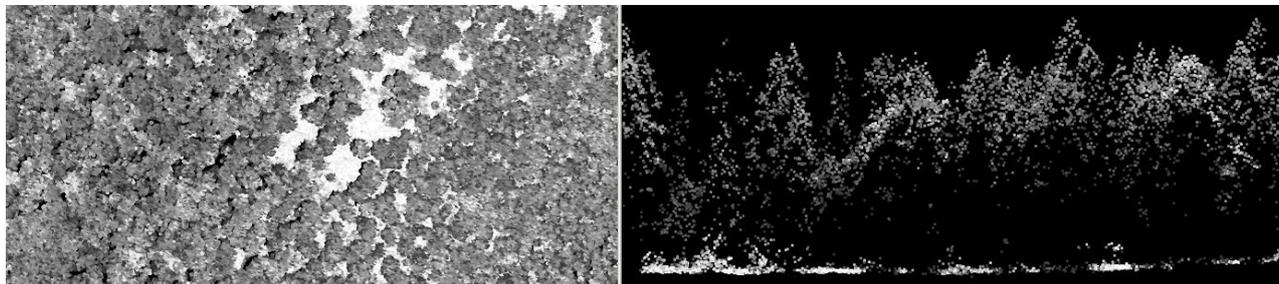


Рисунок - ТЛО, расцветленные по интенсивности в градациях серого, вид сверху и в разрезе на 10ый выдел 144 квартала (7ЕЗБ) Матрешинского участкового лесничества

Важным аспектом работы с данными, полученными с помощью дистанционного зондирования, является их дешифрирование и проверка на соответствие результатам натурных обследований на временных пробных площадях (ПП), заложенных с помощью технологии Field-Map. Использование этой технологии позволит закартировать все деревья с определением основных морфометрических характеристик стволов и горизонтальных проекций крон. Результаты измерений в дальнейшем можно будет сравнить с расчетными значениями, полученными при анализе материалов лазерной локации как на уровне отдельных деревьев (средняя ширина и высота кроны), так и на уровне древостоя (высота полога, количество ярусов, сомкнутость крон).

После дешифрирования данные дистанционного зондирования могут быть использованы для валидации индивидуально-ориентированных моделей уровня древостоя. Процедура валидации заключается в генерировании при помощи модели большого количества виртуальных древостоев и сравнении их основных характеристик (полнота, средняя высота, сомкнутость крон и пр.) с данными лазерной локации.

Другим возможным применением данных ВЛС для анализа состояния и прогноза развития экосистем является задача выделения участков, не занятых древесной растительностью - разрывов в пологе леса, образовавшихся в результате слома или вывала деревьев. Анализ особенностей структуры таких «окон» позволяет сформулировать и проверить гипотезы о процессах возобновления древостоя на разных стадиях развития экосистем. Помимо уже перечисленных возможностей использования данных ВЛС можно отметить задачи оценки запаса древесины и фитомассы. Определение этих двух параметров откроет новые возможности как для оценки запаса углерода в лесных экосистемах, так и для таксации больших лесных массивов.

Авторы выражают благодарность компании «Авиация и Прикладная Экология» и лично Г.Ю. Смаглюку за предоставленные данные.

## Литература

Matti Maltamo, Erik Næsset, Jari Vauhkonen *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and CaseStudies*. Springer, 2014. - 463с.

Данилин А.И., Данилин И.М., Свищев Д.Д. Совершенствование алгоритмов дешифрирования таксационных показателей лесных насаждений на основе данных лазерной и цифровой аэро космической съемки // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013 Т. 3., № 4.

Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. *Лазерная локация земли и леса: учеб. пособ.*, 2-е изд., перераб. и доп. М.: Геокосмос; Красноярск: Институт леса СО РАН. 2007. - 229с.

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТЕНИЕВОДСТВА К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА В XX-XXI ВЕКЕ В РОССИИ

Павлова В.Н.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии», г. Обнинск, Россия*  
[vnpr2003@bk.ru](mailto:vnpr2003@bk.ru)

**Аннотация:** Представлены количественные оценки потерь урожайности зерновых культур за 2001–2012 гг., полученные в системе Климат–Почва–Урожай. Приведены нормированные оценки мер адаптации (достаточный уровень увлажненности почвы и минерального питания) к ожидаемым изменениям климата для территории Южного ФО по сценарию GFDL для различных временных интервалов XXI столетия.

### 1. Введение

В настоящее время климатические условия на территории России существенно меняются и, вероятно, эта тенденция в ближайшие годы сохранится. Производство сельскохозяйственных культур является одним из главных секторов экономики, подверженных воздействию изменений климата (Павлова, Сиротенко, 2012). Для оценки природно-ресурсного потенциала России по отдельным зернопроизводящим регионам при текущих климатических изменениях и условиях будущего климата разработана система численного мониторинга изменений климата и продуктивности растениеводства.

### 2. Материалы и методы

В данной работе представлены материалы, связанные с разработкой и усовершенствованием региональной схемы для расчета региональных оценок уязвимости показателей продуктивности на примере зерновых культур в системе Климат–Почва–Урожай (Сиротенко и др. 2011; Сиротенко и др. 2013). База данных имитационной системы содержит временные ряды среднемесячных значений температуры воздуха и осадков за период 1951–2014 гг. по сети станций Росгидромета. Помимо этого задана необходимая для имитационного моделирования информация о преобладающих почвах: водно-физические и агрохимические свойства, содержание гумуса и другие характеристики. В систему заложена фенологическая информация по зерновым и некоторым техническим культурам, посевные площади и урожайная статистика.

Система позволяет сформировать любые интересующие исследователя сценарии изменения природной среды по текущим наблюдаемым метеорологическим данным и по климатическим сценариям моделей глобальной циркуляции атмосферы, рекомендованным Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPPC).

### 3. Обсуждение результатов

С помощью имитационной системы Климат–Почва–Урожай проведена серия опытных расчетов с целью оценки потерь урожайности зерновых культур (пшеница озимая и яровая) от неблагоприятных погодных условий и рисков получения низких урожаев. Количественная оценка средних потерь урожайности за период 2001-2012 гг. от неблагоприятных агрометеорологических условий рассчитывается по формуле:

$$P(\%) = \frac{1}{12} \sum_{i=2001}^{2012} \frac{Y_i - \bar{Y}}{\bar{Y}} \times 100\% , \quad \text{если } (Y_i - \bar{Y}) < 0.$$

где  $Y_i$  – рассчитанная урожайность  $i$ -го года (система Климат – Почва – Урожай);

$\bar{Y}$  – средняя урожайность за период 2001-2012 гг.

Получены количественные оценки мер уязвимости по показателям продуктивности и увлажненности территории при наблюдаемых изменениях климата по отдельным регионам ЕТ России.

На рисунке 1 в качестве примера представлены количественные оценки потерь урожайности озимой пшеницы на территории Южного ФО, рассчитанные с помощью системы Климат–Почва–Урожай. Расчеты показали, что на большей части рассматриваемой территории потери за 2001-2012 гг. составляли от 16 до 19 %.

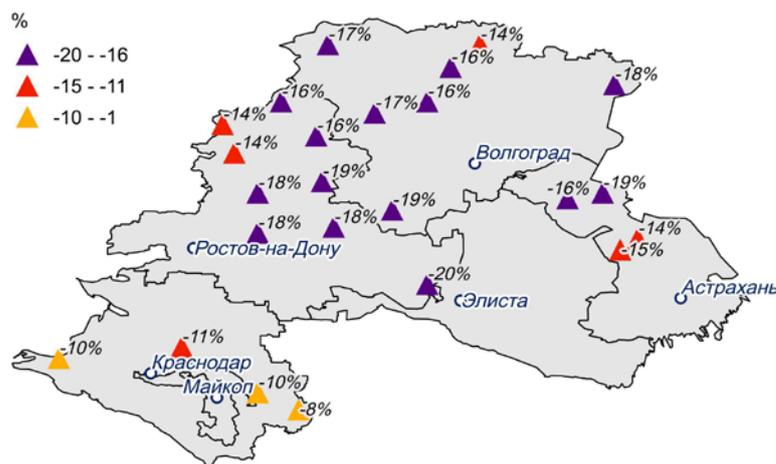


Рисунок 1 – Средние потери (%) урожайности озимой пшеницы за 2001-2012 гг. в Южном ФО (система Климат–Почва–Урожай).

Расчеты оценок потерь урожайности также проведены по выбранной сети станций на территории ЕТ России. В таблице 1 в качестве примера приведены оценки потерь урожайности озимой пшеницы в Нижнедевицком районе Воронежской области. Здесь же представлены оценки параметров, характеризующие условия теплообеспеченности и влагообеспеченности за рассматриваемый период.

Таблица 1 – Оценка агрометеорологических условий и потери урожайности озимой пшеницы за 2001-2012 гг. в системе Климат–Почва–Урожай. Воронежская область, Нижнедевицкий район.

Год	Потери, %	N, сут.	Ts, °C	ΣR, мм	ГТК, б/п	Ер, мм	W <sub>20</sub> , мм	
							май	июнь
2001		111	15.2	153	0.92	470	12	13
2002	-18.0	89	18.3	113	0.69	495	17	8
2003		95	18.0	171	1.00	413	14	17
2004		118	14.9	343	1.97	470	19	28
2005		112	15.7	276	1.57	442	32	22
2006	-15.9	92	17.9	121	0.74	445	8	14
2007	-34.0	111	14.9	205	1.25	463	8	0
2008		116	14.7	201	1.19	453	10	13
2009	-6.1	101	16.2	130	0.80	516	13	7
2010	-25.3	98	16.5	90	0.55	481	9	0
2011	-46.3	98	16.8	150	0.92	476	1	0
2012	-19.6	99	16.8	211	1.28	477	17	0
Среднее	-13.8							

Обозначения: N – длина вегетационного периода; Ts – средняя за вегетационный период температура воздуха; ΣR – сумма осадков за вегетационный период; ГТК – гидротермический коэффициент Селянинова; Ер – потенциальная испаряемость; W<sub>20</sub> – продуктивная влажность почвы в слое 0–20 см.

Проведена серия численных экспериментов по расчету прогнозируемых изменений продуктивности по основным зернопроизводящим регионам на территории РФ при двух вариантах агротехники – современном уровне и адаптивном, включающем использование достаточных доз минеральных удобрений и влагосберегающих технологий, позволяющий поддерживать режим увлажненности почвы, приближенный к оптимальному.

Получены нормированные оценки мер адаптации к ожидаемым изменениям климата (обеспечение достаточной увлажненности и достаточного уровня обеспеченности минеральным питанием) для территории Приволжского, Центрального и Южного ФО на периоды 2011-2030 гг., 2041-2060 гг. и 2080-2099 гг. по ансамблевому сценарию и сценарию GFDL.

В таблице 2 представлены оценки прогнозируемой урожайности яровых зерновых культур на период 2040 – 2060 гг. относительно современного уровня при реализации сценария GFDL по отдельным областям Приволжского федерального округа. Оценки варианта с адаптацией (достаточное увлажнение почвы), положительны и изменяются в интервале от 8 % в Республике Башкортостан до 55 % в Саратовской области.

Таблица 2 – Ожидаемые изменения продуктивности яровых зерновых культур относительно современного уровня на территории Приволжского ФО на период 2040-60 гг. (сценарий GFDL, антропогенное воздействие RCP8.5)

Область, край, республика	Изменение урожайности			
	вариант без адаптации – современный уровень агротехники		вариант с адаптацией – достаточное увлажнение почвы	
	ц/га	%	ц/га	%
Башкортостан	-5.2	-31.6	1.2	8
Самарская	-2.8	-25.0	4.0	37
Оренбургская	-3.0	-24.8	6.3	54
Татарстан	-3.2	-22.0	3.4	25
Саратовская	-1.5	-16.2	4.7	55
Нижегородская	-1.3	-8.3	3.0	31
Пермская	-1.0	-6.8	1.4	12

Представленные выше оценки уязвимости продуктивности зерновых культур свидетельствуют, с одной стороны, о важности и полезности результатов, которые могут быть использованы в управлении сельскохозяйственным производством. С другой стороны, могут послужить основой для решения вопросов адресного размещения государственной поддержки сельхозпроизводителей в рамках региональных систем мониторинга продуктивности сельскохозяйственных культур.

### Литература

- Павлова В.Н., Сиротенко О.Д. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России. // Тр. ГГО. 2012. Вып. 565. -С. 132-151.
- Сиротенко О.Д., Клещенко А.Д., Павлова В.Н., Абашина Е.В. Численный мониторинг как метод исследования коэволюции климата, почв и агросферы на протяжении XX и XXI столетий // Тр. регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Калуга, 2011. Вып. 16. -С. 211–215.
- Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н. Методика оценки агроклиматических условий для мониторинга изменений современного климата на территории Российской Федерации 2013. . <http://method.meteorf.ru>

## МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ДЛЯ УСЛОВИЙ ЗАСУШЛИВОГО КЛИМАТА: АДАПТИВНЫЙ ПОДХОД

Павлова В.Н., Варчева С.Е.

*ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии», Обнинск, Россия*  
[vnpr2003@bk.ru](mailto:vnpr2003@bk.ru), [s.varcheva@mail.ru](mailto:s.varcheva@mail.ru)

**Аннотация:** Представлена динамическая модель яровой пшеницы, используемая для аридных районов Северной Евразии. Новым аспектом развития модели является адаптивный подход к описанию процесса роста растений, который отражает влияние водного дефицита на процессы органогенеза. Показано, что в степной зоне России и Казахстана дефицит почвенной влаги в течение вегетационного периода может вызвать снижение урожая на 20-25%, а в экстремальные годы – до 45%.

В настоящее время средняя урожайность в большинстве стран азиатского региона не превышает 1,5 тонн зерна с гектара (Шиятый Т.В., Голиков И. П., 2010). Хотя по прогностическим оценкам ФАО для удовлетворения ожидаемого спроса на зерно средняя урожайность зерновых культур в мире должна возрасти к 2020 году с современных 2,9 до 5 тонн с гектара. Степная зона России и Казахстана относится к зоне рискованного земледелия, где уровень производства зерна решающим образом зависит от погодных и климатических условий. Важную роль при этом играет степень адаптированности степного земледелия к условиям природной среды. Для реализации приспособленных к погодноклиматическим условиям стратегий при производстве зерна необходима достаточно адекватная математическая модель продуктивности зерновых культур.

В работе представлена адаптационная динамическая модель формирования урожая пшеницы для условий засушливого климата (Сиротенко, 2012, Pavlova V. N., et al., 2014). Основу модели составляет система уравнений, позволяющая рассчитывать динамику биомассы посева от всходов растений до созревания урожая. Разностная форма уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} M_S^j = M_S^{j-1} + K_R(\alpha_S^j \Phi^j - R_0^j M_S^{j-1} - q_{SZ} M_S^{j-1}), \\ M_r^j = M_r^{j-1} + K_R(\alpha_r^j \Phi^j - R_0^j M_r^{j-1} - q_{rZ} M_r^{j-1}), \\ M_Z^j = M_Z^{j-1} + K_R(\alpha_Z^j \Phi^j - R_0^j M_Z^{j-1} + q_{SZ} M_S^{j-1} + q_{rZ} M_r^j), \end{cases}$$

где  $M_S^j, M_r^j, M_Z^j$  – биомасса побегов, корней и зерна соответственно,  $K_R = \Delta t / (1 + R_R)$ ,  $\alpha_S^j$ ,  $\alpha_r^j$  и  $\alpha_Z^j$  – ростовые функции ( $\alpha_S^j + \alpha_r^j + \alpha_Z^j = 1$ ),  $\Phi^j$  – суммарный фотосинтез посева за сутки,  $q_{SZ}$  и  $q_{rZ}$  – коэффициенты, определяющие потоки пластических веществ из вегетативных органов в репродуктивные,  $\Delta t$  – шаг по времени, равный суткам.

Новым аспектом развития динамической модели является адаптивный подход к описанию процесса роста растений. Учитывая, что в условиях аридного климата адаптация к условиям увлажнения является ведущим фактором, определяющим соотношение подземной и надземной массы растений, предлагается следующая ростовая функция для корневой системы:

$$\alpha_r^j = \alpha_{r\max} \left( 1 - \left( \frac{V^j}{V_F} \right)^{a_r} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{W_f^j}{W_{\max}} \right)^{a_w} \right),$$

где  $\alpha_{r\max}$  – максимальное значение функции,  $V^j$ ,  $V_F$  – суммы эффективных температур воздуха на  $j$ -ые сутки и на конец вегетации соответственно,  $W_f^j$  – эффективная

влажность корнеобитаемого слоя почвы,  $W_{\max}$  – максимально возможные эффективные запасы почвы,  $a_r$  и  $a_w$  – константы.

Ростовая функция репродуктивных органов (колосьев для пшеницы) представляется следующей функцией от биологического времени  $V^j$ :

$$\alpha_Z^j = \hat{\alpha}_Z^j + \left(1 - \hat{\alpha}_Z^j\right) \left[1 - \left(\frac{W_f^j}{W_{\max}}\right)^{b_w}\right],$$

где  $\hat{\alpha}_Z^j = \alpha_{Z_{\max}} \left[1 - \left(\frac{V_F - V^j}{V_F - V_R}\right)^{c_z}\right]$ , если  $V^j > V_R$ , иначе  $\hat{\alpha}_Z^j = 0$ .

Здесь  $c_z$  и  $b_w$  – коэффициенты.

Идентификация параметров модели осуществлялась на материалах полевых опытов по яровой пшенице НПЦ зернового хозяйства им. А.И. Бараева в Казахстане (МС Шортанды) за 1986 – 2009 гг. и по данным АМС Ершов (Саратовская область) за 1951 – 1981 гг. На рисунке представлены результаты проверки адекватности модели для этих двух пунктов.

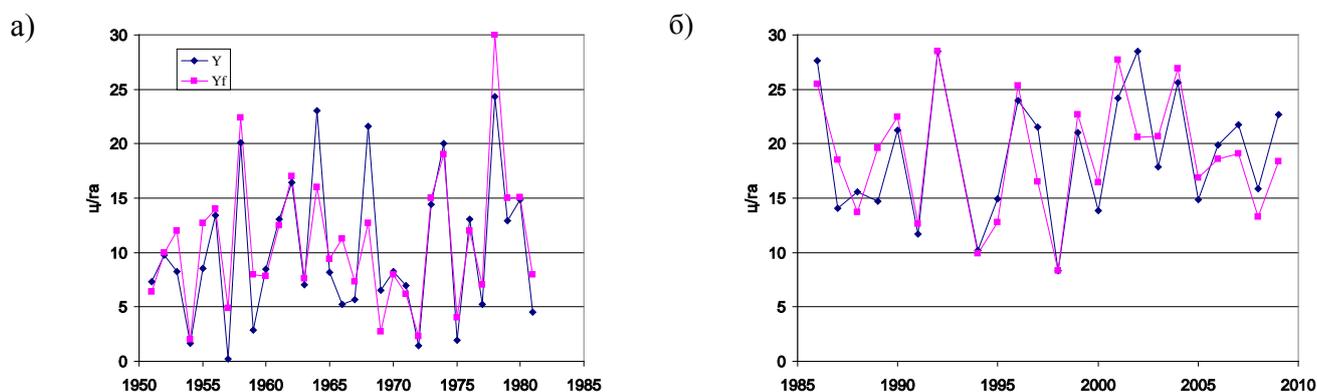


Рисунок – Динамика рассчитанной ( $Y$ ) и фактической ( $Y_f$ ) урожайности яровой пшеницы:

- а) АМС Ершов, Саратовская область, 1951 – 1981 гг., ( $R = 0,88$ ;  $СКО=3,26$  ц/га);
- б) МС Шортанды, Казахстан, 1986 – 2009 гг., ( $R = 0,85$ ;  $СКО= 3,07$  ц/га)

Количественные оценки воздействия сезонного дефицита влаги на уровень урожайности и ее изменчивости получены в ряде модельных экспериментов (АМС Ершов, МС Целиноград и Атбасар). Результаты показали, что в степной зоне России и Казахстана дефицит почвенной влаги в течение вегетационного периода может вызвать снижение урожая на 20-25% , а в экстремальные годы – до 45% и при этом увеличивается изменчивость урожайности (таблица).

Таблица – Статистики урожайности по результатам численного эксперимента при фактических и оптимальных запасах воды в почве.

Пункт наблюдений	Фактические запасы влаги			Оптимальные запасы влаги			Относительная разность, %		
	mean	$\sigma$	$C_v$	mean	$\sigma$	$C_v$	mean	$\sigma$	$C_v$
Ершов	1.41	0.49	0.35	1.86	0.55	0.30	-24	-11	17
Целиноград	1.04	0.31	0.30	1.38	0.25	0.18	-25	24	67
Атбасар	1.17	0.28	0.24	1.44	0.25	0.17	-19	12	41

mean – среднее значение,  $\sigma$  – стандартное отклонение,  $C_v$  – коэффициент вариации

Модель достаточно адекватна для решения задач оценки влияния текущих климатических изменений и может быть использована в системах мониторинга и

прогнозирования урожайности для аридных районов Северной Евразии. Тем не менее, необходимы дальнейшие исследования, чтобы обеспечить эффективность модели в более широком диапазоне агроклиматических условий. Работа в этом направлении могла бы опираться на опыт, накопленный в системе AgMIP, и на работы других авторских коллективов по моделированию (например, Asseng, et al., 2013; Rötter, et al., 2012; Angulo, et al., 2013).

## Литература

- Сиротенко О.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 1. Математические методы в агрометеорологии. - Обнинск, 2012. – 136 с.
- Шиятый Е.И., Голиков И.П. Мониторинг и прогнозирование урожайности зерновых культур в Азиатском регионе СНГ. - <http://agrosector.kz/agrarnaya-nauka/stati-uchenykh/item/2010-12-25-08-25-26.html>
- Angulo, C., Rötter, R.P., Trnka, M., Pirttioja, N., Gaiser, T., Hlavinka, P., Ewert, F., 2013. Characteristic 'fingerprints' of crop model responses to weather input data at different spatial resolutions. *European Journal of Agronomy* 49, p. 104–114.
- Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J., Hatfield, J., Ruane, A., Boote, K., et al., 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change* 3, p. 827–83.
- Rötter, R.P., Palosuo, T., Kersebaum, K.-C., Angulo, C., Bindi, M., Ewert, F., Ferrise, R., Hlavinka, P., Moriondo, M., Nendel, C., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Takács, J., Trnka, M., 2012. Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: a comparison of nine crop growth models. *Field Crops Research* 133, p. 23–36.
- Vera N. Pavlova, Svetlana E. Varcheva, Raushan Bokusheva, Pierluigi Calanca. Modelling the effects of climate variability on spring wheat productivity in the steppe zone of Russia and Kazakhstan. *J. Ecological Modelling* 277 (2014), p. 57-67.

## УЧЁТ КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ В ОПТИМИЗАЦИИ АГРОНОМИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕОРИИ ИГР

Перевертин К.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*ФГБНУ Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*  
[perevertink@mail.ru](mailto:perevertink@mail.ru)

**Аннотация:** Предлагаемый метод оптимизации агрономического решения с помощью Теории игр рассматривает в качестве игроков Агронома и Природу. Формализованная платёжная матрица легко сводится к ЛП-задаче. Решение в области смешанных стратегий позволяет оптимизировать учёт климатических рисков на гарантированном уровне цены игры ( $V$ ) и даже выше с учётом незлонамеренности Природы, как игрока.

Тенденция последних лет для РФ – отказ от привозного (тростникового) сырья с расширением клина свёклы в отечественных регионах неизбежно заставит вспомнить о проблеме свекловичной нематоды. Этот микроскопический червь – причина кризисов свекловодства, которые можно рассматривать, как региональные экологические катастрофы. Насыщение севооборотов свёклой свыше 25%, а то и монокультурное возделывание после эйфории коммерческого успеха обязательно сталкивается с проблемой свеклоутомления почв (*Rubennudigkeit*). Урожайность «необъяснимо» падает, не реагируя на супердозы удобрений, в засушливый год стремится к нулю, сахарные заводы закрываются... Так было в Германии (60-е годы XIX века), на Украине перед мировыми войнами и в 70-х, 90-х, в регионе «Южный Казахстан-Киргизия» в 80-х. К тому же, упомянутая свекловичная цистообразующая нематода не может считаться «бывшей проблемой», так как даже в отсутствии культуры-хозяина способна десятилетиями сохраняться в почве в состоянии мезабиоза, а то и популяционно обновляться на сорняках. Современное свекловодство РФ получило новый импульс развития преимущественно в регионах, где нематода, увы, давно латентно присутствует - «Воронеж-Белгород», «Краснодар», в меньшей степени заражены почвы региона «Уфа-Казань». Незаражённым остаётся только Алтай, но его доля в валовом производстве невелика (около 2%) и логично было бы сделать его центром отечественного семеноводства, альтернативой привычному импорту семенного материала.

Спектр противонематодных мероприятий наукой СССР (по Украине и Азии), в принципе наработан (Сагитов, 1987) и, к сожалению, ожидал своего часа и для РФ. Однако «стержнем» советских разработок был химический метод, который в настоящее время малопримем не столько даже из «экологических» соображений, сколько экономических.

Именно агротехническим методам суждено сыграть партию первой скрипки в предстоящих битвах с нематодой. Оставляя за скобками стратегическую фундаментальность севооборотов, хотелось бы в рамках данной работы обратиться к оптимизации такого интереснейшего тактического приёма на заражённых площадях, как ранний посев. Остроумно эксплуатируется небольшая, но разница в нижних температурных порогах развития паразита и растения-хозяина (12 и 8<sup>оо</sup>, соответственно). При оптимально низкотемпературной затяжной весне растения успевают миновать самые уязвимые ранние фазы (окрепнуть) ещё до агрессии спящего (пока) инвазионного начала. Но здесь решающую роль играют климатические риски, ибо вполне вероятные заморозки способны погубить молодые ростки, что при массовом выпаде чревато даже пересевом. Зато, если заморозков не случилось, выход урожая может даже двукратно превышать варианты с безрисковым поздним посевом.

