



Материалы

Седьмой Национальной научной конференции
с международным участием



Математическое моделирование в экологии

9–12 ноября 2021 г.
г. Пущино

УДК 57+51-7
ББК 28в6
М34



Ответственные редакторы
доктор физико-математических наук П.Я. Грабарник
профессор, доктор физико-математических наук Д.О. Логофет

Математическое моделирование в экологии / Материалы Седьмой Национальной
научной конференции с международным участием, 9–12 ноября 2021 г. -
Пущино, ФИЦ ПНЦБИ РАН, 2021. 142 с.

Материалы Седьмой Национальной научной конференции с международным участием «Математическое моделирование в экологии» (ЭкоМатМод) 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.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Сопредседатели Программного комитета

- Грабарник Павел Яковлевич, д.ф.-м.н., ФИЦ ПНЦБИ РАН, Пущино
- Логофет Дмитрий Олегович, проф., д.ф.-м.н., ИФА РАН, Москва

Зампредседателя Программного комитета

- Ханина Лариса Геннадьевна, доц., к.б.н., ИМПБ РАН – филиал ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Пущино

Секретарь Программного комитета

- Припутина Ирина Владимировна, доц., к.г.н., ИФХиБПП РАН, Пущино

Члены Программного комитета

- Абакумов Александр Иванович, проф., д.ф.-м.н., ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
- Бобровский Максим Викторович, доц., д.б.н., ИФХиБПП РАН, Пущино
- Вавилин Василий Александрович, д.ф.-м.н., ИВП РАН, Москва
- Мазалов Владимир Викторович, проф., д.ф.-м.н., ИПМИ ФИЦ КарНЦ РАН, Петрозаводск
- Медвинский Александр Берельевич, проф., д.ф.-м.н., ИТЭБ РАН, Пущино
- Поммеренинг Арне, проф., Шведский сельскохозяйственный университет, Умео, Швеция
- Ризниченко Галина Юрьевна, проф., д.ф.-м.н., МГУ, Москва
- Семенов Сергей Михайлович, проф., д.ф.-м.н., ИГКЭ, Москва
- Суховольский Владислав Григорьевич, проф., д.б.н., ИЛ СО РАН, Красноярск
- Титлянова Аргента Антониновна, проф., д.б.н., ИПА СО РАН, Новосибирск
- Топаж Александр Григорьевич, д.т.н., АФИ РАН, Санкт-Петербург
- Ухманьский Януш, проф., Университет Кардинала С. Вышиньского, Варшава, Польша
- Фрисман Ефим Яковлевич, чл.-корр. РАН, ИКАРП ДВО РАН, Биробиджан
- Чертов Олег Георгиевич, проф., д.б.н. Бингенский технический университет, Бинген, Германия

Уважаемые коллеги!

9–12 ноября 2021 г. в г. Пущино прошла Седьмая Национальная конференция с международным участием «Математическое моделирование в экологии» (ЭкоМатМод), которая была организована Институтом физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленным подразделением ФИЦ ПНЦБИ РАН совместно с Институтом математических проблем биологии РАН - филиалом ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН».

Тематика этой конференции, как и все предыдущие конференции ЭкоМатМод, затрагивает основные вопросы моделирования экосистем, решение которых основано на междисциплинарных взаимодействиях. Качественные изменения в области экологии и охраны окружающей среды во многом связаны с использованием экосистемного подхода к управлению природными ресурсами, направленного на устойчивое развитие и сохранение биоразнообразия экосистем. Применение математических методов и моделей как инструмента поддержки принятия решений в задачах охраны окружающей среды в настоящее время востребовано на разных уровнях управления биоресурсами.

Основными направлениями экологического моделирования в нашей стране традиционно являются моделирование циклов элементов в экосистемах, моделирование процессов роста и развития, моделирование динамики популяций и сообществ, прогноз изменения биоразнообразия. Важными задачами остаются моделирование катастрофических воздействий на окружающую среду: моделирование инвазии видов и эпидемий, моделирование последствий техногенных загрязнений, лесных пожаров, всплеск численности насекомых, влияние наводнений и засух.