Оптимизация агрономического решения возможна с помощью Теории игр, где агроном и природа рассматриваются, как игроки. (Автономность данной задачи отнюдь не ставит под сомнение важность и достоверность существующей системы прогнозов погоды). Простым, но важнейшим принципом является не временная реализация долевого выражения

смешанной стратегии агронома, а одномоментное распределение долей стратегий в структуре посевных площадей. Другими словами – если оптимальная смешанная стратегия для агронома – 90% (стратегия  $X_1$ ) на 10%(стратегия  $X_2$ ), это не означает, что стратегию  $X_2$  необходимо случайным образом использовать раз в 10 лет, ведь достаточно на 90% сельхозугодий применять стратегию  $X_1$ , а на 10% - стратегию  $X_2$ .

В платёжную матрицу  $2 \times 2$  теории игр (Таблица 1) сведены нормированные по единице исходы игры между А (агроном) и П (природа) по 2 стратегии у каждого игрока А ( $X_1$ -ранний посев,  $X_2$ - поздний, безрисковый посев), П ( $Y_1$  - заморозки,  $Y_2$  - отсутствие заморозков). Максимальный выигрыш А:  $a_{12}=1$ , максимальный проигрыш (как раз с затратами на пересев) –  $a_{11}=0,7$ . Различие значений платёжной матрицы во второй строке - при позднем посеве ( $a_{21}=0,9$ ;  $a_{22}=0,8$ ) объясняется фенологией хозяйинно-паразитных отношений условно для «холодной» и «тёплой» весны.

Таблица 1 Платёжная матрица исходов игры Природа/Агроном.

Стратегии		Природа	
		Заморозки	Отсутствие заморозков
Агроном	Ранний посев, $X_1$	$a_{11}=0,7$	$a_{12}=1$
	Поздний посев, $X_2$	$a_{21}=0,9$	$a_{22}=0,8$

Оптимальное решение лежит в области смешанных стратегий:

$$X_1 = \frac{a_{22} - a_{21}}{a_{22} + a_{11} - a_{21} - a_{12}} = \frac{0,8 - 0,9}{0,8 + 0,7 - 0,9 - 1} = 0,25$$

$$X_2 = \frac{a_{11} - a_{12}}{a_{22} + a_{11} - a_{21} - a_{12}} = \frac{0,7 - 1}{0,8 + 0,7 - 0,9 - 1} = 0,75$$

при этом, цена игры:

$$V = \frac{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}}{a_{22} + a_{11} - a_{21} - a_{12}} = 0,85$$

Таким образом, засевая 25% площадей рано, а 75% - поздно, агроном гарантированно имеет цену игры 0,85, тогда как придерживаясь чистой безрисковой стратегии, он гарантированно получит лишь 0,8. Замечательно, что последнее уравнение можно смело заменить на нестрогое неравенство, т.е. вместо « $=$ » использовать « $\geq$ », так как Природа в роли игрока не будет злонамеренно придерживаться оптимальной стратегии, а поступит случайным образом.

Решение ( $X_1/X_2=1/4$ ) иногда называют равновесием по Нэшу, хотя равновесие было установлено до него, просто Д. Нэш впервые доказал, что в смешанных стратегиях равновесие всегда существует. Разумным игрокам выгодно сохранять это равновесие, т.к. любое изменение как минимум не улучшает их положения. Решение для платёжной матрицы большей размерности не представляет принципиальной проблемы, так как задача теории игр (для двух игроков!) легко сводится к задаче линейного программирования. Строго говоря – это вообще одна задача (что, конечно же, не означает, что Д. Нэш и Л.В. Канторович получили свои нобелевские награды за одно и то же).

Наши оценки возможности внедрения предлагаемого подхода для более широкого круга агрономических задач, выявили в общем-то два «узких места»: 1) адекватность формализации стратегий А и П. Часто, как и в показанном примере приходится использовать качественные градации типа «сильный-средний-слабый»; 2) адекватность заполнения платёжной матрицы. В очень большом числе случаев элементы матрицы (исходы игры) не имеют статистически достоверного цифрового выражения и приходится полагаться на экспертные оценки. Однако опытные агрономы десятилетиями работающие в конкретном агробиоценозе (хозяйстве) являются идеальными экспертами и вполне понимают задачу и важность оптимизации принимаемых ими рациональных агрономических решений.

## Литература

Сагитов А.О., Перевертин К.А. Фитонематология – сельскохозяйственному производству. – Алма-Ата: Кайнар, 1987. – 184 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ РЕЧНОГО БОБРА (*CASTOR FIBER L.*) В СУБОПТИМАЛЬНЫХ И ПЕССИМАЛЬНЫХ МЕСТООБИТАНИЯХ ЭКОСИСТЕМ МАЛЫХ РЕК

Петросян В.Г.<sup>1</sup>, Голубков В.В.<sup>2</sup>, Завьялов Н.А.<sup>3</sup>, Горяйнова З.И.<sup>1</sup>, Омельченко А.В.<sup>1</sup>,  
Бессонов С.А.<sup>1</sup>, Дергунова Н.Н.<sup>1</sup>, Хляп Л.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*  
[petrosyan@sevin.ru](mailto:petrosyan@sevin.ru)

<sup>2</sup>*Институт системного анализа РАН, Москва, Россия*  
[golvic@isa.ru](mailto:golvic@isa.ru)

<sup>3</sup>*Государственный природный заповедник «Рдейский», Холм, Новгородская область, Россия, [zavyalov\\_n@mail.ru](mailto:zavyalov_n@mail.ru)*

**Аннотация:** Представлена параметрическая дискретная (конечно-разностная) по времени математическая модель динамики численности популяции бобров в зависимости от времени и доступности ресурсов на примере особо – охраняемых природных территорий, расположенных в различных лесорастительных зонах: притундровых лесов и редколесной тайги, таежной, хвойно-широколиственных лесов и лесостепной. Показана эффективность применения этой модели для количественного описания динамики численности и характера изменения ресурсов в субоптимальных и пессимальных местообитаниях экосистем малых рек. Выявлены стационарные решения и проведен анализ их устойчивости.

**Введение.** Широкомасштабное расселение бобров на территории СССР было особенно активным в 1950–1970-е гг. В эти годы на территории бывш. СССР было расселено более 15 тыс. европейских бобров и более 800 канадских (Речной бобр..., 2012). Интродукция бобров на территории заповедников интересна тем, что известны места выпуска, количество, пол и возраст выпущенных животных; организованы их охрана и учеты; проводится мониторинг состояния окружающей среды. Изучение временной динамики локальных популяций бобра в заповедниках России, расположенных в различных природных зонах, с разными уровнями кормовых ресурсов, различными параметрами гидрологических сетей, наличием или отсутствием крупных хищников и др. экологических факторов, позволит получить количественную характеристику общей картины процесса восстановления этого вида в России.

**Основная цель работы** – получить модельные оценки долговременного развития бобровых популяций от вселения (с 1936, 1946-1948 гг.) до наших дней в разных природных зонах Европейской части России, количественно охарактеризовать современное состояние популяции и дать прогноз возможных дальнейших путей развития этих популяций.

**Методика исследований.** С учетом ограниченности ресурсов и предположений, рассмотренных в работе (Petrosyan et al., 2013) была построена следующая параметрическая дискретная по времени модель, описывающая численность бобров и доли активного, потенциального и деградированного ресурсов по времени:

$$P_{k+1} = P_k + F\left(\frac{R_k^{(a)}}{P_k}, q_1, q_2, q_3, q_4\right) P_k, \quad R_{k+1}^{(a)} = R_k^{(a)} - q_6 P_k + q_5 R_k^{(p)}$$

$$R_{k+1}^{(p)} = R_k^{(p)} - q_5 R_k^{(p)} + q_7 R_k^{(d)}, \quad R_k^{(d)} = 1 - R_k^{(a)} - R_k^{(p)}$$

$$F(x, q_1, q_2, q_3, q_4) = q_2 + (q_1 - q_2) \frac{x - q_3}{\sqrt{q_4^2 + (x - q_3)^2}};$$

$$P_k = P(t_k), R_k^{(a)} = R^{(a)}(t_k), R_k^{(p)} = R^{(p)}(t_k), R_k^{(d)} = R^{(d)}(t_k), t_{k+1} = t_k + \Delta t, k = 1, 2, 3, \dots; \Delta t = 1; k=1, 2, 3, \dots;$$

где  $P_k$ ,  $R_k^{(a)}$ ,  $R_k^{(p)}$  и  $R_k^{(d)}$  - соответственно численность бобров, уровни активных,

потенциальных и деградированных ресурсов (в относительных единицах) в момент  $t_k$ ,  $F(\square)$  - коэффициент прироста численности бобров;  $P_1, R_1^{(a)}$  и  $R_1^{(p)}$  - значения численности бобров, активного и потенциального ресурсов соответственно в начальный момент времени  $t_1$ ,  $q_1$  - предельное значение коэффициента прироста численности бобров;  $q_2$  - значение коэффициента прироста численности бобров;  $q_3$  - уровень активного ресурса, приходящегося на одного бобра, необходимого для нормального существования популяции;  $q_4$  - параметр, определяющий крутизну функции  $F(\square)$  в точке перегиба,  $q_5$  - доля потенциального ресурса, которая переходит за год в активное состояние;  $q_6$  - доля активного ресурса, потребляемая за год одним бобром;  $q_7$  - доля деградированного ресурса, которая переходит за год в потенциальное состояние.

**Анализ результатов.** Обобщение результатов модельных оценок позволило выделить 5 стадий развития популяций на территории шести изучаемых заповедников: 1—начальная стадия медленного роста численности, 2—стадия быстрого нарастания численности, 3—флуктуация на уровне высокой или средней численности, 4—снижение численности, 5—флуктуации на уровне, определяемым всем комплексом факторов характерных для данной местности. Предлагаемая концептуальная модель долговременной динамики численности бобровой популяции имеет наглядную интерпретацию для различных скоростей восстановления кормовых ресурсов. Например, при высокой скорости возобновления кормов возможны длительные флуктуации на высоком уровне численности. Такой характер (*первый тип*) динамики численности животных был показан для популяций Окского, Хоперского, Дарвинского и Центрально-Лесного заповедников, которые характеризуются субоптимальными местообитаниями. Утверждается, что при среднем или медленном восстановлении кормов в пессимальных местообитаниях, после достижения первого пика численности следует спад, затем флуктуации на уровне средней или низкой численности. Второй тип поведения численности отмечается в Приокско-Террасном заповеднике, на территории которого динамика численности бобра характеризуется стремлением к стационарному состоянию при наличии квазипериодической составляющей с периодами от 14 до 26 лет. Квазипериодичность динамики объясняется многократным заселением и расширением зоны кормодобывания от 50 м до 180 метров от берега малой реки. Третий тип поведения численности с флуктуацией на низком уровне был отмечен в Лапландском заповеднике. Для этого типа динамики доли активного, потенциального и деградированного ресурсов составляют 2.6, 96 и 1.4 %% соответственно, т.е. низкая численность животных обусловлена интенсивным изъятием из древостоев основных кормовых пород и развитием малопригодных для корма растений в бобровых местообитаниях. Есть гипотеза о том, что второй и третий типы поведения, по-видимому, будут отмечаться чаще и на большей части ареала бобра. Дальнейшее развитие бобровых популяций на территориях изучаемых заповедников будет зависеть от функциональных (скорости восстановления кормов, масштабов и скорости развития черноольшаников в заброшенных бобровых местообитаниях) и случайных (морозных зим, зимних паводков и засух) факторов.

*Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-04-06423 и программы ОБН РАН «Рациональное использование биологических ресурсов России: Фундаментальные основы управления».*

## Литература

Речной бобр (*Castor fiber* L.) как ключевой вид экосистемы малой реки (на примере Приокско-Террасного государственного биосферного природного заповедника) //ред. Дгебуадзе Ю.Ю., Завьялов Н.А., Петросян В.Г. М : Т-во научных изданий КМК, 2012. 152 с. ISBN 978-5-87317-873-5

Petrosyan V. G., Golubkov V. V., Goryainova Z. I., Zav'yalov N. A., Al'bov S. A., Khlyap L. A., Dgebuadze Yu. Yu. Modeling of the Eurasian beaver (*Castor fiber* L.) population dynamics in the basin of a small Oka river tributary, the Tadenka river (Prioksko Terrasnyi Nature Reserve). Russian Journal of Biological Invasions. 2013, 4 (1) PP. 45 – 53

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ КРИТЕРИЕВ СОГЛАСИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА БИОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА BIOSYSTEM OFFICE

Петросян В.Г., Бессонов С.А., Дергунова Н.Н., Омельченко А.В.

*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*  
[petrosyan@sevin.ru](mailto:petrosyan@sevin.ru)

**Аннотация:** Представлен сравнительный анализ мощности статистических критериев согласия, предназначенных для анализа номинальных, порядковых, интервальных данных и данных отношений с использованием пакета программ *Biosystem office*. Показано, что критерии Пирсона и Ватсона являются наиболее мощными для анализа номинальных, порядковых и сгруппированных данных, а Андерсона-Дарлинга и Шапиро-Уилка для анализа непрерывных данных. Рассмотрены функциональные возможности *Biosystem office* для решения типовых задач по анализу биологических данных.

### Введение

В 2002 г. в России был разработан отечественный стандарт ГОСТ Р ИСО 5479–2002, который является аналогом международного стандарта ISO 5479–97» (ГОСТ Р ИСО 5479, 2002). Хотя этот стандарт, включает многие параметрические и непараметрические критерии согласия, тем не менее, он не охватывает значительную часть критериев, которые используются во всем мире. В настоящее время в статистической литературе имеются около 40 популярных тестов согласия (Dufour и др., 1998, Лемешко, 2005). Первый из них был предложен в 1895 г. К. Пирсоном ( $\chi^2$ ). Этот критерий сейчас также широко используются из-за его универсальности - он приложим к дискретным и непрерывным распределениям, одномерным и многомерным данным. Из всех критериев важное место занимают критерии проверки нормальности. Принадлежность экспериментальных данных нормальному закону является необходимой предпосылкой для корректного применения большинства классических методов математической статистики. Например, предположение нормальности лежит в основе многих статистических процедур, таких как t-тесты, дисперсионный, линейный регрессионный и дискриминантный анализ. При нарушении этого предположения применение классического аппарата может приводить к неверным выводам. Наш анализ позволяет утверждать, что ограниченность набора критериев, включенных в стандарт без должного анализа, не позволяет пользователям выбрать наиболее предпочтительный критерий для применения в зависимости от альтернативных гипотез, объемов выборок и принятого уровня мощности критериев. Хотя некоторые недостатки и преимущества популярных критериев достаточно подробно рассмотрены в литературе, тем не менее ответы на многие вопросы, указанные выше в современной литературе отсутствуют.

**Основная цель работы** – комплексный сравнительный анализ критериев согласия, применяемых для номинальных, порядковых, интервальных данных и данных отношений, а также разработка рекомендаций по их применению для анализа биологических данных с использованием оригинального пакета *Biosystem office*.

### Методика исследований

Анализ сравнения мощности критериев согласия Пирсона ( $\chi^2$ ), Колмогорова-Смирнова ( $D_{\max}$ ), Крамера-фон Мизеса-Смирнова ( $W_d$ ), Ватсона ( $U_d$ ) и Андерсона – Дарлинга ( $A_d$ ) для дискретных данных был проведен на примере проверки простой гипотезы равномерности при следующих альтернативных распределениях – монотонно-возрастающего, ступенчатого, треугольного, плосковершинного, островершинного и бимодального. В процессе вычислительных экспериментов использовали выборки с

размерами  $N=10, 20, 30, 50, 100, 200$ . Анализ критериев согласия Фросини (Fr), Шапиро-Уилка (SW), Колмогорова-Смирнова (D), Купера, (V), Крамера фон-Мизеса – Смирнова (W), Ватсона (U), Андерсона-Дарлинга (A), Пирсона ( $\chi^2$ ) для непрерывных данных проведен на примере проверки на нормальность для трех типов альтернативных распределений  $H_1$  (обобщенное нормальное распределение),  $H_2$  (распределение Лапласа),  $H_3$  (логистическое распределение). Размеры выборок составляли 10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300. Для сравнения мощностей использовались  $N=10^5$  случайных выборок для непрерывных и дискретных данных соответственно сгенерированных из 9 вышеуказанных типов распределений. Проверка гипотез проводилась для уровней значимости  $\alpha = 0.05$  и  $\alpha = 0.1$ . Для итоговой оценки мощности критериев использовалась следующая процедура ранжирования. Ранг 1 получает критерий с наивысшей мощностью, в то время как ранг 8 (для непрерывных данных) или 5 (для дискретных данных) были даны критериям, которые имели самые низкие мощности. Эти ранги для каждого критерия с учетом размеров выборок и уровней значимости затем суммировались для получения общего итогового ранга. Поскольку наименьший ранг был присвоен критерию с наибольшей мощностью, поэтому критерий, который имеет низкий общий ранг, считается как наилучший тест проверки нулевой гипотезы. Статистический анализ выполнен с помощью пакета программ Biosystem office (Петросян, 2014).

### Анализ результатов

Анализ мощности критериев для дискретных данных показал, что хотя не существуют критериев, которые можно предложить в качестве наилучшего, тем не менее, установлено, что критерии Андерсона – Дарлинга является наиболее мощным для монотонно возрастающего альтернативного распределения, Крамера-фон Мизеса-Смирнова и Колмогорова-Смирнова - для ступенчатого распределения, Ватсона - для треугольного, плосковершинного и островершинного типов распределений, а критерии Пирсона - для бимодального распределения. Анализ критериев, предназначенных для непрерывных данных показал, что среди 8 рассмотренных тестов критерии Андерсона-Дарлинга и Шапиро-Уилка являются наиболее мощными критериями для различных типов альтернативных распределений и размеров выборок, тогда как критерии Колмогорова-Смирнова и Пирсона являются наименее мощными. На рисунке 1 представлен суммарный ранг мощности сравниваемых критериев, используемых для разных типов данных.

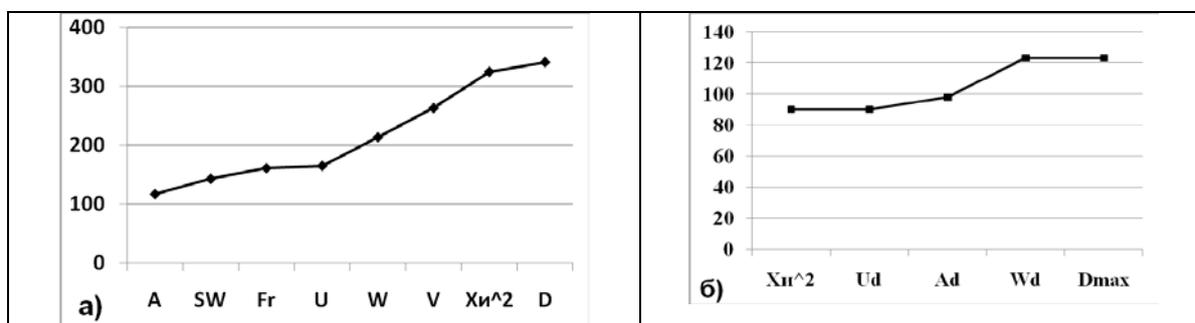


Рисунок 1. Суммарный ранг мощности 8 критериев согласия для непрерывных данных (а) и 5 критериев для дискретных данных (б) при проверке на нормальность и равномерность соответственно при 9 альтернативных распределениях (где по оси Y-ранг, X-критерии).

Наши исследования, а также другие литературные данные показывают, что мощность критериев нормальности достаточно низка для небольших размеров выборки (30 и ниже).

*Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-04-06423 и программы ОБН РАН «Рациональное использование биологических ресурсов России: Фундаментальные основы управления».*

## **Литература**

- ГОСТ Р ИСО 5479–2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 30 с.
- Dufour J.M., Farhat A., Gardiol L., Khalaf L. Simulation-based Finite Sample Normality Tests in Linear Regressions. *Econometrics Journal*. 1998. Vol. 1, pp. 154-173.
- Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б. Сравнительный анализ критериев проверки отклонения распределения от нормального закона // *Метрология*. – 2005. – № 2. – С. 3–24.
- Петросян В. Г. Интегрированная система управления базами данных и статистического анализ биологических данных - Biosystem office. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, Номер свидетельства- 2014663194, Дата регистрации – 18 декабря 2014г.  
([http://www1.fips.ru/fips\\_serv1/fips\\_servlet?DB=EVM &DocNumber=2014663194&TypeFile=html](http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=EVM &DocNumber=2014663194&TypeFile=html))

## ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИ ЭКОСИСТЕМЫ ЗОНЫ АПВЕЛЛИНГА РАЙОНА ЦЕНТРАЛЬНО-ВОСТОЧНОЙ АТЛАНТИКИ

Подгорный К.А.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Калининград, Россия  
[kapborok@mail.ru](mailto:kapborok@mail.ru)

**Аннотация:** Построение моделей водных экосистем, в которых необходимо осуществить сопряжение гидрохимических и биологических процессов, происходящих на нескольких трофических уровнях, представляет значительные трудности. В данной работе рассмотрен подход к построению имитационной модели экосистемы зоны апвеллинга района ЦВА, которая позволяет исследовать пространственно-временную динамику и структуру многовидового сообщества рыб.

В структурном отношении модель экосистемы зоны апвеллинга района ЦВА будет состоять из нескольких базовых блоков. Основное внимание на данном этапе работы уделено описанию наиболее важных структурных особенностей биологического блока модели экосистемы зоны апвеллинга района ЦВА – пространственно однородной подмодели *N–P–Z–D–Fishes*. Учет пространственных эффектов потребует применения трехмерного термогидродинамического блока, который необходим для расчета пространственно-временной структуры течений, тепловых потоков в приводном слое атмосферы, температуры, солености и плотности воды, корректного описания процессов переноса растворенных и взвешенных веществ, а также миграций рыб. На сегодняшний день в качестве трехмерной гидродинамической модели для расчета пространственно-временной структуры течений в зонах апвеллинга наиболее широкое практическое распространение получила модель ROMS (The **R**egional **O**ceanic **M**odeling **S**ystem). Выбор достаточно простой по структуре четырехкомпонентной модели планктонной системы (*N–P–Z–D*-модели (Подгорный, 2012)) обусловлен качеством и количеством тех данных гидрохимических и гидробиологических наблюдений, которые в настоящий момент времени имеются в базе данных АтлантНИРО.

Теоретической основой при выборе структуры и построении многовидовой модели *N–P–Z–D–Fishes*, которая описывает основные процессы в экосистеме зоны апвеллинга района ЦВА, послужили работы (Fennel, 2008; Fennel, 2009) и имеющийся некоторый опыт практического использования данного подхода (Fennel, 2010; Radtke et al., 2013). Модельная структура пищевой цепи рыб в районе зоны апвеллинга ЦВА, которая показана на рисунке 1, была выбрана по результатам исследований, обобщенных в работе (Доманевский, 1998).

Переменные состояния модели для биомассы  $\mathbf{B}^j$  и количества особей  $\mathbf{N}^j$  представляют собой векторы биомассы и численности для заданного числа  $n_j$  классов по биомассе. Значения индекса  $j$  в модели меняются от 1 до 6:  $j=1$  относится к сардине (*Sardina pilchardus*);  $j=2$  – к круглой сардинелле (*Sardinella aurata*);  $j=3$  – к плоской сардинелле (*Sardinella maderensis*);  $j=4$  – к европейской ставриде (*Trachurus trachurus*);  $j=5$  – к западноафриканской ставриде (*Trachurus trecae*) и  $j=6$  – к восточной скумбрии (*Scomber colias*). Динамика переменных  $\mathbf{B}^j$  и  $\mathbf{N}^j$  задается в модели следующей системой эволюционных уравнений:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{B}^j = (\mathbf{G}^j - \mathbf{M}^j + \mathbf{O}^j + \boldsymbol{\tau}^j) \cdot \mathbf{B}^j; \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}\mathbf{N}^j = -\mathbf{M}^j \cdot \mathbf{N}^j + (\boldsymbol{\tau}_N^j + \mathbf{O}_N^j) \cdot \mathbf{B}^j, \quad (2)$$

где

$$\mathbf{B}^j = \begin{pmatrix} B_1^j \\ \vdots \\ B_{n_j}^j \end{pmatrix}, \mathbf{N}^j = \begin{pmatrix} N_1^j \\ \vdots \\ N_{n_j}^j \end{pmatrix}. \quad (3)$$

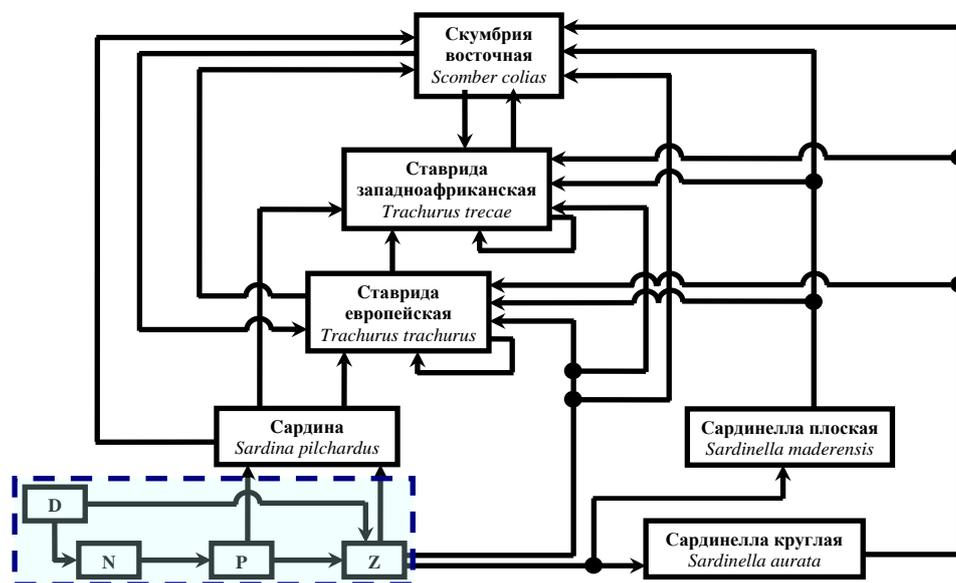


Рисунок 1. Модельная структура пищевой цепи рыб в районе зоны апвеллинга ЦВА.

В формуле (1) диагональные матрицы  $\mathbf{G}^j$  задают эффективные скорости роста рыб, которые рассчитываются в зависимости от максимальных скоростей роста (с коррекцией их значений на температурные условия), лимитирующих функций на условия питания в данный момент времени, трат на обменные метаболические процессы и перехода в детрит части потребленной рыбами пищи в результате процессов экскреции. В формулах (1), (2) диагональные матрицы  $\mathbf{M}^j$  задают эффективные скорости смертности. При этом различают: фоновую скорость смертности; смертность, вызванную недостатком пищи; смертность, обусловленную конкурентными взаимодействиями между рыбами по типу «жертва–хищник»; промысловую смертность, обусловленную выловом рыбы промысловыми судами. В формулах (1) (2) матрицы  $\mathbf{O}^j$  и  $\mathbf{O}_N^j, j = \overline{1,6}$  в модели задают скорости воспроизводства потомства (пополнения; роста биомассы). Для биомассы  $\mathbf{B}^j$  и количества особей  $\mathbf{N}^j, j = \overline{1,6}$  матрицы скорости перехода  $\tau^j$  и  $\tau_N^j$  задают переход рыб из одного размерного (по массе) класса в другой, который осуществляется дискретно во времени (если средняя индивидуальная масса рыбы достигнет верхнего заданного для класса  $i$  предела биомассы).

## Литература

- Доманевский Л.Н. Рыбы и рыболовство в неретической зоне Центрально-Восточной Атлантики. – Калининград: АтлантНИРО, 1998. – 195 с.
- Подгорный К.А. Исследование свойств пространственно однородной математической модели четырехкомпонентной планктонной системы // Математическая биология и биоинформатика, 2012, т. 7, №1, стр. 299–321.
- Fennel W. Towards bridging biogeochemical and fish-production models // Journal of Marine Systems, 2008, v. 71, p. 171–194.
- Fennel W. Parameterizations of truncated food web models from the perspective of an end-to-end model approach // Journal of Marine Systems, 2009, v. 77, p. 171–185.
- Fennel W. A nutrient to fish model for the example of the Baltic Sea // Journal of Marine Systems, 2010, v. 81, p. 184–195.
- Radtke H., Neumann T., Fennel W. A Eulerian nutrient to fish model of the Baltic Sea — A feasibility-study // Journal of Marine Systems, 2013, v. 125, p. 61–76.

## **ДИНАМИКА ЗАПАСОВ И ПУЛА ДОСТУПНОГО АЗОТА В СОСНЯКАХ СЕРЕБРЯНОБОРСКОГО ЛЕСНИЧЕСТВА: МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ С УЧЕТОМ ВКЛАДА АТМОСФЕРНЫХ ВЫПАДЕНИЙ**

Припутина И.В., Шанин В.Н., Комаров А.С.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук, Пущино, Россия*

[irina.priputina@gmail.com](mailto:irina.priputina@gmail.com)

**Аннотация:** Представлены результаты ретроспективных модельных оценок динамики запасов и доступного пула азота в сосняках Серебряноборского лесничества за период 1950-2000-х гг. Расчеты выполнены с использованием системы моделей EFIMOD-ROMUL и двух сценариев поступления азота из атмосферы (фоновый и повышенный уровни). В модельном эксперименте выявлено влияние азота атмосферных выпадений на интенсивность эвтрофирования лесов.

### **1. Введение**

Из литературы хорошо известно об увеличении почвенного богатства в ходе сукцессионной смены растительного покрова и поступательного развития аккумулятивных горизонтов почв с повышенным содержанием органического вещества. Этот процесс, характерный и для лесных почв, был назван биологической эвтрофикацией (Чертов, Разумовский, 1980). Одновременно, этот термин и его синонимы (эвтрофикация, эвтрофирование) используются для характеристики процессов, связанных с влиянием на природные экосистемы соединений азота, поступающих в окружающую среду в результате хозяйственной деятельности человека (применения минеральных удобрений, интенсивного животноводства и техногенной эмиссии NO<sub>x</sub>). Ранее, по данным геоботанических наблюдений и фитоиндикации было показано повышение в последние 40-50 лет доступности азотного питания в лесах Подмосковья, что связывалось как с природными, так и антропогенными факторами (Маслов, 1998; Рысин и др., 2003; Припутина и др., 2015). Целью данной работы была модельная оценка влияния одного из возможных факторов – азота атмосферных выпадений – на динамику запасов и пула доступного азота в лесных биогеоценозах столичного региона.

### **2. Объекты и модельные сценарии**

Объекты модельного эксперимента – сложные сосняки Серебряноборского лесничества, произрастающие на дерново-слабоподзолистых почвах легкого гранулометрического состава, сформировавшихся на аллювиальных террасах р. Москва. Данные почвы характеризуются маломощной лесной подстилкой и пониженным содержанием углерода и элементов питания. Характеристики модельных древостоев взяты из работы (Рысин и др., 2003). Возраст сосны на начало наблюдений (в 1957-1961 гг.) составлял 90-120 лет; второй ярус состоял из липы, березы или дуба; в подросте доминировала липа, в подлеске – лещина или рябина (Рысин, и др. 2003). Несмотря на расположение в границах столичной агломерации, условия функционирования данных лесов близки к естественному развитию. За 50 лет наблюдений существенных изменений в структуре древостоев не произошло (часть деревьев отмерла, а суммарная площадь сечения оставшихся увеличилась). В подросте произошло разрастание липы и рябины, а в напочвенном покрове возросло число видов, требовательных к азотному питанию. Начальные почвенные характеристики (запасы органического вещества и азота) были рассчитаны по данным (Мина, Васильева, 1965).

Для оценки динамики запасов и пула доступного азота в рассматриваемых лесах использована система моделей EFIMOD-ROMUL (Chertov et al., 2001; Komarov et al., 2003). Моделировалось естественное развитие смешанных древостоев за 50 лет при разных уровнях

выпадений азота. В «фоновом» сценарии поступление составляло около  $5 \text{ кг N га}^{-1} \text{ год}^{-1}$  в течение всего модельного периода. Сценарий «повышенных выпадений» совпадал с реальной динамикой поступления азота в 1955-2005 гг., когда уровень изменялся от 5 до 20  $\text{кг N га}^{-1} \text{ год}^{-1}$  с максимумом в 1985-1990 гг. Использование системы моделей EFIMOD-ROMUL позволило проанализировать динамику пулов азота в основных компонентах биогеоценозов (фитомассе древостоя, опаде, лесной подстилке и минеральных горизонтах почв). Помимо суммарных запасов азота, для подстилки и почвы оценивался пул легкодоступных форм, являющихся основным фондом азотного питания растений и определяющих трофность экосистем.

### 3. Результаты и обсуждение

Полученные результаты не выявили заметного накопления азота в компонентах модельной экосистемы в сценарии фоновых выпадений. При сохраняющейся относительно постоянной продуктивности древостоев, запасы органического вещества и азота в фитомассе к концу модельного периода увеличились примерно на 5-10%, а суммарный почвенный пул азота остался практически неизменным. Пул легкодоступного азота, который образуется в почвах при минерализации опада и органического вещества и в течение вегетации может быть использован растительностью, согласно оценкам в среднем равен  $50\text{-}55 \text{ кг N га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ . Эти значения ниже, но сопоставимы с измеренными величинами нетто-минерализации азота, полученными для южно-таежных березняков на легкосуглинистых палево-подзолистых почвах, которые составляли около  $150 \text{ кг N га}^{-1} \text{ год}^{-1}$  (Разгулин, 2012).

Модельные оценки показали закономерный рост продуктивности древостоев и соответствующее повышение запасов С и N в модельной экосистеме при увеличении выпадений азота во втором сценарии, что может свидетельствовать о процессах эвтрофирования. Эти изменения наиболее заметно проявляются после того, как уровень атмосферного поступления азота превысил  $10\text{-}12 \text{ кг N га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ . В зависимости от интенсивности выпадений почвенный пул легкодоступного азота в сценарии повышенных выпадений изменялся от  $55\text{-}60$  до  $80\text{-}90 \text{ кг N га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ . При максимальных нагрузках разница в количестве доступного азота почвы по сравнению с фоновым сценарием составила около  $25 \text{ кг N}$ , что на  $10\text{-}15 \text{ кг}$  больше разницы в уровне выпадений между двумя сценариями. Таким образом, используемая модель адекватно отражает процесс усиления минерализации опада и органического вещества почв при повышении поступления азота в экосистемы. Дополнительным подтверждением этого служит анализ динамики значений C:N в подстилке, для которой получена обратная корреляция с уровнем выпадений азота.

**Благодарности.** Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и Министерства инвестиций и инноваций Московской области (проект №14-45-03610\_Центр).

### Литература

- Маслов А.А. Динамика фитоцено-экологических групп видов и типов леса в ходе природных сукцессий заповедных лесов центра Русской равнины // Бюлл. МОИП. Отд. Биол. 1998. Т. 103(2). – С. 34-43.
- Мина В.Н., Васильева И.Н. Влияние подлеска на лесорастительные свойства почв сложных сосняков // Леса Подмосковья. – М.: Наука, 1965. – С. 43-62.
- Припутина И.В., Зубкова Е.В., Комаров А.С. Динамика обеспеченности азотом лесов Подмосковья: ретроспективные оценки по данным фитоиндикации // Лесоведение. 2015 (принято в печать).
- Разгулин С.М. Минерализация азота в почве высокопродуктивного березняка южной тайги // Лесоведение. 2012. № 1. – С. 65-71.
- Рысин Л.П., Савельева Л.И., Полякова Г.А., Рысин С.Л., Беднова О.В., Маслов А.А. Мониторинг рекреационных лесов. - Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2003. – 168 с.
- Чертов О.Г., Разумовский С.М. Об экологической направленности процессов развития почв // Журнал общей биологии. 1980. Т. 41. №3. – С. 386-396.
- Chertov O., Komarov A., Nadporozhskaya M. (2001) ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // Ecological Modelling 38. – P. 289-308.
- Komarov A., Chertov O., Zudin S. et al. (2003) EFIMOD 2 – a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecological Modelling 170 (2-3). – P. 373-92.

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОХОТНИЧЬИХ ЖИВОТНЫХ ЕВРЕЙСКОЙ АВТОНОМНОЙ ОБЛАСТИ

Ревуцкая О.Л.<sup>1</sup>, Фетисов Д.М.<sup>2</sup>, Фрисман Е.Я.<sup>3</sup>

*ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан, Россия*

<sup>1</sup>[oksana-rev@mail.ru](mailto:oksana-rev@mail.ru), <sup>2</sup>[dfetisov@gmail.com](mailto:dfetisov@gmail.com), <sup>3</sup>[frisman@mail.ru](mailto:frisman@mail.ru)

**Аннотация:** Проведен статистический анализ связей распределения охотничьих млекопитающих и биотопов на территории Еврейской автономной области. На его основе определены закономерности пространственного изменения плотностей животных. Показано, что пространственное распределение животных зависит от размещения и площадей типичных для них биотопов, средних размеров выделов биотопов, степени ландшафтной дробности и обилием границ выделов.

### 1. Введение

Изучение пространственного распределения населения животных и его моделирование является важной задачей в решении вопросов оценки ресурсного потенциала видов, рационального использования и охраны охотничьих ресурсов, сохранения биологического разнообразия. В современных меняющихся условиях среды особое внимание необходимо уделять анализу пространственной изменчивости плотности видов в зависимости от структуры их местообитаний (биотопов). Это связано с тем, что биотопы играют ключевую роль в сохранении и воспроизводстве популяций, поскольку в них реализуются основные этапы жизненного цикла популяций, и фактически, формируется ресурсный потенциал видов.

Целью работы является выявление закономерностей пространственного распределения охотничьих видов млекопитающих на территории Еврейской автономной области (ЕАО) в зависимости от структуры местообитаний и их формализация посредством множественных регрессионных моделей.

### 2. Материалы и методы

Основным источником информации о численности и плотности охотничьих животных являются материалы годовых отчетов по зимним маршрутным учетам, проведенных в период с 2008 по 2012 гг. государственными службами, отвечающих за охрану и использование объектов животного мира в Еврейской автономной области (<http://www.eao.ru/?p=1898>), а также экспертная оценка. Для территории ЕАО была создана карта-схема биотопов в результате дешифрирования космических снимков среднего пространственного разрешения (30 м) со спутника Landsat 7 сенсора ETM+, находящихся в свободном доступе на сервере Американской геологической службы. Их дешифрирование проводилось автоматическим (компьютерным) методом с последующей экспертной обработкой промежуточных картографических материалов. В качестве основных были выделены следующие типы биотопов: гольцы, горный тундры, горельники; хвойные (елово-пихтовые с лиственницей) леса; хвойно-широколиственные, кедрово-еловые леса; смешанные широколиственные леса; дубовые леса; лиственничные леса; мелколиственные леса; луга, в том числе пойменные; мари, болота; освоенные земли.

Для каждого охотничьего хозяйства и особо охраняемой природной территории (ООПТ) были рассчитаны ландшафтные метрики, включающие такие показатели, как площади выделенных биотопов, средняя площадь выдела каждого типа биотопа, индексы ландшафтной дробности и обилия границ. Для выявления взаимосвязи между пространственным размещением популяций охотничьих животных и характеристиками биотопической структуры применялся корреляционный и регрессионный анализ.

### 3. Основные результаты

Согласно результатам количественного анализа реальных данных были построены множественные регрессионные модели зависимости наблюдаемой средней плотности охотничьих видов от показателей, характеризующих биотопическую структуру каждого охотничьего хозяйства и ООПТ. Полученные регрессионные кривые хорошо описывают основные тенденции фактических данных (коэффициент детерминации  $R^2$  варьируется в пределах 0.76-0.99). Отклонения реальных плотностей от расчетных, скорее всего, определяются не учтенными в модели факторами (урожайностью основных кормов, климатическими, перепромыслом и т.д.). В качестве примера на рисунке представлены учетные и модельные распределения плотностей лисицы и бурого медведя по территории ЕАО и приведены уравнения множественной регрессии.

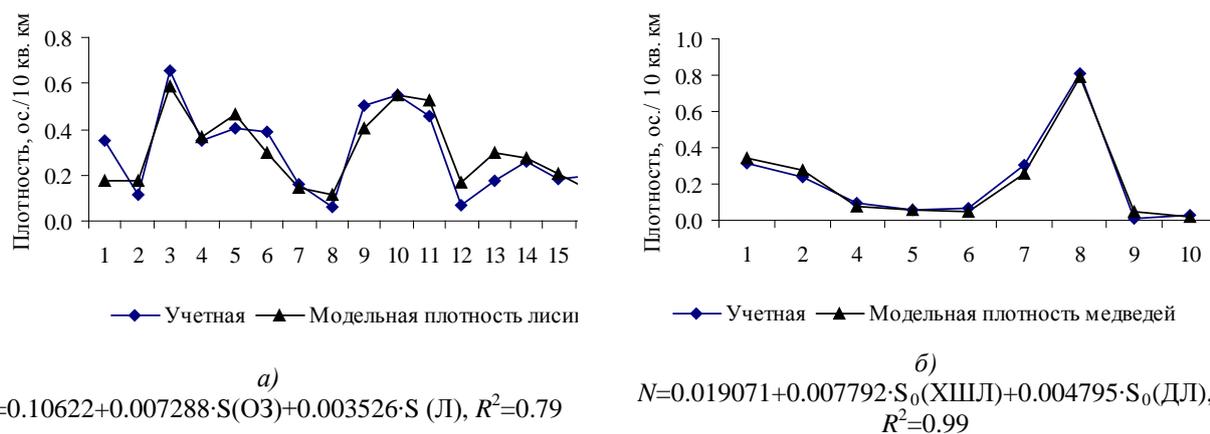


Рисунок. Результаты моделирования и данные учетной плотности популяций ( $N$ ) а) лисицы (факторы: площади освоенных земель  $S(O3)$  и лугов  $S(L)$ ), б) бурого медведя (факторы: средний размер выделов хвойно-широколиственных  $S_0(XШЛ)$  и дубовых лесов  $S_0(ДЛ)$ ). Цифрами отмечены территории охотничьих хозяйств и ООПТ ЕАО

В результате статистического анализа определены общие закономерности пространственного изменения плотностей животных в зависимости от структуры местообитаний. Так, например, наибольшая плотность лисицы наблюдается в тех хозяйствах и ООПТ, где освоенные земли и луга занимают значительные площади и имеют мозаичное распределение, а пространственное распределение бурого и гималайского медведей обусловлено размещением хвойно-широколиственных и дубовых лесов. Показано, что с ростом суммарной площади дубовых лесов и освоенных земель, а также дробности луговых комплексов, увеличивается плотность населения популяции косули. Для других копытных (лося, изюбря и кабана) тесная корреляционная связь прослеживается с площадью как отдельных лесных типов угодий (смешанных широколиственных и дубовых лесов), так и их набором, в частности, суммарной площадью хвойно-широколиственных и дубовых лесов.

Таким образом, для ЕАО статистическими методами продемонстрированы интуитивно понятные закономерности, заключающиеся в том, что географические особенности биотопической структуры, включающие набор биотопов, их пространственное размещение и представленность на территориях охотничьих хозяйств и ООПТ, определяют степень пригодности для обитания и пространственную характеристику популяционных группировок животных. Универсальный характер выявленных закономерностей позволяет использовать анализ значений ландшафтных метрик совместно с рассмотрением других факторов при разработке рекомендаций для создания оптимальных стратегий природопользования региона, бонитировке угодий и определении ресурсного потенциала видов, а также оценки ожидаемого ущерба при промышленном освоении территории.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-29-02658 офи-м.*

## РАЗВИТИЕ МАТРИЧНОЙ МОДЕЛИ ПОПУЛЯЦИИ БЕЛОПЛЕЧЕГО ОРЛАНА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ 2008-2014 ГГ.

Романов М. С.<sup>1</sup>, Мастеров В. Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт математических проблем биологии, Российская академия наук, Пущино, Россия*

[michael\\_romanov@inbox.ru](mailto:michael_romanov@inbox.ru)

<sup>2</sup>*Московский государственный университет, Москва, Россия*

[haliaeetus@yandex.ru](mailto:haliaeetus@yandex.ru)

**Аннотация:** Матричная модель популяции белоплечего орлана, построенная в 2008 г., была усовершенствована и дополнена новыми рядами наблюдений. В новой модели в основу оценки выживаемости положена модель старения Вейбулла; к 2014 г. накоплены дополнительные полевые данные на Сахалине и собран 7-летний ряд наблюдений в Нижнем Приамурье. Моделирование сахалинской популяции подтвердило выводы о вероятном ее сокращении, скорость которого оценивается в 1.6% в год (прежняя оценка — 0.86% в год). Для Амурской популяции также показано сокращение (1.0% в год).

### 1. Введение

В первой версии модели популяции белоплечего орлана *Haliaeetus pelagicus* (Романов, Мастеров, 2008), построенной по данным исследований 2004–2007 гг. на о. Сахалин, сделан вывод, что эффективность размножения орланов недостаточно высока для поддержания популяции. К 2014 г. накоплены новые полевые данные о численности, структуре популяции и продуктивности размножения орланов на Сахалине, что в сумме дало 10 лет наблюдений. Также собран ряд полевых наблюдений в Нижнем Приамурье (2006–2013 гг.). Все это дало возможность усовершенствовать разработанную ранее модель и заново исследовать с ее помощью сахалинскую и нижеамурскую популяции этого вида (Романов, Мастеров, 2014).

### 2. Методы

Основным инструментом моделирования была матричная популяционная модель Лесли (Caswell, 2010). В дополнение к ней построена стохастическая модель, генерирующая разброс значений продуктивности взрослых особей и выживаемости молодых в течение первого года жизни. Вычисления выполнены в среде статистического программирования R.

### 3. Результаты

#### 3.1. Уточнение выживаемости и продуктивности возрастных классов

Выживаемость взрослых особей, как и в первой версии модели, рассчитывалась по таблице дожития близкородственного вида — белоголового орлана, обитающего в Северной Америке (Kohler *et al.*, 2006). Однако здесь мы внесли поправки на массу тела и увеличение смертности в природе (по сравнению с неволей) с помощью модели старения Вейбулла (Ricklefs, 2000), что позволило получить «биологически запрограммированную» кривую выживания, к которой вид эволюционно приспособлен. Особенности биологии белоплечего орлана позволяют упростить эту кривую, заменив ее одним усредненным значением (0.952).

Для оценки выживаемости молодых (1–5 лет) особей использовали значение случайной смертности из модели Вейбулла, предположив, что у них смертность, связанная со старением, пока отсутствует. Соответствующее значение выживаемости равно 0.981.

Выживаемость в течение первого года жизни рассчитывали, как и ранее, итеративным путем, подбирая ее так, чтобы стабильная возрастная структура популяции соответствовала полевым данным: соотношению численности молодых и ювенильных (птенцы) особей.

Продуктивность взрослых орланов на Сахалине составила в среднем 0.22 птенца на взрослую особь в год, на Амуре — 0.23 птенца на особь. Молодые особи не размножаются.

### 3.2. Результаты моделирования

Расчет темпов роста показал сокращение популяций в обеих частях ареала, хотя и с разной скоростью: для сахалинской популяции на 1.6% в год, для амурской – на 1% в год. Помимо основного сценария были рассмотрены дополнительные, моделирующие различные варианты повышения продуктивности или выживаемости: 1) снятие пресса хищничества, 2) вовлечение в размножение популяционного резерва. Их исследование показало, что возможности популяционного резерва для стабилизации темпов роста ограничены. На Амуре стабилизация возможна, но потребует полного вовлечения в размножение популяционного резерва. На Сахалине стабилизация не достигается ни при одном из сценариев. Один из важных выводов модели — предположение о крайне высоком уровне смертности в первый год жизни (83–85%). Но этот вывод нуждается в проверке.

### 3.2 Стохастическая модель

Чтобы оценить возможные траектории дальнейшего развития популяции, построена стохастическая модель, имитирующая чередование сезонов с различными погодными и кормовыми условиями. Плодовитость взрослых и выживаемость в течение первого года жизни перемутировались случайным образом на основе реальных данных (простая выборка с возвращением). Остальные параметры были постоянными. Было выполнено моделирование на 20-летний период с шагом в 1 год. Результаты стохастического моделирования практически совпадают с выводами матричной модели. Несмотря на разброс отдельных траекторий, в среднем численность обеих популяций неуклонно снижается.

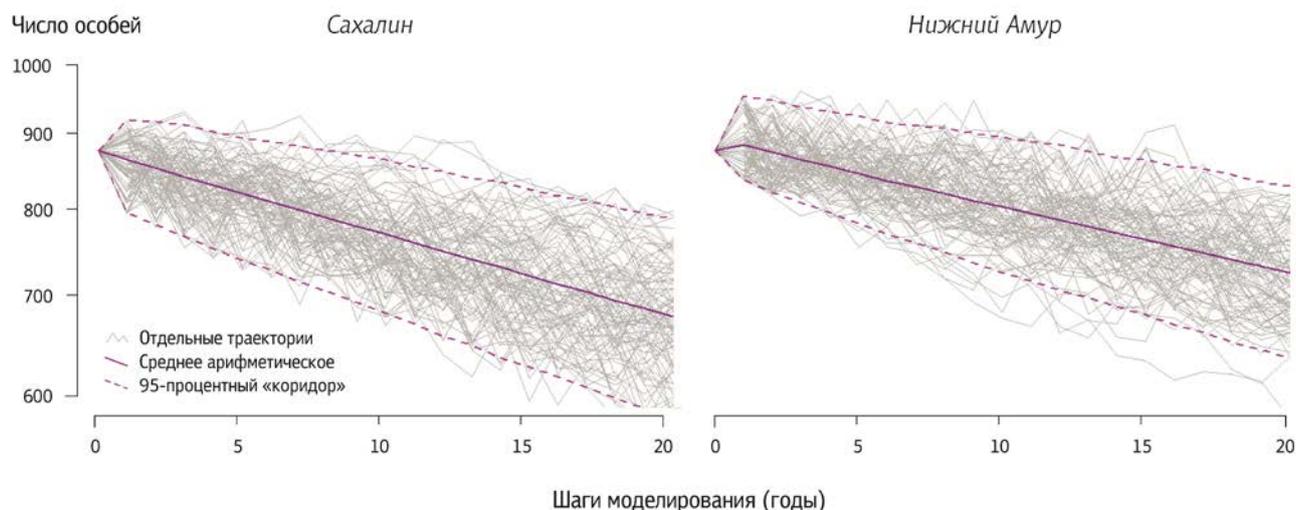


Рисунок 1 - Результаты стохастического моделирования динамики популяции белоплечего орлана на с.-в. Сахалине и нижнем Амуре (по 100 из 10000 траекторий)

## Литература

- Романов М.С., Мастеров В.Б. Матричная модель популяции белоплечего орлана *Haliaeetus pelagicus* на Сахалине. – Математическая биология и биоинформатика. 2008. Т. 3. № 2. С. 36–49. [http://www.matbio.org/downloads/Romanov2008\(3\\_36\).pdf](http://www.matbio.org/downloads/Romanov2008(3_36).pdf) (дата обращения: 07.11.2014).
- Романов М.С., Мастеров В.Б. 2014. Матричная модель популяции белоплечего орлана: усовершенствования и новые данные. – Математическая биология и биоинформатика. 2014. Т. 9. № 2. С. 406–413. URL: [http://www.matbio.org/2014/Romanov\\_9\\_406.pdf](http://www.matbio.org/2014/Romanov_9_406.pdf)
- Caswell H. Matrix Population Models: Construction, Analysis, and Interpretation. Sunderland: Sinauer Associates, 2000. 727 p.
- Kohler I.V., Preston S.H., Lackey L.B. Comparative mortality levels among selected species of captive animals. – Demographic Research. 2006. V. 15. Article No. 14. P. 413–434.
- Ricklefs R. E. Intrinsic aging-related mortality in birds. Journal of Avian Biology. 2000. V. 31. P. 103–111.

## ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗА АНТРОПОГЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ ТУВЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС

Самбуу А.Д.<sup>1</sup>, Аюнова О.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, г. Кызыл, Россия  
[sambuu@mail.ru](mailto:sambuu@mail.ru)

**Аннотация:** В настоящее время с развитием традиционной отрасли народного хозяйства – животноводства, в Туве происходит интенсификация горнодобывающей отрасли, затопление прибрежных экосистем водохранилища, освоение месторождений полиметаллических руд в северо-восточной части Тувы. С реализацией проекта по строительству железной дороги, связывающей Туву с российской сетью железных дорог, в ближайшей перспективе здесь нужно ожидать усиление пресса на растительный покров.

Исследования за антропогенными процессами в растительном покрове степного и лесостепного поясов межгорных котловин Тувы были начаты в 1996 г. Целью исследования является изучение процессов, происходящих в растительном покрове травяных экосистем Тувы, под влиянием меняющихся внешних воздействий с применением ГИС-технологий.

Задачи исследования: изучение процесса влияния выпаса на растительный покров, восстановления растительности залежей, влияния палов и пожаров, затопления и подтопления прибрежной растительности Саяно-Шушенского водохранилища, зарастания угольных отвалов, деградации и демутации растительности при горнодобывающей деятельности.

Процессы, протекающие в растительном покрове Тувы, представляющий своеобразный полигон для изучения трансформации одних экосистем в другие, дают уникальную информацию для моделирования вариантов их эволюции в перспективе.

В результате исследований на отвалах Каа-Хемского угольного разреза выявлены особенности *первичной сукцессии* растительных сообществ, которые зависят от положения сообщества в рельефе. На 40-й год на элювиальной позиции формируется злаково-полынное сообщество, на транзитной – не характерная для степной зоны кустарниковая заросль ив с травяным покровом и напочвенным ярусом из зеленого мха, на аккумулятивной позиции создается злаково-разнотравное сообщество с господством степных видов. Становление растительных сообществ при первичной сукцессии в сухостепной зоне Тувы идет медленно и не по степному, а по смешанному типу (Самбуу, Титялнова, 2014).

Развитие *антропогенной сукцессии*, возникшей в растительном покрове под влиянием работы Саяно-Шушенского водохранилища специфично. Затопление и переувлажнение резко и незакономерно трансформируют растительные сообщества травяных экосистем. К настоящему времени ведущим процессом трансформации растительных сообществ является олуговение и активное внедрение и разрастание сорных видов.

Выпас животных и состояние пастбища находятся в тесной взаимосвязи: на каждое изменение характера выпаса экосистема отвечает сменой составов видов и доминантов. При неизменности воздействия фитоценоз сохраняет постоянный видовой состав, который меняется под влиянием погодных условий.

При *пастбищной дигрессии* происходит упрощение структуры и обеднение видового состава фитоценоза. При резком снижении нагрузки восстановительные процессы идут очень быстро. Из семенного фонда, содержащегося в почве, появляются виды разной экологии и различных местообитаний (степные, луговые, лесные). В начальной стадии демутации одновременно происходят вспышка видовой обилия и постепенное выпадение видов. Два этих процесса со временем приводят к установлению довольно стабильного видового состава. При новом изменении режима выпаса в сторону увеличения нагрузки, вновь начинается деградация травостоя (Титялнова, Самбуу, Шибарева, 2012).

При однократном пале в ходе *пирогенной сукцессии* в начале происходит падение числа видов, а затем идет их быстрое восстановление. По нашим наблюдениям за шесть лет

восстановления сообществ после пала или пожара на участке исходно луговой степи число видов повысилось в 2,6 раза, настоящей – в 1,8, сухой – в 2,3. На горевших участках зарегистрированы виды, устойчивые и неустойчивые к сгоранию. Последние сильно повреждаются огнем, т.к. имеют тонкие, сухие и быстро сгорающие листья или рыхлые и сухие узлы кущения. Характерной особенностью пирогенной сукцессии является отсутствие в травостое сорных видов и низших растений.

В ходе *залежной сукцессии*, которая изучалась нами в течение 17 лет, на различных стадиях закономерно менялись жизненные формы доминирующих видов. Корневищные злаки доминируют наравне со стержнекорневыми или дерновинными на залежах на месте луговой и настоящей степей на всех стадиях сукцессии (Титлянова, Самбуу, 2014).

В настоящее время в результате исследований продолжают работы по построению геоинформационной системы "Геоэкологический мониторинг растительного покрова природных и антропогенных экосистем Тувы" в виде совокупности программных, информационных средств, обеспечивающих ввод, хранение, обработку и интегрированное представление пространственных и соотнесенных с ними атрибутивных данных для комплексной оценки современного состояния и ведения мониторинга за растительным покровом природных и антропогенных экосистем.

## Литература

- Самбуу А.Д., Титлянова А.А. Влияние социально-экономического развития Республики Тыва на ее растительный покров // *Фундаментальные исследования*. № 11 (часть 3), 2014. - С. 550-555.
- Титлянова А.А., Самбуу А.Д., Шибарева С.В. Пастбищная сукцессия в Центральной Азии – фактор природных антропогенных процессов // *Глобальные экологические процессы. Материалы междунар. научной конференции*. Москва, 2012. - С. 100–107.
- Титлянова А.А., Самбуу А.Д. Детерминированность и синхронность залежной сукцессии в степях Тувы // *Известия РАН, Серия биологическая*, № 6, 2014. - С. 621-630.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ ЛАНДШАФТНОГО ПОКРОВА ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РУССКОЙ РАВНИНЫ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СПУТНИКА MODIS

Сандлерский Р.Б.<sup>1</sup>, Пузаченко Ю.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*  
[srobert\\_landy@mai.ru](mailto:srobert_landy@mai.ru), [jruzak@mail.ru](mailto:jruzak@mail.ru)

**Аннотация:** Рассматривается сезонная динамика термодинамических характеристик рассчитанных на основе данных съемки MODIS TERRA для основных типов ландшафтного покрова Русской равнины. Проводится сравнение значений термодинамических переменных рассчитанных по MODIS и Landsat. Показана связь термодинамических переменных с осадками и температурами (данные WorldClim) и что градиенты переменных могут вносить значительный вклад в формирование мезоклимата.

### 1. Введение

В сообщении рассматриваются оценки термодинамических переменных рассчитанных по мультиспектральным измерениям спутника MODIS TERRA (продукт MOD09GA) с пространственным разрешением 500x500 м, по методике, предложенной С.Е. Ергенсеном и Ю.М. Свирежеевым (Jorgensen, Svirezhev, 2004) для юго-западной части Русской равнины (прямоугольник с координатами: левый верхний угол – 59.98°С.Ш., 27.08° В.Д., правый нижний – 46.61 В.Д. 53.70 С.Ш.). Анализ пространственно-временного варьирования поглощенной термодинамических переменных ландшафтного покрова: поглощенной радиации, эксергии (полезная работа ландшафтного покрова, по поддержанию круговорота влаги в биосфере, эвапотранспирация), энтропии и приращения информации Кульбака, и вегетационного индекса NDVI, как показателя отражающего биологическую продуктивность, позволяет выделить типы ландшафтного покрова с различной сезонной динамикой и эффективностью преобразования солнечной энергии. Оценки градиентов основных термодинамических характеристик и изменение их пространственных полей в течение года, в перспективе создают основу для разработки моделей мезоклимата.

### 2. Методы анализа

На основе предварительного анализа термодинамических характеристик для сорока сцен с 2005 по 2013 годы были отобраны 9 сцен с наименьшими облачностью и искажениями: 28 января 2012 г., 9 марта 2011 г., 29 марта 2013 г., 17 апреля 2013 г., 31 июля 2012, 28 августа 2011, 25 сентября 2010, 1 ноября 2005, 18 ноября 2010 г. Термодинамические характеристики рассчитывались по методике, отработанной для других продуктов MODIS (Puzachenko et al., 2011) и съемки Landsat TM, ETM+ (Puzachenko et al., 2013), за исключением теплового потока.

Основные термодинамические переменные девяти сроков были преобразованы методом главных компонент в параметры порядка (Хакен, 2000) термодинамической системы ландшафтного покрова. Так как в различных частях отобранных сцен все же присутствуют облачность и искажения, то информативным для дальнейшего анализа были признаны лишь три первые компоненты, в целом описывающие 57.1% варьирования переменных. Первый параметр порядка (35.7% варьирования), отражает работу системы зимний период, второй (13.3%) – весеннюю, третий (8.2%) – в сентябре. Полученные параметры порядка были подвергнуты дихотомической классификации с различными метриками для выбора метрики дающей наибольшую энтропию и, соответственно, максимально возможное разнообразие состояний. Таким образом, были получены основные типы состояний ландшафтного покрова исследуемой территории: 1 – еловые леса, 2 – сосновые и смешанные леса, 3 – молодые и средневозрастные лиственные леса, 4 – старые

лиственные леса, 5 – болота, 6 – луга лесной зоны, 7 – луга степной зоны, 8 – пашни, земли без развитой растительности, 9 – водоемы. Для основных типов была рассмотрена сезонная динамика термодинамических характеристик. Для территории Центрально-лесного заповедника и его охранной зоны проведен сравнительный анализ относительных значений основных рассматриваемых термодинамических переменных (в процентах от приходящей солнечной энергии) с переменными, рассчитанными по мультиспектральным данным Landsat 5 TM с пространственным разрешением 30x30 м (данные приведены к единому разрешению в 500x500 м).

Так как единовременные с мультиспектральными измерения теплового потока в используемом продукте MODIS отсутствуют, а использование другого продукта с тепловым потоком, измеренным в другое время для расчета связанной энергии (диссипация приходящей энергии с тепловым потоком и энтропией) невозможно, то связанная энергия оценивалась как разность между поглощением и эксергией, нормированными на приходящую солнечную энергию: коэффициент поглощения – коэффициент эксергии. Если коэффициент эксергии имеет физический смысл, то в регионах с высокой эксергией и малой разностью должны быть более низкие температуры и большое количество осадков. Для проверки этой гипотезы термодинамические переменные были сопоставлены с температурами и осадкам из проекта Wordclim (WorldClim..., 2015).

### 3. Результаты

Сезонная динамика термодинамических переменных для основных типов ландшафтного покрова в целом аналогична полученным ранее результатам для других измерительных систем и масштабов (Puzachenko et al., 2011, Puzachenko et al., 2013): максимально активная работа термодинамической системы наблюдается в течение вегетационного периода, а поглощение и эксергия возрастают с ростом общей массы растительности, то есть от пашен и лугов к лиственным, а затем к хвойным лесам. Прямое сопоставление термодинамических переменных для основных типов ландшафтного покрова, рассчитанных по Landsat TM и по MODIS TERRA показало высокую степень подобия измерительных систем, однако, получаемые на основе MODIS оценки, показывают максимальное значение NDVI в хвойных лесах, в то время как по измерениям на основе Landsat в хвойных лесах оно минимально. Можно предполагать, что это связано с эффектом перехода от разрешения Landsat (30x30 м) к разрешению MODIS (500x500 м).

Анализ связи термодинамических переменных с температурой и осадками показал, что поле осадков во времени менее устойчиво и в меньшей степени связано с термодинамическими переменными, чем поле температур. Можно полагать, что пространственная структура термодинамических переменных в течение вегетационного периода в большей степени зависит от изменения регионального поля осадков. Вероятно между ними существует положительный контур обратной связи: большие затраты тепла на испарение в лесной зоне снижают температуры и повышают осадки, а низкие температуры и большие осадки определяют устойчивость функционирования леса.

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФ № 14-27-00065.*

### Литература

- Хакен Г. Принципы работы головного мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: Изд-во Per Se. 2001. 353 с.
- Puzachenko, Y.G., Sandlersky R.B., Svirejeva-Hopkins A. Estimation of thermodynamic parameters of the biosphere, based on remote sensing // Ecol. Model. N 222(16). 2011. 2913-2923 pp.
- Puzachenko, Y., Sandlersky R., Sankovski A., Methods of evaluating thermodynamic properties of landscape cover using multispectral reflected radiation measurements by the Landsat satellite. Entropy. 2013. N 15. 3970-3982 pp.
- WorldClim – Global Climate Data. Free climate data for ecological modeling and GIS <http://www.worldclim.org/> (accessed on 18 March 2015).

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЧВЕ ПРИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИИ

Семенова Н.Н.<sup>1,2</sup>, Орлова Е.Е.<sup>1</sup>, Орлова Н.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

[agro@bio.spb.ru](mailto:agro@bio.spb.ru)

<sup>2</sup>ФГБНУ ВИЗР, Санкт-Петербург, Россия

[vizrspb@mail.ru](mailto:vizrspb@mail.ru)

**Аннотация:** рассматривается математическая модель динамики содержания органического углерода в почвах сельскохозяйственного назначения на основе его разделения на стабильную и лабильную составляющие. На основе этой модели разработан алгоритм определения содержания компонент смеси по известному разложению целого и некоторым предположениям о характере деструкции компонент. Найдены особенности распределения органического углерода между лабильной и стабильной компонентами при нефтезагрязнении.

### Введение

В настоящее время одним из методов анализа динамики органического вещества (ОВ) почв является аппарат современной теории динамических систем. Разработаны различные кинетические модели поведения органического вещества в биокосных системах разного уровня; сложные поликомпонентные модели динамики ОВ, описывающие поведение во времени нескольких (от 4 и более) фракций, связанных друг с другом балансовыми соотношениями. Динамические модели экологических систем используются, как правило, для оценки негативных последствий влияния различного рода антропогенных воздействий (например, нефтезагрязнения) на разных иерархических уровнях. Математическую модель, описывающую воздействие на экологическую систему на уровне почвенного ценоза, следует отнести к низшему иерархическому уровню, однако такая модель необходимый элемент при изучении негативной роли НП и на более высоких уровнях. В данном сообщении рассматривается модель деструкции органического вещества почвы с учетом неравномерности поведения ее лабильной и стабильной частей в рамках предположений о линейности протекающих в рассматриваемой системе процессов, причем линейность предполагается во всех фракциях гумусового вещества, по крайней мере, в начальный период процесса (порядка одного года).

Целью данного сообщения является решение проблемы идентификации параметров модели разложения стабильной и лабильной составляющих органического вещества почвы в предположении что в основном лабильная часть органического вещества почвы представлена фульвокислотами и первой фракцией гуминовых кислот, а стабильная определяется второй и третьей фракциями гуминовых кислот и нерастворимым остатком. Приведенный пример дает возможность найти особенности перераспределения стабильной и лабильной частей органического вещества почвы при нефтезагрязнении.

### Материалы, методы, результаты

Эксперимент проводился на хорошо окультуренной дерново-подзолистой суглинистой почве на карбонатной морене, характеристика которой представлена в работе (Орлова и др., 2013). Образцы почвы для модельного лабораторного эксперимента отбирались с глубины 5 см в конце вегетационного сезона. Описание опыта по нефтезагрязнению и определения фракций органического вещества по вариантам опыта дано в (Орлова и др., 2014)

Методы исследования основаны на предположениях о линейности изменений во всех фракциях органического вещества почвы. Скорости убыли органического углерода по фракциям приведены в таблице 1 (в условиях лабораторного эксперимента притока свежего органического вещества не было), увеличение содержания стабильной части происходит в первый момент загрязнения нефтью. Предполагается также, что лабильная часть гумуса в основном разлагается почвенными микроорганизмами и ввиду ее большей доступности ско-

рость разложения лабильной части на порядок больше стабильной (в рамках кинетики первого порядка). Уравнение модели при этих предположениях имеет вид:

$$C_{\text{общ}}(t) = C_s(t)e^{-I_s(t)} + C_L(t)e^{-I_L(t)} \quad (*)$$

$$I_s = 0.1I_L$$

По соотношениям (\*) была проведена идентификация параметра  $\lambda_L$ , которая показала удовлетворительное соответствие с данными проведенного эксперимента. Проверка модели осуществлялась воспроизведением динамики углерода с привлечением данных о фракционном составе органического вещества почвы по вариантам опыта по нефтезагрязнению.

Таблица 1. Скорости убыли органического углерода дифференцировано по фракциям (%углерода/год).

Уровень загрязненности	Общий углерод (% от почвы) $C_{\text{общ}}$	Фракции гуминовых кислот (ГК) (% от $C_{\text{общ}}$ )			Сумма фульвокислот (ФВ)	Нерастворимый остаток (НО)
		ГК1*	ГК2*	ГК3*		
Первичное загрязнение						
контроль	$-4.4 \cdot 10^{-4} \pm 2 \cdot 10^{-5}$	$-4.9 \cdot 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$3.3 \cdot 10^{-3} \pm 3 \cdot 10^{-4}$	$0.0 \pm 2 \cdot 10^{-4}$	$-1.1 \cdot 10^{-3} \pm 4 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-3} \pm 3 \cdot 10^{-4}$
+1% нефти	$-9.3 \cdot 10^{-4} \pm 3 \cdot 10^{-5}$	$-10^{-2} \pm 5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3} \pm 4 \cdot 10^{-4}$	$0.0 \pm 6 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-3} \pm 7 \cdot 10^{-4}$
+5% нефти	$-4.7 \cdot 10^{-4} \pm 10^{-5}$	$-4.7 \cdot 10^{-3} \pm 4 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-3} \pm 140^{-4}$	$10^{-3} \pm 3 \cdot 10^{-4}$	$-10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$	$5.2 \cdot 10^{-3} \pm 2 \cdot 10^{-4}$
Повторное загрязнение						
контроль	$-4.4 \cdot 10^{-4} \pm 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-3} \pm 4 \cdot 10^{-4}$	$2.1 \cdot 10^{-3} \pm 4 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$-0.2 \cdot 10^{-3} \pm 6 \cdot 10^{-4}$	$0.0 \pm 3 \cdot 10^{-4}$
+1% нефти	$-7.9 \cdot 10^{-4} \pm 4 \cdot 10^{-5}$	$-3.6 \cdot 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-3} \pm 4 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-3} \pm 4 \cdot 10^{-4}$	$-1.4 \cdot 10^{-3} \pm 4 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-3} \pm 7 \cdot 10^{-4}$
+5% нефти	$-6.0 \cdot 10^{-4} \pm 3 \cdot 10^{-5}$	$-3.8 \cdot 10^{-3} \pm 7 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$0.0 \pm 10^{-4}$	$0.0 \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$0.0 \pm 2 \cdot 10^{-4}$

ГК1\*- Iая фракция гуминовых кислот (I=1,2,3)

## Выводы

1. Предложен алгоритм позволяющий определять стабильную и лабильную составляющие органического углерода.
2. Предложенный метод позволил выявить меньшее количество углерода, приходящееся на лабильную часть, при нефтезагрязнении, причем стабильная часть в основном пополняется нерастворимым остатком.
3. Динамика органического углерода демонстрирует усиление процесса разложения при минимальном загрязнении в 1 %, причем независимо от того повторное или первичное загрязнение наблюдается.
4. Необходимо проведение опыта с послойным определением содержания органического вещества по фракциям для почв разных типов и другого гранулометрического состава.

## Литература

- Орлова Е.Е., Кирсанов А.Д., Бакина Л.Г. Особенности применения анализа фракционно-группового состава гумуса при исследовании нефтезагрязненных почв /Наследие И.В. Тюрина в современных исследованиях в почвоведении: Материалы Международной научной конференции. Казань, 15-17 октября 2013. Казань: Изд-во «Отечество», 2013. С. 44-48.
- Орлова Е.Е., Иванова А.В., Лабутова Н.М. Влияние нефтезагрязнения на элементный состав гуминовых кислот дерново-подзолистых почв/ Труды Международной научной конференции «Экология и биология почв, Ростов-на-Дону, 17–19 ноября 2014 г.», Ростов-на-Дону, 2014, С. 335-338.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ХИМИЧЕСКОМ МЕТОДЕ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

Семенова Н.Н.<sup>1,2</sup>, Сухорученко Г.И.<sup>2</sup>, Волгарев С.А.<sup>2</sup>, Долженко О.В.<sup>2</sup>, Зацiorский А.С.<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup>СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

[nnsemenova@yandex.ru](mailto:nnsemenova@yandex.ru)

<sup>2</sup>ГНУ ВИЗР РАСХН, Санкт-Петербург, Россия

[vizrspb@mail333.com](mailto:vizrspb@mail333.com)

**Аннотация:** рассматриваются динамические имитационные модели поведения пестицидов в агробиоценозе и их реализация в виде компьютерных систем. Разработаны компьютерные программы поведения пестицидов в некоторых частях агробиоценоза и программы, оценивающие их экологическую безопасность и эффективность. Определяется место этих компьютерных программ среди программ-аналогов, созданных в различных аграрных университетах-центрах компьютерного моделирования.

Компьютерное моделирование стало одним из основных средств разработки стратегии и тактики применения химических средств защиты растений. В конце 80-х и в 90-е годы прошлого века, когда широко известными стали факты проникновения ряда пестицидов в грунтовые воды и возникновения опасности загрязнения питьевой воды, появилось большое количество математических моделей, оценивающих миграционную активность пестицидов. Особенно остро данная проблема стояла перед Нидерландами, так как именно на ее территории достаточно близко залегают грунтовые воды, а для Европы в целом характерна близость водоемов к сельскохозяйственным угодьям. Именно в эти годы в ВИЗР были разработаны математические модели PESTINS (PESTicide IN Soil) и PESTINL (PESTicide IN Leaves). На базе модели PESTINS была создана одноименная имитационная система, предназначенная для анализа поведения пестицидов в различных климатических зонах с учетом характерных для данной местности метеорологических условий, типов почв и режимов орошения. Использование PESTINS для проведения компьютерных экспериментов давало возможность оценивать пролонгированность действия и экологическую безопасность применяемых препаратов (Семенова и др., 1999). В разработках ВИЗР акцент был сделан на загрязнении почв остаточным количеством пестицидов, так как уровень залегания грунтовых вод в целом по России недостаточно хорошо изучен, а правила внесения пестицидов достаточно жестко регламентируют их применение вблизи открытых водных поверхностей.

Можно выделить два направления развития моделей поведения пестицидов в разных частях агроценозов. Оба направления тесно связаны с процедурой регистрации пестицидов в Европейском союзе (EU). В рамках первого направления было разработано ряд сценариев для оценки их экологической безопасности. Одной из основных моделей, получившей значительное практическое применение стала модель PEARL (Pesticide Emission Assessment at Regional and Local scales), в различных модификациях. В ее создании приняли участие ведущие специалисты крупнейших европейских центров, в первую очередь Нидерландов (Alterra Wageningen UR, RIVM - the Netherlands National Institute for Public Health and the Environment (Dutch: RIjksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu)), занимающихся математическим моделированием (van der Linden et al, 2001). Второе направление связано с разработкой индикаторов (индексов), оценивающих риски применения пестицидов (Tiktak et al 2012).

На сайте моделей пестицидов EU представлен достаточно большой перечень моделей, многие из которых основаны на использовании моделей, разработанных в 80-90-е годы прошлого века. В первую очередь это модифицированная модель PRZM (Pesticide Root Zone Model, Carsel et al., 1984-1998), PESTINS занимает промежуточное положение между моделью PRZM, имеющей прикладной характер и моделью LEACHMP (Leaching Model Pesticide; Hutson and Wagenet 1987-1995), имеющей большую проработку процессов, определяющих

поведение пестицидов в агроценозе. Модель PEARL является по существу модификацией модели PESTLA (Boesten and van der Linden, 1991-1998).

Модели сгруппированы в 3 группы. Первая группа содержит модели, определяющие воздействие пестицидов на окружающую среду. Модель MAPEST, оценивающая временное и пространственное влияние пестицидов на различные популяции беспозвоночных, основана на модели поведенческого характера TOXSWA, которая определяет концентрации пестицидов в поверхностных водах. Вторая модель, входящая в данную группу, PERPEST, оценивает воздействие пестицидов на пресноводные организмы и в основном ориентирована на литературные данные. Модели оценивающие такую интегральную характеристику, как риск применения пестицидов, в основном принадлежат ко второму направлению создания моделей, т.е. к моделям, использующим в своих алгоритмах индексы риска применения пестицидов. В описание данного направления включены три программы: HARE (HARmonizid environmental Indicators for pesticides risk), использующая индикаторы, пригодные при оценке пестицидов применяющихся в сельском хозяйстве стран EU; NMI 3 – модель, также использующая индикаторы, но специфические для Нидерландов. Модель PRIMET (Pesticides Risks in the tropics to Man, Environment and Trade) используется для развивающихся стран (в качестве примера на сайте приведена Эфиопия). Остальные 5 "поведенческих (fate)" моделей: уже упоминавшиеся PEARL, имитирующая поведение пестицидов в почве – для оценки проникновения в грунтовые воды; TOXSWA, - для оценки токсичности препаратов, а также две модели Cascade и Droplet – для оценки поведения пестицидов в поверхностных водах и модель SWASH, (Surface Water Scenarios Help) необходимая при калибровке сценариев различного уровня в компьютерной оболочке FOCUS, которая в первую очередь создавалась для проведения компьютерных экспериментов на основе имитационной модели PEARL. В этой оболочке могут решаться проблемы связанные с применением пестицидов, как на локальном, так и на региональном уровнях. Отметим, что вычисления по модели Cascade соответствуют шкале в  $10\text{км}^2$ .

В ВИЗР разработаны индексы пестицидной нагрузки на почву за вегетационный период. Эти индексы включают некоторые обобщенные характеристики почвенно-климатических условий, а также широкий набор экотоксикологических параметров, характеризующих процессы транслокации и деградации пестицидов, и позволяют рекомендовать к применению наиболее безопасный пестицид (Семенова и др., 2012). На этих индексах основаны алгоритмы компьютерных программ PESTLOAD и PESTOPTIMA.

**Выводы.** 1. Оценка экологической опасности пестицидов на основе моделей их поведения проводилась на первом этапе разработки процессных моделей в 80-90ые годы XX века. Этому соответствует создание в ВИЗР моделей PESTINS и PESTINL. 2. Математические модели являющиеся обобщением моделей локального уровня (например, разработанные в ВИЗР программы PESTLOAD и PESTOPTIMA) дают возможность решать проблемы применения пестицидов на региональном уровне. Создание оболочки FOCUS позволило вывести процесс регистрации пестицидов в EU на автоматизированный, качественно более высокий, но менее затратный уровень.

## Литература

- Boesten, J.J.T.I. and A.M.A. van der Linden, 1991. Modeling the influence of sorption and transformation on pesticide leaching and persistence. // *J. of Environ. Qual.* 20: 425-435.
- Carsel R.F et al. User's manual for the pesticide root zone model: Release 1. -U.S. Environmental Protection Agency, 1984. EPA-600/3-84-109.
- Hutson J.L., Wagenet R.J. LEACHMP: A model for simulating the leaching and chemistry of solutes in the plant root zone. -New-York State Agric. Exp. Stn. Search Series. 1987. 117 p.
- Leistra M., van der Linden A.M.A., Boesten J.J.T.I., Tiktak A. and van den Berg F. PEARL model for pesticide behaviors and emissions in soil-plant systems: description of the processes. 2001, Alterra Rep 13, Wageningen University and Research Centre, Wageningen University. 115 pp

- Tiktak A, Hendriks RFA, Boesten JTTI (2012). Simulation of pesticide leaching towards surface water in a pipe-drained clay soil in the Netherlands. *Pest Manag. Sci.* 68: 290-302
- Семенова Н.Н., Новожилов К.В., Петрова Т.М., Терлеев В.В. Детерминированные модели поведения пестицидов в почве. Методология построения, структура, принципы, использования. СПб.- Пушкин: ВИЗР РАСХН. 1999. 92с
- Семенова Н.Н., Новожилов К.В., Сухорученко Г.И. Оценка локального риска применения пестицидов с использованием метода анализа иерархий// Вестник защиты растений 2012. №3. С. 3-9.

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И КРАТНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ БИООТХОДОВ НА МОЛОЧНЫХ ФЕРМАХ

Сидорова В.Ю.

<sup>1</sup>ФГБУН ВНИИМЖ, Москва, Россия  
 gdi20071@yandex.ru

**Аннотация.** Статья представляет собой один из вариантов исследования свойств моделей с изменяемыми параметрами на примере изучения кратности образования биоотходов в молочном животноводстве

Экологическое состояние окружающей среды перестало быть безопасной областью разведения животных. Сроки их производственного использования значительно сокращаются из-за поглощения огромных объемов воды и кормов, загрязненных окислами азота, углерода, пыли, токсичными соединениями тяжелых металлов (Сидорова, 2014).

Среди основных загрязняющих веществ: производственные: зола и углекислый газ от котелен на твердом или дизельном топливе; аммиак – от деятельности машинно-тракторного парка, навозохранилища, овощехранилища, фекальных очистных сооружений; бензол – от деятельности столярного цеха, древесная пыль – от деятельности столярного цеха; - бытовые: твердые бытовые отходы. Животные, испытывая негативное воздействие окружающей среды, сами по себе также являются источниками заражения и загрязнения, как это видно на рисунке 1.



Рисунок 1 - Схема загрязнения животноводческого предприятия

Для наиболее полного учета биоотходов, выделяемых животными, мы воспользовались экологическим вариантом генетико-технологической модели по эксплуатации молочного предприятия, показанном на рисунке 2.



Рисунок 2 - Экологическая характеристика основных факторов предприятия по производству молока

Производственные операции, связанные с выделением биоотходов по классам экологической опасности, показаны контрастными цветами (зеленый – 4 класс, желтый – 3 класс, оранжевый – 2 класс, красный -1 класс).

Применяя эколого-технологическую модель с изменяемыми параметрами можно определять количество образующихся биоотходов по видам, в том числе на перспективу, для поиска наилучших решений их возможной утилизации, как это видно на таблице 1.

Таблица 1. Модель образования биоотходов

Количество животных (п)	Количество образования в сутки, кг (к)	Период образования, сут. (d)	Итого, кг (z)
25	40	180	180 000
22	40	390	343 200
17	15	90	22 950
40	20	90	72 000
$\Sigma$ 104	$\Sigma$ 115	$\Sigma$ 750	618 150

Математическое выражение модели ( $n*k*d$ ); для нахождения общего количества это выражение необходимо повторить  $i$  число раз. Все параметры изменяемые, прямо или опосредованно связанные друг с другом; вместо значения «115» может быть включен индикатор кратности биоотходов ( $x = z / \Sigma n * \Sigma d$ ). То есть  $\Sigma n * \Sigma d$  будет равна  $z$ , в том числе, если третий сомножитель равен  $x$ .

Все показатели значений количества животных ( $n$ ) – изменяемые параметры, находящиеся в числовом промежутке от  $\Sigma n = 1$  до ...  $j$ -го числа, но практически от 1 до 250...300. Все показатели количества дней (суток) периода - изменяемые параметры, находящиеся в числовом промежутке от  $\Sigma d = от 1 до ... g$ -го числа, но практически от 1 дня до 180-360. По величине значения  $x$  (кратности образования биоотходов), можно судить об интенсивности их образования, для того, чтобы принять меры к их своевременной утилизации.

Кратность образования биоотходов непосредственно связана с показателем суточной нормы (начальным уровнем) образования отходов. Это – дискретная величина, и выражается в отдельных средних значениях: 80 кг – для коров, 120 кг – для быков-производителей, 40 кг – для молодняка, и 15 кг – для телят. По величине  $x$  – кратности образования биоотходов, можно сделать приблизительные расчеты величины образования биоотходов на перспективу:  $z = \Sigma n * \Sigma d * x$ , моделируя ситуацию по всем показателям, кроме  $x$  (рисунок 3).

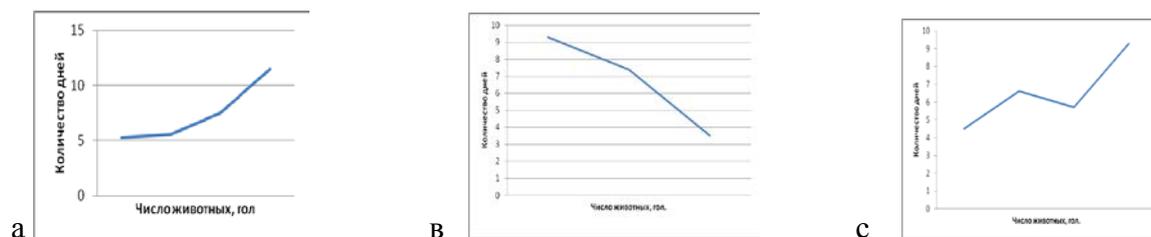


Рисунок 3. Показатель уменьшения одного из параметров модели при: а. Одновременном увеличении двух других; в. Одновременном уменьшении двух других; с. Одновременном увеличении и уменьшении двух других

Установлено, что при величине  $x$  от 3.5 до 7.5 – интенсивность высокая, и следует принимать меры по изысканию дополнительных источников утилизации, а от 8.5 до 29.5 – интенсивность образования низкая, и можно продолжать использовать универсальный, принятый в хозяйстве метод разгрузки навозохранилищ. При известной величине кратности образования биоотходов ( $x$ ) рассчитывают величину их образования на перспективу.

## Литература

Сидорова В.Ю. Инновации и окружающая среда в молочном скотоводстве //Мат-лы междн. науч.-практ. конф. «Повышение конкурентоспособности и задачи кадрового обеспечения».- Пос. Быково Моск. обл.-2014 - Вып. 20. – с.211-213.

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ РАЗНООБРАЗИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ ГЕОБОТАНИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Смирнов В.Э., Ханина Л.Г.

*Институт математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия*

[vesmirnov@gmail.com](mailto:vesmirnov@gmail.com)

**Аннотация:** разработана и апробирована методика статистического оценивания параметров видового разнообразия растительности. Проведено сравнение видового разнообразия сосудистых растений для выделенных ранее типов растительных сообществ заповедника «Калужские засеки». Сравнение проведено как для наблюдаемого, так и для эффективного числа видов (чисел Хилла).

Основными оценками разнообразия растительности той или иной территории являются оценки ее экосистемного и видового разнообразия. Экосистемное разнообразие оценивается, как правило, через список типов сообществ, представленных на территории. Оценку видового разнообразия можно проводить на основе геоботанических описаний – списков видов растений на площадках фиксированного размера, с указанием обилия видов в разных ярусах растительного сообщества. В этом случае геоботанические описания классифицируют по типам растительных сообществ, и описания, выполненные в сообществе одного типа, используют для оценки видового разнообразия этого типа.

Видовое разнообразие сообществ оценивают по составляющим их компонентам: альфа разнообразие можно оценить через видовую насыщенность, рассчитываемую как среднее число видов на площадке фиксированного размера; бета разнообразие можно оценить с помощью различных мер сходства/расстояния; локальное гамма разнообразие можно оценить через видовое богатство, которое, как правило, рассчитывают как общее число видов, встреченных на всех геоботанических площадках в сообществе данного типа. При таком подходе оценки видового разнообразия в сильной степени зависят от числа геоботанических описаний, доступных для сообществ. Кроме того, эти оценки очевидно зависят от качества проведенных геоботанических исследований, расположения площадок, их размеров и других параметров. Все эти параметры часто оказываются неоднородными, а количественные оценки разнообразия, полученные на основе таких неоднородных данных, могут оказаться существенно смещенными. Относительно корректные оценки видового разнообразия вместе с оценкой их статистической значимости в условиях неполных или неоднородных геоботанических данных можно получить при использовании специальных статистических методов, активно развиваемых в последние годы (Colwell et al., 2012; Смирнов и др., 2014; Chao et al., 2014; Ханина и др., в печати).

Сравнительные оценки видового богатства в условиях неравномерных выборок описаний мы рассчитывали с помощью видовых кумулятивных кривых в рамках интегрального подхода (Colwell et al., 2012). Для данных по присутствию/отсутствию видов авторы подхода предложили аналитический метод на основе распределения Бернулли, который находит ожидаемое число видов, как в случае интерполяции выборки (приведения выборки большего размера к меньшему), так и в случае ее экстраполяции (доведения выборки меньшего размера до большего). В результате строится единая видовая кумулятивная кривая для каждого типа сообщества, которая начинается от размера выборки в одно описание, продолжается до наблюдаемого числа описаний в данном типе, далее переходит в асимптотическую кривую, продолжающуюся до желаемого уровня экстраполяции. Недостатком этого подхода является то обстоятельство, что надежная экстраполяция видового богатства по данному методу возможна только до удвоенного (максимум утроенного) размера референтной выборки, тогда как число доступных описаний для отдельных типов сообществ может отличаться на порядки. В результате данные для некоторых типов сообществ приходится интерполировать, что, очевидно, ведет к потере

информации. Так, например, для сравнительной оценки видового богатства сообществ заповедника «Калужские засеки» 306 геоботанических описаний неморальных широколиственных лесов нам пришлось интерполировать до 57 описаний – числа, равного утроенному размеру минимальной в массиве выборки (Смирнов и др., 2014).

Развитием подхода построения кумулятивных кривых явилось его распространение на такие меры разнообразия, экстраполяция которых возможна до больших пределов, нежели экстраполяция видового богатства. Этому требованию, как показали Chao et al. (2014), удовлетворяют некоторые меры разнообразия, входящие в так называемый ряд Хилла (иначе – числа Хилла). Этот ряд можно представить в виде следующего общего выражения (по Jost, 2006):

$${}^qD \equiv \left( \sum_{i=1}^S p_i^q \right)^{1/(1-q)},$$

где  $q$  – константа, определяющая конкретное число Хилла,  $S$  – число видов в выборке,  $p_i$  – относительное обилие  $i$ -го вида. Hill (1973) показал, что  $q = 0$  дает число видов в сообществе (видовое богатство),  $q = 1$  соответствует экспоненте индекса Шеннона (в пределе),  $q = 2$  дает величину, обратную индексу Симпсона. Преимущество этих мер в том, что они выражены через число видов, а не являются безразмерными, как оригинальные индексы Шеннона и Симпсона. Рассчитанное таким образом число видов называется эффективным или эквивалентным и соответствует ожидаемому числу видов с равным обилием в анализируемом типе сообщества (Jost, 2006). При этом числа Хилла устроены таким образом, что с увеличением  $q$  увеличивается вес (влияние) видов с большим обилием в расчете меры разнообразия. Это позволяет с помощью трех мер (при  $q = 0, 1, 2$ ) выявлять различные особенности структуры сообщества, релевантные с точки зрения оценки разнообразия (роль редких, часто встречающихся, доминирующих и др. видов). Преимущество эффективных чисел видов состоит также в том, что их значения при экстраполяции быстро выходят на плато и далее изменяются слабо, что увеличивает пределы их практической экстраполяции, в частности до максимального размера выборки в массиве исследуемых данных (Chao et al., 2014). Это было использовано нами для развития методики оценки видового разнообразия и применения ее для оценки видового богатства выделенных ранее типов растительных сообществ заповедника «Калужские засеки».

Полученные нами результаты оценок видового разнообразия сосудистых растений по числам Хилла в целом соответствовали, а в частности уточняли результаты, полученные ранее (Ханина и др., в печати). Использование чисел Хилла позволило провести более детальный анализ структуры видового разнообразия и учесть весь объем геоботанической информации, доступной для анализа.

Работа проводилась при частичной поддержке РФФИ, проект № 13-04-02181-а.

## Литература

- Смирнов В.Э., Ханина Л.Г., Бобровский М.В. Оценка видового разнообразия растительности на основе интегрального статистического подхода в условиях неоднородных данных (на примере заповедника «Калужские засеки») // Вестник Томского гос. университета. Биология. - 2014. - № 4 (28). - С. 84–101.
- Ханина Л.Г., Смирнов В.Э., Бобровский М.В. Оценка видового богатства растительных сообществ заповедника «Калужские засеки» на основе индексов Шеннона и Симпсона и чисел Хилла // Лесоведение. - В печати.
- Chao A., Gotelli N.J., Hsieh T.C., Sander E.L., Ma K.H., Colwell R.K., Ellison A.M. Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies // Ecological monographs. - 2014. - V. 84. - No. 1. - P. 45–67.
- Colwell R.K., Chao A., Gotelli N.J., Lin S.-Y., Mao C.X., Chazdon R.L., Longino J.T. Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation, and comparison of assemblages // Journal of plant ecology. - 2012. - V. 5. - P. 3–21.
- Hill M.O. Diversity and evenness: a unifying notation and consequences // Ecology. - 1973. - V. 54. - P. 427–432.
- Jost L. Entropy and diversity // Oikos. - 2006. - V. 113. - No. 2. - P. 363–375.

## ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ: ARMA-МОДЕЛИ

Суховольский В.Г.<sup>1</sup>, Тарасова О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия  
[soukhovolsky@yandex.ru](mailto:soukhovolsky@yandex.ru)

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия  
[olvitarasova2010@yandex.ru](mailto:olvitarasova2010@yandex.ru)

**Аннотация:** рассмотрены методы моделирования динамики численности насекомых-филлофагов с использованием ARMA-моделей. Использование ARMA-моделей позволило оценить вклад погодных факторов в изменение плотности популяций филлофагов, определить запаздывание реакции паразитов на изменение плотности популяции вида-хозяина.

Два класса факторов – модифицирующие (в частности, погодные) и регулирующие (такие, как воздействия паразитов и хищников) влияют на плотность популяций насекомых-филлофагов (Исаев и др, 2001). Поэтому для моделирования и прогноза популяционной динамики филлофагов необходимо, кроме данных по плотности популяции моделируемого вида насекомых, знать плотность популяций паразитов и хищников и функции восприимчивости моделируемых популяций насекомых к погодным и ландшафтным факторам. Однако во многих случаях эти переменные неизвестны, что затрудняет построение моделей.

В настоящей работе рассмотрены методы моделирования динамики численности насекомых-филлофагов, позволяющие не включать в модели влияние регулирующих факторов и не определять функцию восприимчивости популяции насекомых к модифицирующим факторам.

Для моделирования и краткосрочного прогноза популяционной динамики насекомых-филлофагов использованы ARMA (AutoRegression Moving Average) – модели (Бокс, Дженкинс, 1974; Большаков, Каримов, 2007):

$$L(i+1) = L_0 + \sum_{j=1}^n a_j L(i-j) + \sum_{k=0}^m b_k W(i-k) \quad (1)$$

где  $L(i)$  – регуляризованная нормализованная логарифическая (РНЛ) плотность популяции в сезон  $i$ ;  $W(i)$  – погодный показатель (гидротермический коэффициент вегетационного сезона),  $L_0$ ,  $a_j$ ,  $b_k$ ,  $n$ ,  $m$  – коэффициенты.

В качестве объектов моделирования использовались временные ряды динамики численности серой листовенничной листовертки *Zeiraphera griseana* L. в Альпах (Baltensweiler, 1964; Baltensweiler, Fischlin, 1988) сосновой пяденицы *Bupalus piniarius* L. в сосновых борах Тюрингии (Германия) (Schwerdtfeger, 1952), сосновой пяденицы *Bupalus piniarius* L. и соснового шелкопряда *Dendrolimus pini* L. на юге Средней Сибири (Пальникова и др, 2002; Пальникова и др, 2014), зеленой дубовой листовертки *Tortrix viridana* L. в европейской части России (Голубев, Багдатьяева, 2013).

Модель (1) позволила оценить вклад погодных факторов в изменение плотности популяции, определить запаздывание реакции паразитов на изменение плотности популяции вида-хозяина.

Для ARMA-моделей популяционной динамики лесных насекомых были рассчитаны запас по устойчивости и робастная устойчивость (Гайдук и др, 2011; Ким, 2007; Поляк, Щербаков, 2002). Это позволяет оценить изменение состояния популяции при трансформации внешней среды и изменениях собственных характеристик популяции.

Предложенный подход к моделированию популяционной динамики лесных насекомых-филлофагов позволил получить краткосрочный (на 2-4 года) прогноз динамики численности моделируемых популяций.

*Работа поддержана РФФИ (грант 15-04-01192).*

## **Литература**

- Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. М.: Мир, 1974. – 197 с.
- Большаков А.А., Каримов Р.Н. Методы обработки многомерных данных и временных рядов. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. - 522 с.
- Гайдук А.Р., Беляев В.Е., Пьявченко Т.А. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB. СПб.: Лань, 2011. – 464 с.
- Голубев А.В., Багдатьян Е.Е. Долгосрочное прогнозирование движения численности фитофагов// Лесной вестник, 2013; № 6, с 22-24.
- Исаев А.С., Хлебопрос Р.Г., Кондаков Ю.П., Недорезов Л.В., Киселев В.В., Суховольский В.Г. Популяционная динамика лесных насекомых М.: Наука, 2001.- 374 с.
- Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 312 с.
- Пальникова Е.Н., Свицерская И.В., Суховольский В.Г. Сосновая пяденица в лесах Сибири. Экология, динамика численности, влияние на насаждения. Новосибирск: Наука, 2002. - 254 с.
- Пальникова Е.Н., Суховольский В.Г., Тарасова О.В. Пространственно-временная когерентность популяционной динамики лесных насекомых-филлофагов// Евразийский энтомологический журнал. – 2014. - т.13. - № 3. - С. 228-236.
- Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. – 303 с.
- Baltensweiler W. Zeiraphera griseana Hubner (Lepidoptera, Tortricidae) in the European Alps. A contribution to the problem of cycles// Can. Entomol.. – 1964. - v. 96. - N 5. - P. 792-800.
- Baltensweiler W., Fischlin A. The larch budmoth in the Alps// Dynamics of Forest Insect Populations: Patterns, Causes, Implication. N. Y.: Plenum Press, 1988. - P. 331-351.
- Schwerdtfeger F. Untersuchungen über der eisen Bestand von Kiefernspanner (Bupalus piniarius L.), Forleule (Panolis flammea Schiff.) und Kiefernswarmer (Hyloicus pinastri L.)// Zeitschrift für angew. Entomol. - 1952. – 34. - № 2. – S. 216-283.

## КАРТА БОЛОТ ТАЙГИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭМИССИИ МЕТАНА

Терентьева И.Е.<sup>1</sup>, Глаголев М.В.<sup>1,2,3</sup>, Сабреков А.Ф.<sup>3</sup>, Максюттов Ш.Ш.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Томский государственный университет, Томск, Россия*

[kleptsova@gmail.com](mailto:kleptsova@gmail.com)

<sup>2</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

[m\\_glagolev@mail.ru](mailto:m_glagolev@mail.ru)

<sup>3</sup> *Институт лесоведения РАН, пос. Успенское (Московская обл.), Россия*

[sabrekovaf@gmail.com](mailto:sabrekovaf@gmail.com)

<sup>4</sup> *National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan*

[shamil@nies.go.jp](mailto:shamil@nies.go.jp)

**Аннотация:** для получения оценки эмиссии метана была создана типологическая карта болот тайги Западной Сибири по спутниковым снимкам Landsat. Итоговая точность определения различных классов составила 79%. Площадь болотных и водных ландшафтов была оценена в 54.5 Мга, а поток метана – в 4.08 МтСН<sub>4</sub>/год.

### 1. Введение

Изучение потоков СН<sub>4</sub> особенно актуально в Западной Сибири (ЗС) – одном из самых заболоченных регионов мира. Недавние исследования показали, что при оценке регионального потока существенную неопределенность вносит используемая картографическая основа (Melton et al., 2013). Целью данной работы явилось получение региональной оценки эмиссии метана из таежных болот ЗС на основании вновь созданной карты болотных ландшафтов.

### 2. Объекты и методы

Для оценки регионального потока СН<sub>4</sub> использовалась модель эмиссии (Glagolev et al., 2011). Она включает три основных элемента для каждой подзоны: 1) продолжительность периода эмиссии метана, 2) медианы потоков метана из типичных болотных экосистем, 3) площади различных болотных комплексов и соотношения экосистем в них. Вычисления первого элемента были выполнены на основании данных по сезонной динамике эмиссии. Второй элемент был получен на основании данных полевых измерений, выполненных методом статических камер. Для получения третьего элемента была создана типологическая карта болот с помощью спутниковых снимков Landsat с разрешением 30 метров. Дешифрирование проводилось посценно с помощью Multispec v.3.3 (Purdue Research Foundation) методом классификации с обучением на основании данных всех каналов за исключением теплового. Эталонные участки задавались на основании данных полевых исследований и спутниковых снимков высокого разрешения. Было разработано две типологии, включающие: 1) 9 болотных комплексов (на основании этой типологии проводилось дешифрирование), 2) 7 болотных экосистем (с помощью этой типологии проводилась экстраполяция потоков СН<sub>4</sub>). Соотношения болотных экосистем в болотных комплексах вычислялись с помощью спутниковых снимков высокого разрешения.

### 3. Результаты и обсуждение

Площадь болотных и водных ландшафтов тайги ЗС была оценена в 54.5 Мга (или 48.4 Мга без учета водных поверхностей). Площади различных типов болотных экосистем четырех подзон тайги ЗС представлены в таблице 1. Общая заболоченность подзон тайги составляет 29% и варьировала от 8% на юге до 36% на севере.

Болота тайги ЗС занимают 6% площади мировых болот (Melton et al., 2013). Что касается сравнения с существующими инвентаризациями по ЗС, близкие значения площадей

были получены в работах Вомперского с соавт. (1999), Sheng et al. (2004), а также по карте Романовой с соавт. (1977) и ее цифровой версии (Peregon et al., 2009). Сходные значения площадей болот говорят (с учетом различных методик создания) об общей близости оценок к истинному значению. Поскольку они могут быть объяснены компенсацией ошибок оmissии и комиссии, оно не говорит о нахождении истинного пространственного распределения.

Итоговая точность определения различных классов была оценена с помощью простой матрицы ошибок (Congalton and Green, 2008) на основании 1082 случайно распределенных полигонов размером 10x10 пикселей. Показатели точности пользователя и точности производителя варьировали от 73% до 97% и от 62% до 99%, соответственно. Итоговая точность определения различных классов была оценена в 79%.

Мы сравнили оценки региональной эмиссии на основании двух карт – ранее используемой карты Peregon et al. (2009) и новой типологической карты. При этом применялся один и тот же набор данных о потоках, полученных за период с 2008 по 2013 гг. Использование новой карты болотных ландшафтов увеличило оценку потока из болот тайги с 1.85 до 4.08 МтСН<sub>4</sub>/год, т.е. на 121%. Основной причиной этого стало изменившееся соотношение “обводненных” (мочажины) и “необводненных” (рямы и гряды) типов болотных экосистем, принципиально различающихся по уровню эмиссии метана.

Таблица 1 – Площади и потоки СН<sub>4</sub> из болотных экосистем тайги ЗС (ОбМ – обводненные мочажины, ОлМ – олиготрофные мочажины, ММ – мезо и эвтрофные мочажины, МБ – мерзлые бугры; Area – площадь болот, Мга; Flux – поток, ктСН<sub>4</sub>/год)

Тип болотной экосистемы	Подтайга		Южная тайга		Средняя тайга		Северная тайга	
	Area	Flux	Area	Flux	Area	Flux	Area	Flux
Вода	0.24	6	0.37	8	1.66	42	3.91	38
ОбМ	0.05	10	0.50	254	1.32	378	3.40	431
ОлМ	0.09	15	1.87	302	5.78	841	5.60	184
Гряды	0.27	12	1.70	14	3.61	26	3.37	0
Рямы	0.36	2	3.37	18	5.14	8	1.60	2
ММ	1.11	83	4.22	1044	1.77	209	1.53	150
МБ	Отсутствуют в этих подзонах						1.71	0
Площадь болот	2.11		12.04		19.27		21.13	
Площадь зоны	28.21		42.96		56.56		58.46	
Заболоченность	7.5%		28.0%		34.1%		36.1%	
Flux	128		1640		1503		805	

## Литература

- Congalton R.G., Green K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. - New York: CRC press, 2008. – 180p.
- Glagolev M., Kleptsova I., Filippov I., Maksyutov S., Machida T. Regional methane emission from West Siberia mire landscapes // Environmental Research Letters. - 2011. - V. 6. - № 4. - P.045214.
- Melton J.R., Wania R., Hodson E.L., Poulter B., Ringeval B., Spahn R., ... Kaplan J.O. Present state of global wetland extent and wetland methane modelling: conclusions from a model inter-comparison project (WETCHIMP) // Biogeosciences. - 2013. - V. 10. - № 2. - P.753-788.
- Peregon A., Maksyutov S., Yamagata Y. An image-based inventory of the spatial structure of West Siberian wetlands // Environmental Research Letters. - 2009. - V. 4. - № 4. - P.045014.
- Sheng Y., Smith L.C., MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Frey K.E., Velichko, A.A., ... Dubinin, P. A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool // Global Biogeochemical Cycles. - 2004. - V. 18. - № 3.
- Вомперский С., Цыганова О., Ковалев А., Глухова Т., Валяева Н. Заболоченность территории России как фактор связывания атмосферного углерода / Круговорот углерода на территории России. Под ред Г.А. Заварзина. - 1999. - С.124-145.
- Романова Е.А., Быбина Р.Т., Голицина Е.Ф., Иванова Г.М., Усова Л.И., Трушников Л.Г. Типологическая карта болот Западно-Сибирской равнины. - Масштаб 1:2 500 000. - Ленинград: ГУГК, 1977.

## РАЗВИТИЕ КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА В ХОДЕ ЗАЛЕЖНОЙ СУКЦЕССИИ

Титлянова А.А.<sup>1</sup>, Самбуу А.Д.<sup>2</sup>, Шибарева С.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт почвоведения и агрохимии СО РА, Новосибирск, Российская Федерация*  
[argenta@issa.nsc.ru](mailto:argenta@issa.nsc.ru)

<sup>2</sup> *Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Российская Федерация*  
[sambuu@mail.ru](mailto:sambuu@mail.ru)

**Аннотация:** В Туве на трех залежах (4-ый, 7-ой, 11-ый и 17-ый годы), а также в коренных степях оценивали видовой состав фитоценозов и запасы различных фракций накопившего растительного вещества (РВ). Видовой состав фитоценозов выходит на стационарный уровень раньше, чем запасы РВ. Чем старше сукцессия, тем большая доля фитомассы (89-95%) сосредоточена в живых и мертвых подземных органах. В степях биотический круговорот определяет скорость сукцессии и устойчивость экосистемы.

Насколько тесно растения и почва связаны с биотическим круговоротом наиболее четко проявляется в ходе сукцессии. Круговорот углерода отвечает на каждый шаг сукцессии, и только установившееся количественное постоянство фракций фитомассы свидетельствует о достижении сукцессией стационарного состояния.

Нами исследовалась залежная сукцессия в Туве, на полях, которые ранее были степями. Они одновременно прошли распашку, посев пшеницы и были одномоментно заброшены в 1994 г. Нам удалось найти ряд залежей, чьими предшественниками были луговые, настоящие, сухие и опустыненные степи.

В качестве иллюстрации мы выбрали залежи луговой степи на черноземе обыкновенном, сухой на каштановой почве и опустыненной на светло каштановой почве. Наблюдения проводились на 4, 7, 11 и 17-ый годы сукцессии, одновременно исследовались терминальные степи (таблица 1).

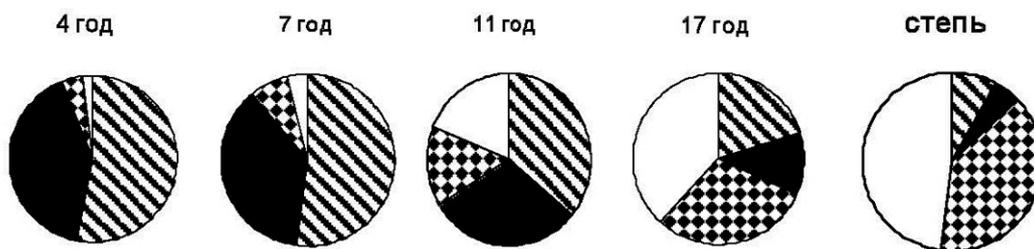
Таблица 1 – Характеристика залежей

Предшествующая залежам распаханная степь	Число видов на 500 м <sup>2</sup> в определенный срок сукцессии				
	4 года	7 лет	11 лет	17 лет	Зональная степь
Луговая степь на обыкновенном черноземе	19	43	53	62	70-75
Сухая степь на каштановой почве	12	35	27	29	30-35
Опустыненная степь на светло каштановой почве	9	26	25	31	25-30

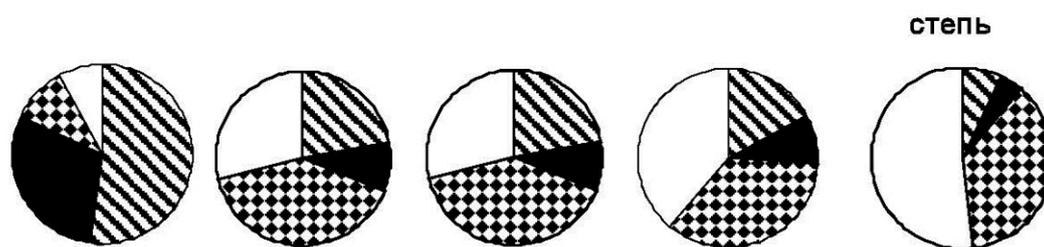
К семнадцати годам видовая и доминантная структура трех выбранных залежей отличается по своей близости к терминальным сообществам. В формирующейся луговой степи на обыкновенном черноземе 80% видов являются терминальными. Фитоценоз залежи на каштановой почве имеет весь набор терминальных видов сухой степи, но еще включает виды, не свойственные сухим степям. Залежь на светло каштановой почве представляет собой и по доминантному и по видовому составам вариант опустыненной степи (таблица 2).

Чем суше и жестче условия существования, тем быстрее идет сукцессия к терминальному состоянию. Скорость формирования биотического круговорота хорошо иллюстрируется изменением различных фракций фитомассы (рисунок).

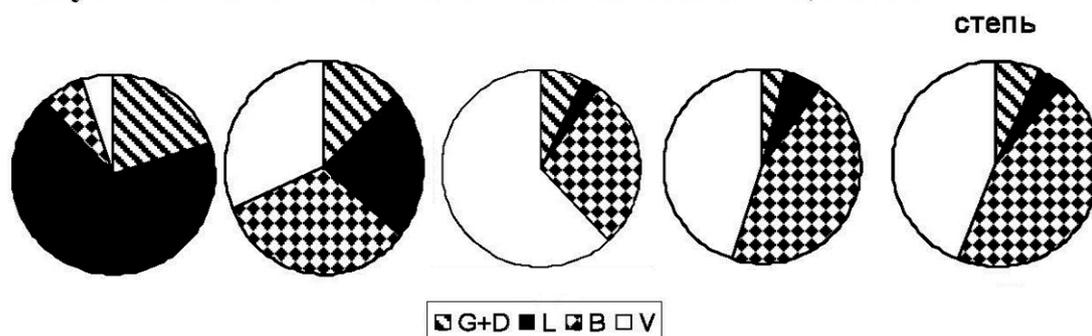
**Луговая степь на обыкновенном черноземе, залежь**



**Сухая степь на каштановой почве, залежь**



**Опустыненная степь на светло-каштановой почве, залежь**



■ G+D ■ L ■ B □ V

Рисунок – Изменение соотношения фракций фитомассы (обозначения фракций такие же как в таблице 2)

Общее направление круговорота в ходе сукцессии – снижение надземной и увеличение подземной фитомассы. Быстрее всего этот процесс происходит на залежи опустыненной степи. На 11-ый год сукцессии масса подземных органов составляла около 90% всей фитомассы, на 17-ый год – 95%. В луговой степи их доля не превышала 60%.

Таблица 2 – Структура растительного вещества в сукцессионных и терминальных степных экосистемах. Обеззоленное вещество, г/м<sup>2</sup>, для корней в слое почвы 0-20 см

Фракция фитомассы	Луговая степь		Сухая степь		Опустыненная степь	
	залежь 17 лет	степь	залежь 17 лет	степь	залежь 17 лет	степь
Зеленая фитомасса, <i>G</i>	377	169	181	167	61	71
Ветошь, <i>D</i>	50	82	68	89	34	58
Подстилка, <i>L</i>	250	243	118	118	68	65
Живые подземные	654	1638	514	1353	568	746

органы, <b>B</b>						
Мертвые подземные органы, <b>V</b>	799	2200	544	1582	547	953
Надземная фитомасса, <b>G+D+L</b>	677	452	367	374	163	194
Подземная фитомасса, <b>B+V</b>	1453	3838	1058	2935	1115	1699
<b>B+V/G+D+L</b>	2,1	5,2	2,9	7,8	6,8	8,8

Наши исследования показали, что залежный фитоценоз, подобный по видовому составу природной степи, возникает раньше, чем в данной экосистеме достигается стационарное состояние круговорота. Видимо основные изменения фитоценоза на отрезке времени  $t_1 - t_2$  (где  $t_1$  – время достижения травостоем залежи видовой структуры коренной степи, а  $t_2$  – время достижения биотическим круговоротом стационарного состояния) – это количественные изменения в подземном ярусе фитоценоза. К этим изменениям относятся вертикальное и горизонтальное размещение корней и корневищ в почве, смена их доминирования, установление равновесия в системе живые подземные органы → их отмирание – подземные растительные остатки → их минерализация.

Можно, конечно, судить о растительном сообществе по надземной видовой структуре, но надо помнить, что травостой – это лишь один из компонентов биотического круговорота, в который входят и другие компоненты, и многочисленные связи между ними.

## МНОГОПОДХОДНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИМБИОТИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИ СИМБИОТИЧЕСКОЙ АЗОТФИКСАЦИИ

Топаж А.Г.<sup>1</sup>, Абрамова А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», С.-Петербург, Россия  
[alex.topaj@gmail.com](mailto:alex.topaj@gmail.com)

<sup>2</sup> ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет», Барнаул, Россия  
[abramova.math@gmail.com](mailto:abramova.math@gmail.com)

**Аннотация:** Представлены результаты исследований процесса симбиотической азотфиксации с помощью имитационных моделей в рамках мультипарадигменного подхода. Проанализированы поточно-балансовые системно-динамические модели, построены и изучены агентные модели с использованием аппарата теории оптимального управления и теории коалиционных игр.

### 1. Введение

Среди всего разнообразия реализующихся в живой природе межвидовых коалиционных взаимодействий, пожалуй, наибольший практический интерес для человечества представляет процесс фиксации атмосферного азота специфическими микроорганизмами (ризобиями), который они осуществляют в симбиозе с корнями бобовых растений. Действительно, биологическая азотфиксация – уникальный механизм и потенциально практически неисчерпаемый естественный источник минеральных соединений азота – важнейшего питательного элемента культурных растений. Создание специфических севооборотов с участием бобовых культур за счет использования бобово-ризобиальных систем составляет основу «биологического земледелия». Понимание движущих механизмов данного процесса может быть достигнуто как в ходе экспериментальных исследований, так, в том числе, и с помощью методов математического имитационного моделирования. В частности, совершенно необходимым представляется включение алгоритмов симбиотической азотфиксации в математические модели продукционного процесса бобовых культур, а, следовательно, и в «моделецентрические» системы расчета сельскохозяйственных севооборотов с их участием (Баденко и др.).

### 2. Материалы и методы

Магистральная тенденция развития современных методов математического моделирования в различных предметных областях естественных наук связана с появлением т.н. мультипарадигменных или гибридных моделей. В рамках моделей, построенных по этим принципам, одно и то же природное явление или феномен может рассматриваться и описываться с одновременным использованием нескольких принципиально разных математических аппаратов, методов формализации и/или техник имитационного моделирования.

В приложении к рассматриваемой проблеме моделирования симбиотической азотфиксации многоподходность, прежде всего, выражается в том, чтобы попытаться расширить традиционный формализм описания, базирующийся на классическом системно-динамическом или поточно-балансовом методе, когда законы поведения исследуемого «пассивного» объекта формулируются в виде предопределенных причинно-следственных связей, а также потоков вещества и энергии, математическим выражением которых выступают системы обыкновенных дифференциальных уравнений или уравнения в частных производных (Хворова и др., 2015). Если же встать на точку зрения эволюционной теории, то можно поставить цель не просто зафиксировать наблюдаемые законы поведения живых систем, но с помощью телеономического подхода объяснить принципы их возникновения в живой природе (Новосельцев, 1978). Тогда для описания симбиотической азотфиксации

может быть применен принципиально иной математический аппарат. Так как, азотфиксация, как типичное кооперативное взаимодействие, может быть описана в терминах совместного функционирования двух независимых, вступающих в симбиоз, активных агентов, каждый из которых обладает своей собственной целью и, вытекающей из вариационной постановки, собственной стратегией ее достижения. В рассматриваемом случае данными агентами выступают бобовое растение и азотфиксирующие бактерии (ризобии), оптимизирующие свою приспособленность согласованным кооперативным поведением.

Действительно, известно, что свободно живущие азотфиксирующие бактерии, вообще говоря, не нуждаются в симбиозе с растениями для поддержания своей популяции и, более того, в этом состоянии они не задействуют энергетически затратные механизмы фиксации атмосферного азота. В свою очередь, растение (в том числе и бобовое) может успешно произрастать без клубеньковых микроорганизмов, используя имеющиеся в почве запасы минерального азота. Сущность же бобово-ризобияльного симбиоза проявляется именно в том, что бактерии вырабатывают лабильный азот в качестве своеобразной платы за снабжение их растением углеродосодержащими питательными веществами (сахарами и т.п.). А растению оказывается в определенных условиях выгодно содержать на углеродном довольствии дополнительные мощности, генерирующие азот. Путем построения семейства все более усложняющихся агентных моделей можно изучить вопросы односторонней или двусторонней стимуляции подобного рода взаимодействия. В частности, интерес вызывает определение наличия или отсутствия единственного «центра принятия решений» в данной системе, обеспечение устойчивости кооперативных стратегий к проявлениям «мошенничества» субъектов взаимодействия, то есть существование эволюционно стабильных стратегий и механизмов их поддержания. Детальное исследование поставленных вопросов требует использования математического аппарата теории оптимальных решений и теории игр.

### 3. Результаты

В докладе представлены результаты исследования следующих модельных решений:

- 1) поточно-балансовая детерминистическая модель азотфиксации в системно-динамической и агентной постановке
- 2) модель симбиотической азотфиксации, в которой активным действующим агентом выступает бобовое растение, и ее анализ методами теории оптимального управления
- 3) модель симбиотической азотфиксации, в которой активными действующими агентами выступают колонии азотфиксирующих бактерий (ризобий) с различными параметрами поведения (популяция с неоднородной структурой)
- 4) модель симбиотической азотфиксации, с двумя активными агентами (бобовое растение и ризобии), полученная путём совмещения двух ранее разработанных классов моделей, в каждой из которых поведение одного из агентов пассивно (заранее известно другому агенту). Исследование получившейся двухкомпонентной динамической модели методами теории неантагонистических дифференциальных игр (Айзекс, 1967).

### Литература

- Айзекс Р. Дифференциальные игры. Москва, Мир, 1967, 480 с.
- Баденко В.Л., Гарманов В.В., Иванов Д.А., Савченко А.Н., Топаж А.Г. Перспективы использования динамических моделей агроэкосистем в задачах средне- и долгосрочного планирования сельскохозяйственного производства и землеустройства // Российская сельскохозяйственная наука. 2015. № 1-2. С. 72-76.
- Новосельцев В.Н. Теория управления и биосистемы. Москва, «Наука», 1978, 320 с.
- Хворова Л.А., Топаж А.Г., Абрамова А.В., Неупокоева К.Г. Подходы к описанию симбиотической азотфиксации Часть 2. Анализ подходов к математическому моделированию процесса // Известия АлтГУ. Барнаул, 2015. №1/1 (85). С. 192–196.

## **АНАЛИЗ БИОФИЗИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЧИСЛЕННОСТИ ЛЕММИНГОВ С ПОМОЩЬЮ НАБОРА ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ МОДЕЛЕЙ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ДЕТАЛИЗАЦИИ**

Тращев Р.В.<sup>1</sup>, Саранча Д.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт фундаментальных проблем биологии РАН, г. Пущино, Россия*  
[tslav85@mail.ru](mailto:tslav85@mail.ru)

<sup>2</sup>*Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, Москва, Россия*  
[saran@ccas.ru](mailto:saran@ccas.ru)

**Аннотация:** Предложен комплексный метод исследований, включающий в себя полный набор операций, объединяющий формальные и неформальные методы, имитационные и аналитические подходы. Проведено приближенное параметрическое исследование исходной имитационной модели «растительность-лемминги-песцы»: выявлены существенные параметры определяющие формирование колебаний численности леммингов и области этих параметров которым соответствуют регулярные и нерегулярные колебания численности.

### **1 Метод комплексных исследований**

Эколого-биологическая область может считаться одним из лидеров в поисках эффективных способов применения точных методов в междисциплинарных исследованиях. Уже первые модели А. Лотки и В. Вольтерра показали свою эффективность в решении биологически значимых задач. Но ограниченные возможности аналитических (докомпьютерных) методов не позволили развить этот успех.

Появление «системной динамики» Дж. Форрестера (Форрестер, 1978) – метода создания имитационных моделей существенно увеличило возможности междисциплинарных взаимодействий. Имитационная технология позволяет учитывать практически все пожелания экспертов в количественной и/или качественной форме, обеспечить необходимый уровень детализации, эффективно подойти к пониманию сути описываемого явления и выражению этого понимания в форме математической модели.

Но с помощью чисто имитационных средств затруднительно получить удовлетворительное описание изучаемого явления, выделить его ведущие механизмы даже при создании идеальных условий для междисциплинарных взаимодействий. Привлекательно выглядит сочетание имитационных и аналитических подходов.

Поиск способов реализации таких сочетаний привел к формированию комплексных исследований (КОИС) (Тращев и др., 2014), включающих в себя полный набор операций, и позволяющий объединить возможности имитационных и аналитических методов моделирования, что даёт возможность исследовать объекты при недостатке информации об их свойствах.

### **2 Модель растительность – лемминги – песцы**

Данный метод был использован для анализа биофизических механизмов формирования колебаний численности популяции леммингов, путем построения и совместного анализа модели «растительность-лемминги-песцы» (РЛП), упрощенной модели «растительность - лемминги» и разностного уравнения описывающего численность леммингов в двух соседних годах.

В результате вычислительных экспериментов с моделью РЛП были получены разнообразные динамические режимы, характерные для тундры колебания численности леммингов и песцов.

Неудовлетворенность традиционным окончанием исследований имитационных моделей – прогнозом динамических характеристик модели при различных сценариях внешних воздействий (Саранча, 1997), и стремление приблизиться к пониманию механизмов

формирования динамики численности тундровых животных привели к созданию модели популяции леммингов (Форрестер, 1978), определяющей характер колебаний численности животных тундрового сообщества. Это дало возможность обосновать в качестве упрощенной модели одномерное разностное уравнение, связывающее численности леммингов (ведущего блока в модели РЛП) в двух соседних годах (Саранча, 1997).

На основе анализа упрощенной модели «растительность-лемминги», получены формулы, связывающие параметры разностного уравнения и исходной имитационной модели. На основе анализа разностного уравнения удалось определить существенные параметры имитационной модели «растительность-лемминги-песцы», от которых зависит формирование колебаний численности леммингов и, тем самым, приблизится к разгадке лемминговых циклов (Чернявский, 2002).

## Литература

- Саранча Д.А. Количественные методы в экологии. Биофизические аспекты и математическое моделирование. М.: МФТИ, 1997. 283 с.
- Р. В. Трашеев, О. П. Люлякин, Д. А. Саранча, Ю. С. Юрезанская. Метод комплексных исследований на примере моделирования популяций леммингов. ВЦ РАН МОСКВА. 2014. 115с. ISBN 978-5-91601-107-4.
- Форрестер Дж. Мировая динамика. М.: Мир, 1978. 234 с.
- Чернявский Ф.Б. Лемминговые циклы/ Ф.Б. Чернявский // Природа. 2002. №10. С. 23-34.
- D. A. Sarancha, O. P. Lyulyakin, R. V. Trashcheev. Interaction of simulation and analytic methods in modelling of ecological and biological objects. "Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling", 2012, Vol. 27, No. 5, pp. 479–492.

## ПОПЫТКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АНСАМБЛЯ ПРОСТЕЙШИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ОДНОЙ ЗАДАЧЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ

Филиппов И.В.<sup>1</sup>, Глаголев М.В.<sup>1,2,3,4</sup>, Сабреков А.Ф.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

[filip83pov@yandex.ru](mailto:filip83pov@yandex.ru)

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

<sup>3</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

[m\\_glagolev@mail.ru](mailto:m_glagolev@mail.ru)

<sup>4</sup>Институт лесоведения РАН, пос. Успенское (Московская обл.), Россия

[sabrekovaf@gmail.com](mailto:sabrekovaf@gmail.com)

**Аннотация:** предпринята попытка предсказания хемостатных кривых роста *Candida diddenszii* при помощи ансамбля моделей, параметры которых были идентифицированы по динамическим кривым роста периодической культуры. К сожалению, оказалось, что ансамбль из 15 моделей дает лишь незначительные преимущества при решении этой задачи (при использовании среднего арифметического или медианы для «коллективного прогноза»).

### Введение

В научной литературе настойчиво обсуждается и разрабатывается идея о совместном использовании разнотипных моделей в коллективе – как средства наиболее полного учета априорной информации. Коллектив моделей, например, с позиций средневзвешенного преобразования либо оценивания областей их компетенции аккумулирует преимущества составляющих коллектив решающих правил (Лапко, 2002).

Если результаты отдельно взятой модели не вызывают доверия, можно рассмотреть комплекс результатов, полученных с помощью всех моделей. Поскольку все они созданы на основе одних принципов, но независимо друг от друга, то эти результаты могут представлять собой статистический ансамбль, и, проведя их обработку по правилам математической статистики, мы получим наиболее вероятное значение, а также границы его вероятных изменений. Обычно каждая модель хорошо воспроизводит лишь часть искомым величин, в то время как остальные воспроизводятся значительно хуже. Сравнительный анализ показывает, что наиболее высокую успешность, как правило, демонстрирует «средняя» по ансамблю модель. Это связано с тем, что систематические ошибки разных моделей (а они присущи каждой) не зависят друг от друга и при осреднении по ансамблю могут взаимно компенсироваться. Успешность такого подхода уже нашла свое подтверждение: в регулярно издаваемых отчетах МГЭИК приводятся модельные оценки вероятных изменений основных климатических изменений в обозримом будущем, полученные с использованием вышеописанного подхода. При подготовке вышедшего в 2007 г. отчета, МГЭИК использовала около 20 моделей и на их основе предсказала увеличение среднеглобальной температуры воздуха в 1990-2007 гг. на 0.2 °С. Именно такая величина и была реально зафиксирована в наблюдениях (Кароль и Киселев, 2013).

Целью нашей работы было: проверить описанный выше подход на примере одной из задач микробиологической кинетики, а именно – предсказать хемостатные кривые при помощи ансамбля моделей, параметры которых были идентифицированы по динамическим кривым роста периодической культуры.

### Объекты и методы

Экспериментальные данные по динамике роста *Candida diddenszii* в периодической культуре и по ее стационарному (хемостатному) росту были взяты из (Шкидченко, 1984). По данным, полученным в периодической культуре, идентифицировали кинетические параметры математических моделей, после чего по каждой модели предсказывали

стационарные хемостатные кривые. По невязке между теоретически рассчитанными хемостатными кривыми и экспериментальными данными делался вывод о качестве той или иной модели.

Для работы, во-первых, из сводных таблиц в (Бирюков и Кантере, 1985) были отобраны все (16) моделей, содержащие не более трех идентифицируемых параметров и две зависимые переменные (концентрацию биомассы и субстрата). Во-вторых – 7 простейших «S-P-X-моделей» (Guthke and Knorre, 1978), содержащих 4 параметра и 3 независимые переменные. В-третьих – упрощенный вариант модели Н.Д. Иерусалимского (8.14) из (Романовский и др., 1975), также содержащий 4 параметра и 3 независимые переменные. Однако поскольку после идентификации параметров иногда оказывалось, что модель одного типа при данном наборе параметров сводилась к модели другого типа, то, фактически, для предсказания хемостатных кривых осталось лишь 15 различных моделей. Наряду с отдельными моделями проверялись предсказания даваемые их ансамблем. Для такого «коллективного» предсказания использовалось как среднее арифметическое всех моделей, так и медиана.

В качестве целевой для минимизации применяли следующую функцию:

$$S(k) = \sum_{i=1}^K \sum_{m=1}^{N_i} \{ [e_{im} - m_i(k, t_m)] / c_i \}^2 \quad (1)$$

где  $k$  – вектор идентифицируемых параметров;  $N_i$  – количество экспериментальных данных для  $i$ -го компонента;  $K$  – число компонентов;  $e_{im}$  – экспериментально определенное значение  $i$ -го компонента в  $m$ -й момент времени;  $m_i(k, t_m)$  – рассчитанное по модели значение  $i$ -го компонента в  $m$ -й момент времени;  $c_i$  – характерный масштаб  $i$ -го компонента. Конкретно в нашей работе  $K = 3$  ( $i=1$  – биомасса дрожжей, г/л;  $i=2$  – концентрация глюкозы, г/л;  $i=3$  – относительная скорость дыхания);  $c_1=5$ ,  $c_2=10$ ,  $c_3=0.5$ . Для характеристики невязки хемостатных экспериментов использовалась совершенно аналогичная функция, но значения  $t_m$  имели смысл скорости разбавления. Вычисления проводились в средах Python и MATLAB с использованием реализованных там функций интегрирования систем жестких дифференциальных уравнений и минимизации.

## Результаты и обсуждение

При сравнении медианы и среднего арифметического по ансамблю моделей был сделан вывод, что медиана лучше предсказывает результат хемостатного эксперимента по информации о росте периодической культуры. Однако и качество предсказания медианы оказалось довольно низким: медиана была немного лучше, чем 9 моделей, но хуже, чем остальные 6 моделей из 15.

Таким образом, ансамбль из 15 моделей не дал ощутимых преимуществ при решении задачи предсказания хемостатных кривых при помощи ансамбля моделей, параметры которых были идентифицированы по динамическим кривым роста периодической культуры (по крайней мере, в частном случае роста *Candida diddenszii*).

## Литература

- Бирюков В.В., Кантере В.М. Оптимизация периодических процессов микробиологического синтеза. – М.: Наука, 1985. – 296 с.
- Кароль И.Л., Киселев А.А. Парадоксы климата. Ледниковый период или обжигающий зной? – М.: АСТ-ПРЕСС КНИГА, 2013. – 288 с.
- Лапко В.А. Непараметрические коллективы решающих правил. - Новосибирск: Наука, 2002. - 168 с.
- Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическое моделирование в биофизике. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
- Шкидченко А.Н. Физиологическое состояние дрожжей при кинетическом, физиологическом и метаболическом типах лимитирования // Рост микроорганизмов. Сб. научных трудов. - 1984. С. 118-126.
- Guthke R., Knorre W.A. Oscillations and multistability in continuous culture models: the S-P-X models // Contin. Cultiv. Microorganisms. Proc. 7-th Symp. – Prague, 1978. – P. 207-214.

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ РАСТЕНИЙ РАЗНЫХ ЖИЗНЕННЫХ ФОРМ – МОДЕЛЬ CAMPUS-S**

Фролов П.В., Комаров А.С., Зубкова Е.В.

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, РФ*  
[ximikadze@gmail.com](mailto:ximikadze@gmail.com)

**Аннотация:** разработан программный продукт, позволяющий моделировать пространственную динамику популяций растений различных жизненных форм и круговорот биофильных элементов в них. Модель позволяет дать прогноз динамики популяций растений травянисто-кустарничкового яруса, а также исследовать продуктивность живого напочвенного покрова и его участия в круговороте углерода и азота в разных климатических и эдафических условиях.

В отличие от моделей древесного яруса, при моделировании напочвенного покрова необходимо учитывать не только круговорот биофильных элементов, но и геометрию пространственного разрастания растений травяно-кустарничкового яруса. В связи с этим был разработан программный продукт, позволяющий моделировать пространственную динамику популяций растений различных жизненных форм и круговорот биофильных элементов в них. Программа включает 4 основных модуля.

### **Модуль 1.**

Конструктор последовательности онтогенетических состояний, позволяющий закодировать пространственные и временные особенности развития растения (клона). Допускается кодирование онтогенеза отдельно для генеты и раметы с учетом десяти возрастных состояний. При кодировании онтогенеза пользователь может задать геометрию роста надземной и подземной части, вероятности гибели особей или их частей на каждом из этапов развития, переходы между онтогенетическими состояниями с возможностью омоложения. За счет реализации алгоритма Брезенхэма для отрезка прямой имеется возможность закодировать ветвление побега под любым углом.

### **Модуль 2.**

Конструктор матриц переходов между онтогенетическими состояниями (Зубкова и др., 2015), позволяющий указать вероятности переходов независимо для каждого вида.

### **Модуль 3.**

Модуль инициализации, позволяющий распределить климатические характеристики (температуру, освещенность и влажность), введенные пользователем, по алгоритму двумерного Гауссова распределения (также возможны другие варианты распределения). Пользователь может ввести отношение растений к влажности (по типам условий местообитания) и диапазон допустимой освещенности (от 0 до 100%), вероятность прорастания семян, а также соотношение приростов и опадов для каждой из 5 фракций растений (надземные многолетние органы, надземные однолетние органы, надземные запасующие органы, тонкие корни и корневища).

### **Модуль 4.**

Модуль моделирования пространственной динамики популяций растений и круговорота углерода и азота в них.

В связи с большим количеством вычислений псевдослучайных чисел (ПСЧ) на каждом шаге модели, в качестве генератора ПСЧ был выбран витковый регистр сдвига с обобщенной отдачей Вихрь Мерсенна (MT19937).

Единичный шаг модели состоит из 5 этапов.

1-й этап – отмирание растения или его части, которое происходит при выполнении любого из условий: отмирание ячейки закодировано в онтогенезе, эдафические условия в

ячейке являются недопустимыми для данного вида растения, растение в ячейке достигло максимального возраста.

2-й этап – переход особи в следующее онтогенетическое состояние в соответствии с матрицей переходов.

3-й этап – рост особи в соответствии с закодированной в модуле 1 геометрией роста для данного вида. Первоначальное направление роста выбирается псевдослучайным образом. При моделировании развития популяций нескольких видов растений учитывается межвидовая конкуренция при занятии клетки.

4-й этап – семенное размножение. Если на поле присутствует хотя бы одно растение в генеративном состоянии (G1-G3), то в свободной ячейке модели появляется проросток с заданной вероятностью.

5-й этап – расчет динамики органического вещества и азота в растениях и почве: расчет потенциального прироста (в зависимости от доступного азота и климатических факторов), перераспределение прироста по фракциям растений, выравнивание биомассы и азота внутри корневища одного растения, расчет опадов, расчет процессов гумификации и минерализации в почве (модель ROMUL (Chertov et al., 2001)).

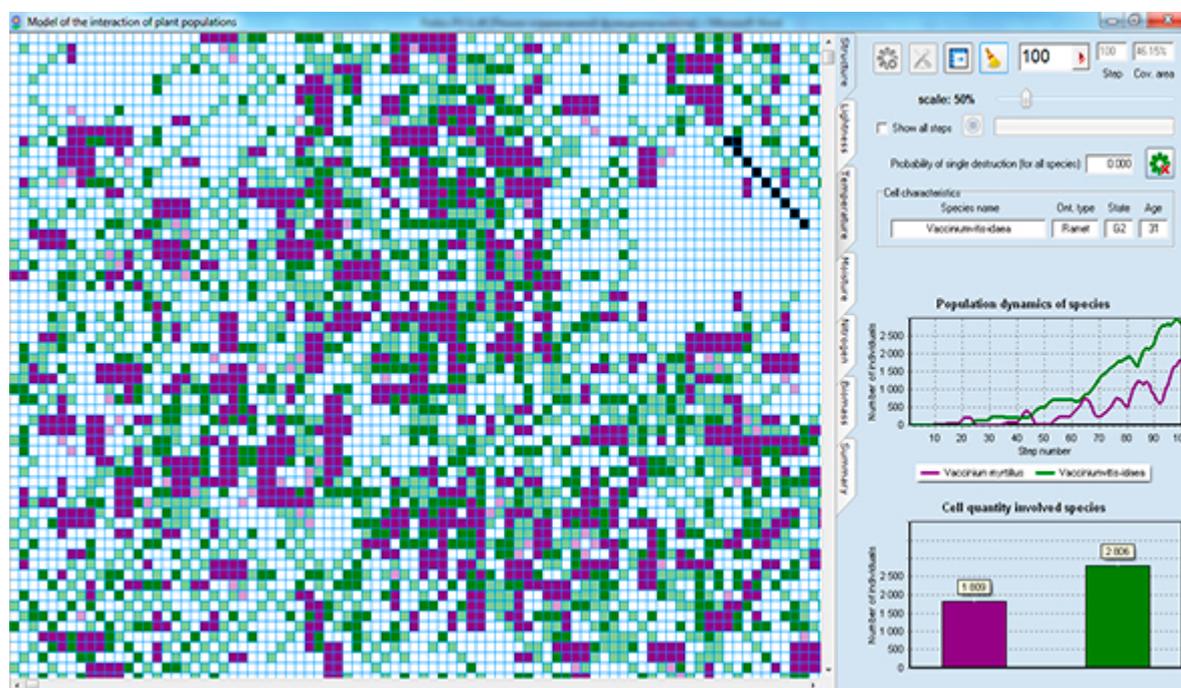


Рисунок 1. Основной интерфейс программы CAMPUS-S

Разработанная модель позволяет дать прогноз динамики популяций и экосистемных функций растений травянисто-кустарничкового яруса (регулирование биогеохимических циклов, поддержание биоразнообразия, участие в создании недревесной продукции) при изменении климатических условий и сильных разрушающих воздействиях (рубки, пожары); а также исследовать устойчивость и продуктивность живого напочвенного покрова и его участия в круговороте углерода и азота в разных климатических и эдафических условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-04-08712).

## Литература

- Зубкова Е.В., Фролов П.В., Комаров А.С. Обоснование алгоритмов моделирования динамики популяций и сообществ кустарничков в терминах онтогенетических состояний. Настоящий сборник.  
Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modelling // Ecol. Mod. 2001. V. 138. P. 289–308.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ЗАНЯТОГО НАСЕЛЕНИЯ: АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД

Хавинсон М.Ю.<sup>1</sup>, Колобов А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия*  
[havinson@list.ru](mailto:havinson@list.ru)

<sup>2</sup>*Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия*  
[alex\\_0201@mail.ru](mailto:alex_0201@mail.ru)

**Аннотация:** В динамике численности занятого населения как на уровне отдельных стран, так и на региональном уровне обнаружены структурные колебания, связанные с возрастной структурой занятого населения. На основе агент-ориентированного подхода описаны простейшие возможные стратегии трудоустройства разновозрастных занятых. Показано, что сочетания этих стратегий могут вызывать колебания динамики численности занятых.

Колебательные и сложные режимы динамики социально-экономических систем до сих пор являются недостаточно изученными, а их содержательные интерпретации – дискуссионными. Выявляются новые феноменологические закономерности в социально-экономических временных рядах, одной из которых являются структурные колебания численности занятого населения в разрезе возрастных групп. Моделирование этих колебаний позволило объяснить возникающие динамические режимы численности разновозрастных занятых фактором взаимодействия занятых, например, в виде взаимной помощи (симбиоза) или конкуренции (Хавинсон, Кулаков, 2014). При этом осталось неясным, каков вклад в наблюдаемые колебания индивидуальных или групповых стратегий трудоустройства занятых. Согласно неоклассической экономической теории экономический агент (в данном случае занятый) на рынке труда должен действовать так, чтобы максимизировать свою прибыль. В дальнейшем в экономической теории были введены допущения об ограниченной рациональности агента, который стремится не только к максимизации прибыли, но и к удовлетворению своих социальных потребностей (Simon, 1957; Чернавский Д.С. и др., 2011; Chena, Lib, 2012; Хавинсон, 2015). Исследовать, как различные стратегии трудоустройства работников могут влиять на динамику численности занятых удобно с помощью агент-ориентированного подхода (Колобов, Фрисман, 2013; Колобов, 2014), реализованного в простейшей модели.

В указанной модели динамики разновозрастных занятых предлагается рассматривать шесть возрастных групп занятых (агентов) 16-19 лет, 20-24 лет, 25-29 лет, 30-39 лет, 40-49 лет и 50-60 лет, которые распределяются по трем условным отраслям экономики. Каждая отрасль оценена по трехбалльной шкале, исходя из величины зарплаты, уровня престижа и условий труда. Оценки выбраны таким образом, чтобы каждая отрасль лидировала только по одному показателю. Рассмотрены 6 стратегий выбора отрасли, которые подразделяются на чистые и смешанные. Чистые стратегии заключаются в стремлении занятого максимизировать один показатель: зарплату, престиж или условия труда. Смешанные стратегии заключаются в желании агента выбрать отрасль, максимально удовлетворяющую двум критериям: зарплате и престижу, зарплате и условиям труда, престижу и условиям труда. Также полагается, что для каждой возрастной группы занятых характерна одна стратегия поведения. Перемещение работников между отраслями осуществляется, исходя из выбора и реализации конкретной стратегии. Начальные условия в модели соответствуют равномерному распределению разновозрастных занятых по отраслям. В результате проведения численных экспериментов обнаружено, что сочетание различных стратегий занятых может приводить к неравномерному распределению работников в разрезе возрастов и условных отраслей. Полученные результаты подчеркивают важность изучения

социального поведения агентов как фактора, влияющего на общую динамику и распределение численности занятого населения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РГНФ, проект № 15-02-00259/14 «Развитие теоретических концепций и математического моделирования демографической и социально-экономической динамики».*

## **Литература**

- Колобов А.Н. Моделирование пространственно-временной динамики древесных сообществ: индивидуально-ориентированный подход // Лесоведение. 2014. № 5. С. 72–82.
- Колобов А.Н., Фрисман Е.Я. Моделирование процесса конкуренции за свет в одновозрастных древостоях // Известия РАН. Серия: Биологическая. 2013. № 4. С. 463–473.
- Хавинсон М.Ю. Экономифизика: от анализа финансов до судьбы человечества // Пространственная экономика. 2015. № 1. С. 144-166.
- Хавинсон М.Ю., Кулаков М.П. Математическое моделирование динамики численности разновозрастных групп занятых в экономике региона // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т.6. № 3. С. 441-454.
- Чернавский Д.С., Старков Н.И., Малков С.Ю., Косе Ю.В., Щербаков А.В. Об экономифизике и ее месте в современной теоретической экономике // Успехи физических наук. 2011. Т. 81. № 7. С. 767–773.
- Chena S.-H., Lib S.-P. Econophysics: Bridges Over a Turbulent Current // International Review of Financial Analysis. 2012. Vol. 23. Pp. 1–10.
- Simon H.A. Models of Man: Social and Rational. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1957. 279 p.

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ЛЕСОВ СРЕДСТВАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Шанин В.Н.<sup>1</sup>, Комаров А.С.<sup>1</sup>, Mäkipää R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино, Российская Федерация*  
[shaninvn@gmail.com](mailto:shaninvn@gmail.com)

<sup>2</sup>*Natural Resources Institute Finland, Vantaa, Finland*

**Аннотация:** Работа посвящена поиску оптимальной стратегии управления смешанными разновозрастными лесами с помощью средств имитационного моделирования. Показано, что разновозрастные древостои демонстрируют более эффективное потребление ресурсов (за счет более равномерного распределения биомассы подземных органов и более полного использования элементов почвенного питания), что приводит к росту их продуктивности по сравнению с одновозрастными монокультурами.

### 1. Задачи работы

Задачей работы является определение оптимальной (с точки зрения сохранения баланса углерода в экосистеме) стратегии управления смешанными разновозрастными лесами. В рамках работы были сформулированы следующие вопросы: (1) являются ли смешанные леса более продуктивными по сравнению с монокультурами за счет более эффективного использования ограниченных ресурсов; (2) возрастает ли эффективность использования ресурсов (в первую очередь, доступных для растений соединений азота в почве) в разновозрастных древостоях, по сравнению с монокультурами; (3) способны ли разновозрастные леса долгое время поддерживать продуктивность на высоком уровне при естественном развитии и при разных лесохозяйственных сценариях?

### 2. Материалы и методы

Для проведения имитационных экспериментов использовалась система моделей EFIMOD (Komarov et al., 2003). Она позволяет имитировать развитие древостоев с точным пространственным расположением деревьев. Функциональные возможности системы моделей EFIMOD были расширены с помощью новой процедуры, имитирующей механизмы адаптации корневых систем деревьев к конкуренции со стороны соседних деревьев и к неоднородностям в распределении ресурсов почвы (Shanin et al., 2014). Модель была откалибрована и верифицирована на основе региональных таблиц хода роста (Ivessalo, Ivessalo, 1975).

Имитировалось развитие модельных участков леса при стационарном климате (Venäläinen et al., 2005). Для инициализации были использованы данные по содержанию азота и органического вещества в почве (Tamminen, 1991). Моделировалось развитие одно- и разновозрастных древостоев, сформированных березой повислой (*Betula pendula* Roth), елью обыкновенной (*Picea abies* (L.) N. Karst.) и сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Параметры древостоев (плотность, средняя высота, средний диаметр) были оценены на основе региональных таблиц хода роста (Ivessalo, Ivessalo, 1975). Продолжительность периода моделирования составила 100 лет. Для оценки влияния неопределенности входных параметров на результаты моделирования использовалось статистическое моделирование методом Монте-Карло. Имитировалось развитие древостоев с различным начальным соотношением деревьев разных видов и разных групп возраста.

### 3. Результаты

Результаты моделирования оценивались по нескольким ведущим переменным, в т.ч. эффективности потребления азота из почвы (кг азота на кг массы тонких корней дерева) и величине нетто-экосистемной продукции (чистая первичная продукция за вычетом затрат на дыхание). Показано, что удельное потребление азота снижается с возрастом (рисунок 1). Разновозрастные и смешанные древостои демонстрируют более эффективное потребление ресурсов (за счет более равномерного распределения биомассы подземных органов), что приводит к росту их продуктивности, по сравнению с одновозрастными монокультурами.

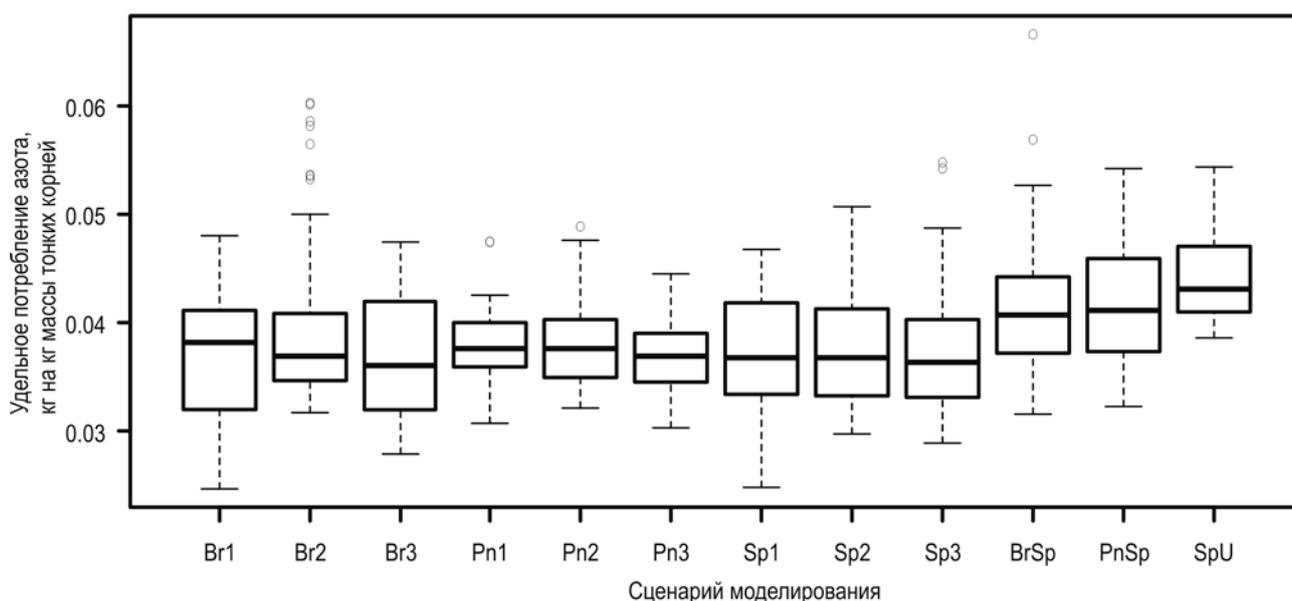


Рисунок 1 – Удельное потребление азота, кг N на кг массы тонких корней при разных сценариях. “Br1-3” – результаты для молодых, средневозрастных и спелых березняков, соответственно; “Pn1-3” – то же для сосняков; “Sp1-3” – то же для ельников. “BrSp” – то же для спелого березняка с подростом ели; “PnSp” – то же для спелого сосняка с подростом ели; SpU – то же для разновозрастного ельника.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-04-05400) и Академии наук Финляндии (гранты №№ 140766 и 278151).

### Литература

- Iivessalo Y., Iivessalo M. Suomen metsätyypit metsiköiden luontalsen kehitys- ja puuntuotto-kyvyn valossa // Acta Forestalia Fennica, 1975, 144, P. 1-101.
- 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 – the system of simulation models of forest growth and elements cycles in forest ecosystems // Ecological Modelling, 2003, 170, P. 373-392.
- Shanin V., Mäkipää R., Shashkov M., Ivanova N., Moskalenko S., Rocheva L., Grabarnik P., Bobkova K., Manov A., Komarov A. A simple spatial model of belowground competition in mixed stands. 8th European Conference on Ecological Modelling, ECEM2014, October 27-30, 2014. Marrakech, Morocco. Conference proceedings. P. 31-32.
- Tamminen P. Kangasmaan ravinnetunnusten ilmaiseminen ja viljavuuden alueellinen vaihtelu Etelä-Suomessa // Folia Forestalia, 1991, 777, P. 1-40.
- Venäläinen A., Tuomenvirta H., Pirinen P., Drebs A. A basic Finnish climate data set 1961-2000 – description and illustrations. Finnish Meteorological Institute, Reports No. 5, 2005, 27 p.

## ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ КОНКУРЕНЦИИ В СМЕШАННЫХ ДРЕВОСТОЯХ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ С АДАПТИВНЫМ АЛГОРИТМОМ

Шанин В.Н.<sup>1</sup>, Шашков М.П.<sup>1</sup>, Иванова Н.В.<sup>2</sup>, Рочева Л.К.<sup>3</sup>, Москаленко С.В.<sup>1</sup>, Бурнашева Э.Р.<sup>4</sup>, Комаров А.С.<sup>1</sup>, Mäkipää R.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино, Российская Федерация*

[shaninvn@gmail.com](mailto:shaninvn@gmail.com)

<sup>2</sup>*Институт математических проблем биологии РАН, г. Пущино, Российская Федерация*

<sup>3</sup>*Администрация ГО Пущино, г. Пущино, Российская Федерация*

<sup>4</sup>*Башкирский Государственный Университет, Уфа, Российская Федерация*

<sup>5</sup>*Natural Resources Institute Finland, Vantaa, Finland*

**Аннотация:** Предложена новая модель корневой конкуренции между деревьями в смешанных древостоях, учитывающая вертикальную и горизонтальную неравномерность в распределении корней древесных растений разных видов и варьирование условий местообитания.

### 1. Описание модели

В предложенной модели имитируемое пространство представлено квадратной решеткой, разделенной на ячейки одинакового размера. Площадь зоны питания каждого дерева зависит от диаметра ствола, вида дерева и условий местообитания. Очередность включения новых ячеек в зону питания зависит от расстояния между текущей ячейкой и базовой (т.е., той, в которой располагается само дерево), массы корней других деревьев в текущей ячейке и количества доступных элементов питания (прежде всего, азота) в данной ячейке. Согласно формулировке модели, элементы минерального питания в каждой ячейке распределяются между деревьями пропорционально биомассе их тонких корней в данной ячейке, с дополнительными поправками на расстояния до ствола, вид и возраст дерева (Лебедев, 2012; Лебедев, Лебедев, 2012). Модель описывает вертикальное распределение биомассы корней по профилю почвы посредством степенной функции с видоспецифичными коэффициентами. Скорость оборота тонких корней неодинакова в пределах зоны питания и определяется отношением потребленного на текущем шаге азота к массе тонких корней в данной ячейке.

### 2. Результаты и обсуждение

Интенсивность корневой конкуренции возрастает от молодых древостоев к спелым. Также в этом ряду возрастает однородность в распределении подземной биомассы. При этом для древостоев всех возрастных групп распределение плотности пересечений зон питания имеет колоколообразный вид (рисунок 1а).

Различия в характере начального расположения деревьев также оказывали влияние на характер конкуренции. При регулярном расположении (по квадратной решетке) и при случайном расположении деревьев обычно наблюдалось колоколообразное распределение плотности пересечений зон питания (с незначительными отклонениями во втором случае), в то время как при групповом расположении деревьев (в нескольких плотных кластерах) распределение пересечений зон питания имело бимодальный характер. Правая часть данного распределения соответствует конкуренции внутри кластеров, тогда как левая часть – «окнам» между кластерами, где интенсивность конкуренции невысока (рисунок 1б).

В одновозрастных древостоях, по сравнению с древостоями с более сложной структурой, количество пересечений зон питания было ниже. Кроме того, для древостоя с двумя древесными ярусами наблюдалось бимодальное распределение (рисунок 1в).

Различный характер пространственного распределения азота в доступной для растений форме также оказал влияние на характер распределения подземной биомассы в древостое. Случайное и мозаичное распределение привело к усилению корневой конкуренции (гистограмма скошена вправо, среднее количество пересечений выше) по сравнению с однородным распределением. Правая часть гистограмм, скорее всего, соответствует распределению корней в богатых азотом участках имитационной решетки, где корневая конкуренция выше (рисунок 1г).

Результаты моделирования показали, что увеличение сложности структуры древостоев (в т.ч. пространственное расположение деревьев, видовой состав, возрастная структура, вертикальная структура) выражается в более сложном пространственном характере конкурентных взаимоотношений.

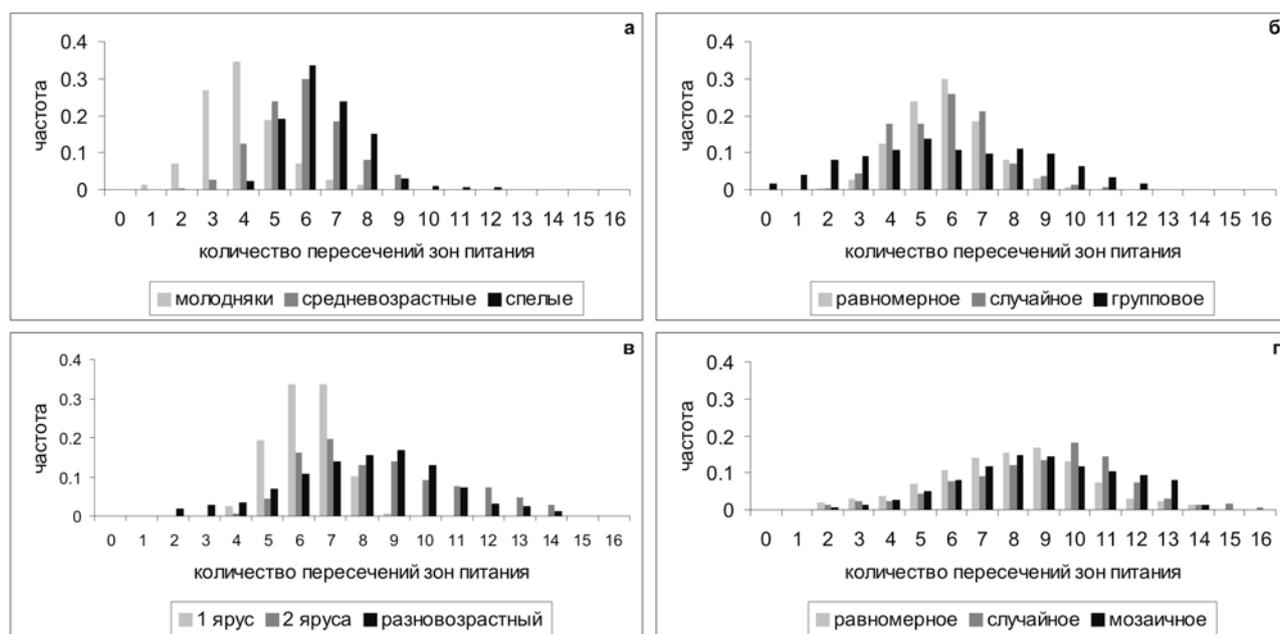


Рисунок 1 – Распределение интенсивности корневой конкуренции (количество пересечений зон питания на ячейку имитационной решетки) для (а) древостоев разного возраста (на примере одновидовых древостоев со случайным расположением деревьев); (б) при различном характере расположения деревьев (на примере средневозрастных одновидовых древостоев); (в) при различной вертикальной структуре древостоев (средневозрастный березняк, березняк с подростом ели, разновозрастный ельник); (г) при разном характере пространственного распределения доступных соединений азота в почве – равномерно по всем ячейкам имитационной решетки, случайно с варьированием в 20% от среднего, крупными «пятнами» с варьированием в 20% от среднего (на примере разновозрастного ельника). Для всех случаев, кроме (г) полагалось, что соединения азота в почве равномерно распределены по всем ячейкам имитационной решетки.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-04-05400) и Академии наук Финляндии (гранты №№ 140766 и 278151).

## Литература

- Лебедев Е.В. Продуктивность берёзы белой на уровне организма в онтогенезе в европейской части России // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2012. - № 4. - С. 18-22.  
Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Взаимосвязь биологической продуктивности и поглотительной деятельности корней хвойных пород в онтогенезе в зоне южной тайги России // Агрехимия. – 2012. - № 8. - С. 9-17.

## ИЗМЕНЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ ПОД ПЛАНТАЦИЯМИ С БЫСТРОРАСТУЩИМИ ФОРМАМИ БЕРЕЗЫ

Шанин В.Н.<sup>1</sup>, Комаров А.С.<sup>1</sup>, Шестибратов К.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино, РФ*  
shaninvn@mail.com; as\_komarov@rambler.ru

<sup>2</sup> *Филиал Института биоорганической химии имени академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН, г. Пущино, РФ*  
schestibratov.k@yandex.ru

**Аннотация:** сформулирована задача анализа ускоренного круговорота органического вещества и азота в планируемых плантациях быстрорастущих биотехнологических форм березы; приводится пример анализа этой ситуации с помощью системы моделей роста леса и биологического круговорота EFIMOD; показана необходимость применения органических удобрений для сохранения баланса углерода и азота в таких плантациях.

При создании промышленных лесных плантаций, заложенных на основе быстрорастущих древесных видов с улучшенными ростовыми характеристиками и биохимическим составом, неизбежно возникают вопросы о влиянии таких растений на окружающую среду. С целью анализа возможных последствий выращивания модифицированных растений березы (*Betula pendula* Roth), с учетом данных, полученных в ФИБХ РАН (Shestibratov et al., 2011), для оценки потенциала накопления биомассы и динамики запасов азота в почве в плантациях биотехнологических форм березы по сравнению с нативной формой была использована система моделей EFIMOD (Komarov et al., 2003).

Компьютерный эксперимент предусматривал имитацию динамики древостоя и почвы на березовых плантациях в течение 5 оборотов рубки; продолжительность оборота рубки составила 25 лет. Во время первой из имитируемых ротаций происходила автоподстройка модели, поэтому данная ротация не учитывалась при последующем анализе.

Были использованы 3 имитационных сценария: (1) выращивание плантаций нативных форм березы; (2) выращивание плантаций быстрорастущих форм березы без удобрений и (3) выращивание плантаций быстрорастущих форм березы с внесением удобрений. При параметризации модели было принято допущение, что быстрорастущие формы березы имеют на 25% большую максимальную биологическую продуктивность (Shestibratov et al., 2011).

В пределах каждого оборота рубки имитировались следующие лесохозяйственные мероприятия: (1) внесение органических удобрений на поверхность почвы перед посадкой (только для сценария (3)); (2) посадка саженцев березы; (3) сплошная рубка при возрасте древостоя 30 лет. Предполагалось, что массовая доля азота в удобрении составляет 0.35%, а норма внесения – 3 т га<sup>-1</sup> (Желдак, Атрохин, 2002). Посадка березы имитировалась по регулярной решетке с расстоянием между рядами в 5 м. Высота саженцев составляла 1.5±0.5 м, диаметр на уровне груди 0.75±0.025 см; данные параметры были определены на основе региональных таблиц хода роста (Швиденко и др., 2008). Моделирование рубки предполагало, что с лесосеки изымается 100% массы стволов, 50% массы ветвей и 10% массы листвы. В качестве контролируемых переменных были выбраны: (1) общее количество доступного азота в почве и (2) растительная масса, полученная на каждом обороте рубки. Результаты моделирования (Рисунок 1) показали, что плантации биотехнологических форм демонстрируют более интенсивный рост и накопление фитомассы, что, в свою очередь, приводит к более интенсивному потреблению деревьями соединений азота из почвы. Внесение удобрений позволяет в значительной степени

компенсировать усиленное потребление элементов минерального питания. Кроме того, к концу четвертого оборота рубки, наблюдается рост количества доступных соединений азота в почве. Данный факт может объясняться тем, что быстрорастущие формы березы обеспечивают более высокое, по сравнению с нативными формами, поступление растительного опада, который вовлекается в процессы минерализации в почве. Одним из конечных продуктов минерализации являются неорганические соединения азота.

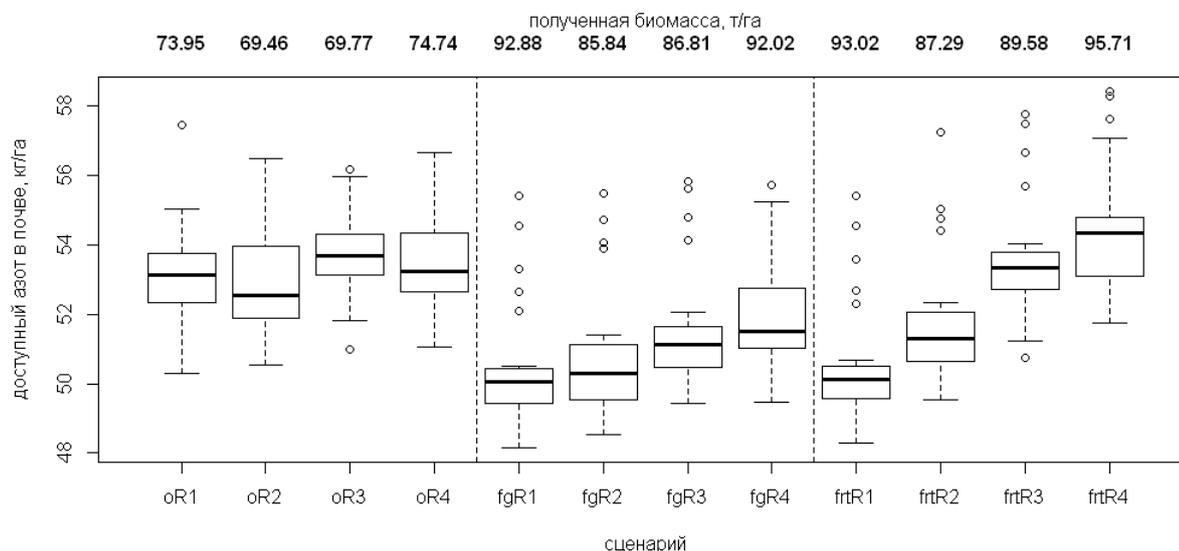


Рисунок 1. Результаты моделирования по выбранным сценариям: полученная в ходе лесозаготовки биомасса деревьев, т/га (верхний ряд чисел) и динамика содержания почвенного азота в форме доступных для растений соединений, кг/га, за один оборот рубки, т.е. за 25 лет (приведены медианное значение, 2-й и 3-й квартили и размах; малыми окружностями показаны «выбросы»). Обозначения сценариев: «o» – плантации нативной формы березы; «fg» – плантации быстрорастущей формы березы, сценарий без внесения удобрений; «ftr» – плантации быстрорастущей формы березы, сценарий с внесением удобрений.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ рамках проекта № 14.616.21.0013 от 17 сентября 2014 года (уникальный идентификатор RFMEFI61614X0013) по теме: «Разработка технологии оценки и прогнозирования экологических эффектов выращивания лесных плантаций на основе биотехнологических форм деревьев с заданными свойствами (увеличенная скорость роста, усиленная ассимиляцией азота почвы, пониженное содержание лигнина, повышенное содержание целлюлозы)».

## Литература

- Желдак В.И., Атрохин В.Г. Лесоводство, ч. I. – М.: ВНИИЛМ, 2002. – 336 с.
- Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели роста и продуктивности основных лесообразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). – М.: Федеральное агентство лесного хозяйства. Международный институт прикладного системного анализа, 2008. – 886 с.
- Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L., Nadporozhskaya M.A., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S., Zudina E.V., Zoubkova E.V. EFIMOD 2 – a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecol. Mod. - 2003. - V. 170. - P. 373–392.
- Schestibratov K., Lebedev V., Podrezov A., Salmova M. Transgenic aspen and birch trees for Russian plantation forests // BMC Proceedings. - 2011. - Vol. 5 (Suppl. 7). - P. 124.

## МАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ СЕЗОННОЙ ДИНАМИКИ ЧИСЛЕННОСТИ ДОЖДЕВОГО ЧЕРВЯ *APORRECTODEA CALIGINOSA*

Шашков М.П.<sup>1</sup>, Стриганова Б.Р.<sup>2</sup>, Комаров А.С.<sup>1</sup>, Фролов П.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, Пущино, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова

[max.carabus@gmail.com](mailto:max.carabus@gmail.com)

**Аннотация:** в работе представлен опыт разработка матричной модели популяционной динамики массового внутрипочвенного червя *Aporrectodea caliginosa* основанного на размерных классах онтогенетических состояний и поливариантности онтогенеза

Для моделирования популяционной динамики массового внутрипочвенного червя *Aporrectodea caliginosa* были использованы данные сборов, проведенных в широколиственных лесах Калужской области в течение шести полевых сезонов. Были проанализированы данные по 2296 экземплярам дождевых червей. Каждый экземпляр был отнесен к определенному размерно-онтогенетическому классу (Шашков, в печати) из четырех ювенильных, двух созревающих и трех половозрелых (рис.1).

Составлена матричная модель, в которой сезону активности дождевых червей соответствует шесть периодов (матриц перехода из одного состояния в другие) + перезимовка. Выделено три варианта динамики, для каждого из которых подобран свой набор матриц. Вариант 1: снижение численности к середине лета за счет гибели большей части молодежи, вышедшей весной и восстановление осенью за счет выхода из коконов новой генерации. Вариант 2: монотонное увеличение численности в течение сезона. Вариант 3: увеличение численности к середине лета с последующим снижением к осени. При всех трех вариантах предполагается, что часть популяции гибнет во время перезимовки. Еще один вариант, при котором численность монотонно снижается в течение сезона не рассматривался, так как такая схема при моделировании быстро приведет к гибели популяции, что не наблюдается в природе, а смена схемы динамики от сезона к сезону в модели пока не предусмотрено.

Разработка модели направлена на оценку смертности дождевых червей в каждой онтогенетической стадии, а также на оценку темпов восстановления популяции после неблагоприятных воздействий

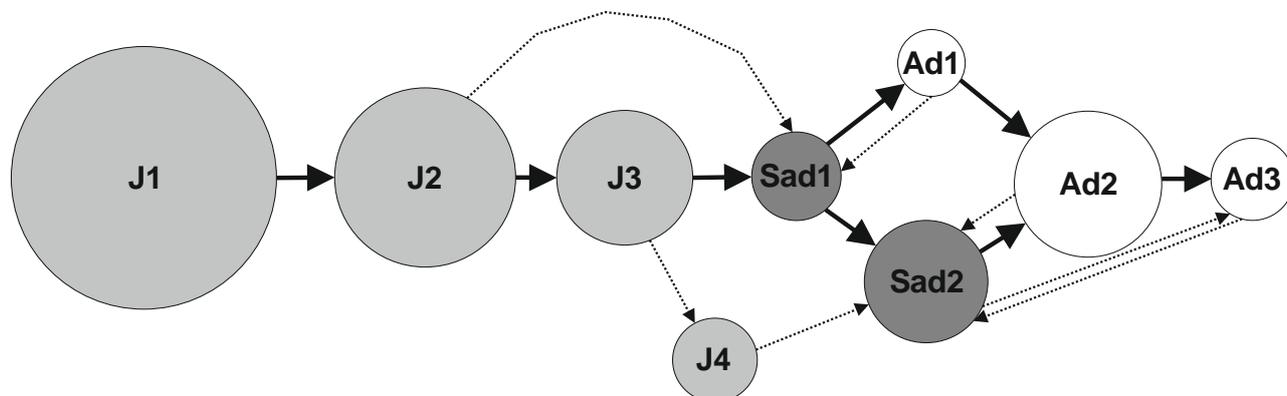


Рисунок 1 – Схема онтогенеза *Aporrectoidea caliginosa*. J1-J4 – ювенильные черви, Sad1-Sad2 – созревающие, Ad1-Ad3 – половозрелые. Площадь пропорциональна числу экземпляров.

### Литература

Шашков М.П. Популяционно-демографические подходы к изучению дождевых червей (Oligochaeta, Lumbricidae) на примере внутрипочвенного вида *Aporrectodea caliginosa* // Лесоведение. (в печати).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ И КРУГОВОРОТА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И АЗОТА В ПОПУЛЯЦИЯХ КУСТАРНИЧКОВ

Комаров А.С.<sup>1</sup>, Зубкова Е.В.<sup>1</sup>, Фролов П.В.<sup>1</sup>, Быховец С.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
Пущино, РФ

as\_komarov@rambler.ru; elenazubkova2011@yandex.ru; ximikadze@gmail.com; s\_bykhovets@rambler.ru

**Аннотация:** рассмотрены проблемы, возникающие при моделировании клональных растений, в том числе кустарничков, рассмотрено построение дискретной клеточно-автоматной модели для анализа динамики популяций и биологического круговорота в системе кустарничек-почва.

В последние десятилетия в лесной науке усилился интерес к анализу и прогнозированию экосистемных функций лесов. Важную роль в выполнении экосистемных функций играет недревесная продукция, которая активно участвует в биогеохимических циклах элементов. Так, например, в северной тайге в одном из самых распространенных типов леса ельнике-чернично-зеленомошном ежегодный прирост фитомассы древостоя составляет 3.76 т/га, а прирост напочвенного покрова 3.49 т/га, данные по опадам – 3.76 и 3.49 т/га соответственно (Бобкова, 1987). Таким образом, круговорот элементов в таком типе леса происходит в древостоях и напочвенном покрове примерно в равных долях. Как правило, это в модельных представлениях не учитывается.

В бореальных лесах и тундре широко распространены кустарнички рода *Vaccinium*, в том числе черника, брусника и др., относящихся к клональным корневищным растениям. Развитие растений этой жизненной формы происходит, создавая клоны со сложной пространственной структурой. Это затрудняет как моделирование этой структуры, так и ее параметризацию по экспериментальным данным. Нами был разработан базовый программный продукт CAMPUS (Фролов, 2015), предназначенный для моделирования геометрии разрастания и расселения растений с различными типами онтогенеза при индивидуальном росте и развитии. На Рисунке 1 приведены основные схемы разрастания и увеличения размеров растений черники для разных онтогенетических состояний (Зубкова и др., 2015).

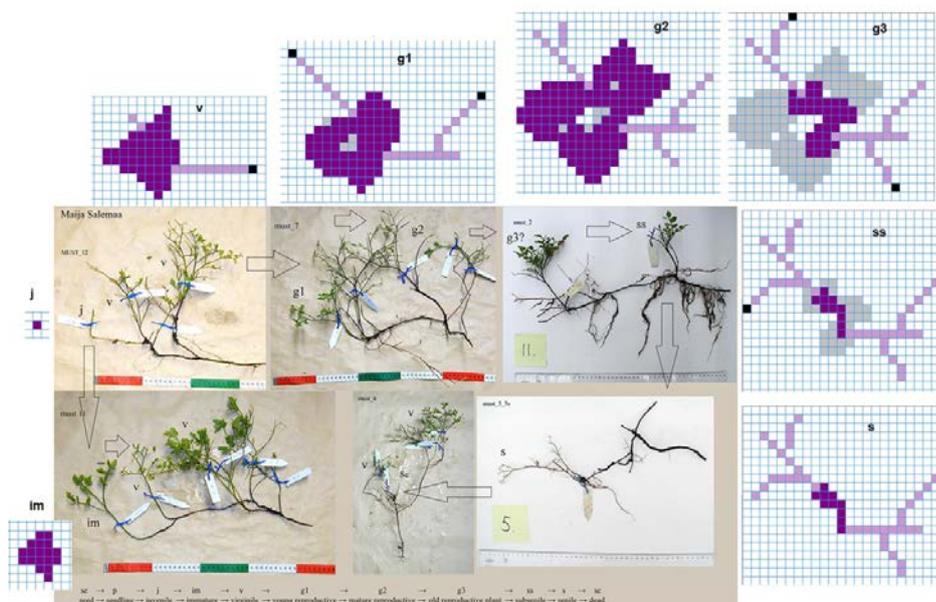


Рисунок 1. Пример моделирования разрастания и размеров клонов черники (по материалам Maija Salemaa (Luke, Finland))

Разработанная модель динамики клонов кустарничков в терминах динамики парциальных кустов и/или проективного покрытия позволяет исследовать условия самоподдержания ценопопуляций кустарничков отдельных видов при инвазии на свободное пространство и при различной неоднородности среды, а также анализ возможности совместного сосуществования клонов двух разных видов.

Развитием описанной модели является модель, описывающая суммарную динамику биомассы кустарничков и их фракций (корневища, побеги, листва, тонкие корни, плоды) на основе данных, полученных при дискретном описании онтогенезов (Зубкова и др., 2015) и привлеченных дополнительных данных по продуктивности и биомассе фракций растений. Основой для построения модели продуктивности является объединение структурной модели, описанной выше, данных по продуктивности и найденных нами устойчивых соотношений между фракциями биомассы черники и брусники в виде ранговых распределений (Komarov et al., 2013), параметры которых зависят от условий местообитания.

Для описания биологического круговорота органического вещества в системе кустарнички-почва потребовалось объединение разработанных моделей с моделью динамики органического вещества в почве ROMUL (Chertov et al., 2001), которая, в свою очередь, связана с генератором почвенной погоды SCLISS (Быховец, Комаров, 2002). Это позволило замкнуть описания круговоротов углерода и азота в экосистеме. Тестирование системы моделей показало ее адекватность при описании популяций и сообществ кустарничков. В дальнейшем планируется включение модели динамики биомассы кустарничков в систему моделей круговорота углерода и азота EFIMOD (Komarov et al., 2003).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-04-08712).

## Литература

- Бобкова К.С. Биологическая продуктивность хвойных лесов Европейского Северо-Востока. - Л.: Наука, 1987. - 156 с.
- Быховец С.С., Комаров А.С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение, - 2002. - № 4, - С.443-452.
- Зубкова Е.В., Фролов П.В., Комаров А.С. Обоснование алгоритмов моделирования динамики популяций и сообществ кустарничков в терминах онтогенетических состояний. Настоящий сборник.
- Фролов П.В. Имитационное моделирование пространственно-временной динамики популяций растений разных жизненных форм – модель CAMPUS. Настоящий сборник.
- Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Bykhovets S.S., Zudin S.L. ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modelling // Ecol. Mod. 2001. V. 138. P. 289–308.
- Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L., Nadporozhskaya M.A., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S., Zudina E.V., Zoubkova E.V. EFIMOD 2 – a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecol. Mod. 2003. V. 170. P. 373–392.
- Komarov A.S., Zubkova E.V., Salemaa M., Mäkipää R. Rank distributions and biomass partitioning of plants // Proceedings of the 7th International Conference on Functional-Structural Plant Models. METLA. 2013. P. 67-69.

## ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ И СООБЩЕСТВ КУСТАРНИЧКОВ В ТЕРМИНАХ ОНТОГЕНЕТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ

Зубкова Е.В.<sup>1</sup>, Фролов П.В.<sup>1</sup>, Комаров А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук, Пущино, Российская Федерация

[elenazubkova2011@yandex.ru](mailto:elenazubkova2011@yandex.ru), [ximikadze@gmail.com](mailto:ximikadze@gmail.com), [as\\_komarov@rambler.ru](mailto:as_komarov@rambler.ru),

**Аннотация:** проведено детальное описание онтогенеза листопадного кустарничка черники обыкновенной (*Vaccinium myrtillus* L.) с целью построения дискретной клеточно-автоматной модели динамики популяций этого вида. Разработана модифицированная схема признаков онтогенетических состояний, проведено исследование геометрии разрастания корневищ

Детальное описание онтогенезов растений позволяет моделировать динамику популяций и сообществ на основе статических экспериментальных описаний популяций в виде спектров онтогенетических состояний. Это основано на дискретном описании происходящих с растением изменений, что соответствует стадийному описанию онтогенезов, разрабатываемому российской школой популяционной экологии растений (Ценопопуляции..., 1976). Выделение онтогенетических состояний проводится на основании морфологических признаков строения побеговой и корневой систем, учитывается наличие генеративных органов; оценивается выраженность процессов новообразования морфологических структур (побегов вегетативных и генеративных, корней, корневищ (ризомов) и др.) и их отмирания. Длительности каждого онтогенетического состояния и сроки их наступления от момента прорастания семени различаются и зависят от вида растения, благоприятности условий внешней среды (почвенные условия, климатические условия) и других факторов. Требования к условиям среды по свету, условиям богатства почвы, водообеспеченности различаются на разных стадиях развития. Степень и характер влияния растения на место обитания, проявляется в размере занимаемой территории, воздействии на другие растения.

Для решения задач моделирования динамики популяции листопадного кустарничка черники обыкновенной (*Vaccinium myrtillus* L.), занимающей доминирующие позиции в травяно-кустарничковом ярусе хвойных и хвойно-широколиственных лесов бореальной зоны Европейской части России, нами были собраны необходимые сведения о геометрии разрастания и биометрических характеристиках онтогенетических стадий роста. По жизненной форме черника – кустарничек, образующий длинные подземные побеги, называемые корневищами или ризомами, которые ветвятся, и на которых образуются надземные парциальные кусты. Для определения параметров онтогенетических состояний надземных парциальных кустов на основании большого числа публикаций (Полянская и др., 2000; Шутов, 2001, Ефимова, 2007, Мазная, Лянгузова, 2010), наших собственных и натуральных исследований, предоставленных нам др-ом М. Саалемаа (Maija Salemaa) (Финляндия), составлена модифицированная таблица признаков возрастных состояний.

Для определения геометрии роста корневищ были проанализированы сканированные гербарные листы парциальных кустов черники разных возрастных состояний, составлены сводные таблицы, вычислены средние значения диаметров кустов и длины участков корневищ до ветвления и образования надземных кустов. Этих данных оказалось достаточно для разработки дискретной клеточно-автоматной модели CAMPUS (Фролов, 2015).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-04-08712).

Обозначение	Характеристика
se	Семя – стадия покоя, переживания не благоприятных условий. Свежесобранные семена могут начать прорасти на 10 день после посадки, максимальная всхожесть на 26-30 день.
p	Однопобеговое растение с семядольными листьями. . Высота растения – до 3 см. Диаметр побеговой части растения около 1 см. Длительность состояния от 1 до 3 лет.
j	Ортотропный не разветвленный побег. Семядольных листьев нет. Если растение образовано из семени – генета, из подземного побега – рамета. Листья могут сохраняться на побеге до 2 лет. Корни светло-коричневого цвета, у раметы расположены на горизонтальном корневище. Диаметр побеговой части около 1-3 см. Возраст 1-3 года
im	Побег , зелёного цвета без признаков одревеснения, Нарастает симподиально, ветвится до II порядка. Листья крупные (до 2 см). Диаметр побеговой части в среднем 6 см. Возраст 2-4 года.
v	Побег ветвится до III-V порядков, зелёного цвета, без признаков одревеснения. В подземной части образуются подземные побеги – ризомы. Ризомы могут ветвиться, растут до 10 см в год. Выходя на поверхность, образуют надземные побеги ювенильного возраста. Диаметр побеговой части в среднем 8 см. (от 5 до 10 см). Возраст 3-10 лет.
g1	Начало плодоношения. Побеги ветвятся до IV порядка. Побеги зелёного цвета – нет одревеснения. Диаметр кроны в среднем 10 см (до 20 см). Возраст парциального куста 3-5 лет.
g2	Обильное плодоношение. Ветвление побегов V и более порядков. Побег I порядка одревесневает – в нижней части приобретает коричневый оттенок. Начинается усыхание верхней части главного побега. Диаметр кроны в среднем 30 см (до 40 см). Возраст парциального куста 5-10 лет.
g3	Плодоношение среднее и обильное. Засыхают главный и боковые побеги. Живые побеги в центре куста одревесневают в нижней части, листья мелкие. В основании главного побега образуются мощные побеги замещения с крупными листьями. Диаметр кроны в среднем 20 см (до 40 см). Возраст парциального куста 7-14 лет.
ss	Цветения и плодоношения нет. Большая часть кроны с усохшими побегами. Возраст парциального куста 6-14 лет.
s	Живые побеги 1-2, расположены на одревесневших, большей частью отмерших побегах, имеют маленькие приросты. Листья мелкие. Возраст парциального куста 5-16 лет.

## Литература

- Ефимова М.А. Биоморфологические особенности *Vaccinium myrtillus* L. и *Vaccinium vitis-idaea* L. в естественных и антропогенно-нарушенных лесных сообществах Кольского полуострова. Дис. ... канд. биол. наук.- М., 2007.- 157 с.
- Мазная Е.А., Лянгузова И.В. Эколого-популяционный мониторинг ягодных кустарничков при аэротехногенном загрязнении. – СПб: «ВВМ», 2010. – 195 с.
- Полянская Т.А., Жукова Л.А., Шестакова Э.В. Онтогенез черники обыкновенной (*Vaccinium myrtillus* L.) / Онтогенетический атлас лекарственных растений.- Йошкар-Ола, 2000. Т. II.- С. 51-59.
- Фролов П.В. Имитационное моделирование пространственно-временной динамики популяций растений разных жизненных форм – модель САМПУС. Настоящий сборник.
- Ценопопуляции растений: Основные понятия и структура. М.: Наука, 1976. 216 с.
- Шутов В.В. Структура, динамика и плодоношение популяций кустарничковых растений. Дис. ... докт. биол. наук.- Кострома, 2001.- 322 с.