Программа ЭкоМатМод-2021 включала следующие направления:

- Методы и подходы в моделировании в экологии биосистем
- Моделирование процессов роста и развития живых организмов, динамики популяций и сообществ
- Моделирование наземных экосистем и их компонентов
- Моделирование популяций и сообществ водных экосистем
- Моделирование циклов элементов и потоков вещества в биосфере
- Моделирование глобальных и региональных экологических процессов и антропогенных воздействий на экосистемы
- Моделирование в почвоведении

В Оргкомитет ЭкоМатМод-2021 поступило более 100 материалов докладов из России, а также Польши и Германии. Окончательный состав Сборника материалов определен членами Программного комитета. По необходимости, в тексты материалов были внесены технические редакторские правки, которые не отражались на содержании научных текстов. Сборник дает возможность 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 важным результатом Конференции было очень хорошее представительство основных научных центров и активное участие молодежи. Материалы Конференции отражают высокий уровень этого научного направления в отечественной науке.

Председатель Организационного комитета

д.ф.-м.н. П.Я. Грабарник

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Абакумов А.И., Пак С.Я.</i> Опыт исследования состояния фитопланктона и продуктивности морских экосистем. Перспективы моделирования	9
<i>Андриенко Г.Л., Андриенко Н.В.</i> Визуальная аналитика пространственно-временных данных: современное состояние и перспективы развития	11
<i>Башкин В.Н., Трубицина О.П.</i> Разработка экспертной системы для сочетанного управления геоэкологическими и геополитическими рисками в Арктическом регионе	13
<i>Бутусов О.Б.</i> Математическое моделирование техногенной динамики лесов с помощью нечеткой дифференциальной модели Ферхюльста	16
<i>Войтеховский Ю.Л., Степенищikov В.Г.</i> Моделирование полигональных разбиений карапакса	18
<i>Галицкий В.В.</i> Фрактальный характер формирования системы тилакоидов цианобактерий	20
<i>Гасанов М.Э., Петровская А.Ю., Меркулов Д.М., Трегубова П.Н., Пукальчик М.А., Оселедец И.В.</i> Использование имитационной модели WOFOST и погодной истории для задач оптимизации полива	23
<i>Гасанова З.У.</i> Динамика почвенного покрова сухоречья реки Кума на фоне климатических изменений	25
<i>Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Литти Ю.В., Терентьева И.Е.</i> Моделирование бюджета метана в болотной экосистеме для оценки его транспорта в грунтовые воды	27
<i>Дружинина О.В., Масина О.Н., Щербаков А.В., Васильева И.И., Корепанова А.Э.</i> Построение и анализ устойчивости многомерных моделей динамики взаимодействующих видов	30
<i>Ерёменко Д.А., Медведев С.А.</i> Ассимиляция данных дистанционного зондирования имитационной моделью агроэкосистемы методом минимизации корректирующих возмущений посредством управления азотными подкормками	32
<i>Замолодчиков Д.Г.</i> Прогноз глобального потепления по простой статистической модели	35
<i>Зеленчук П.А., Цибулин В.Г.</i> Уравнения диффузии-адвекции-реакции и идеальное свободное распределение видов на неоднородном ареале	37
<i>Зубкова Е.В., Быховец С.С., Стаменов М.Н., Фролов П.В.</i> Оценка световых условий под пологом для моделирования напочвенного покрова и	40

возобновления деревьев

Иванов Д.Г., Котлов И.П., Минаева Т.Ю., Курбатова Ю.А. 43
Оценки потоков CO₂ на верховом болоте с учетом динамики площадей микроформ

Кириллов А.Н., Данилова И.В. 46
Функция полезности в задаче фуражирования с неполной информацией

Кириллов А.Н., Иванова А.С. 48
Численное моделирование периодического управления, сохраняющего видовую структуру биосообщества

Киселева В.В., Чумаченко С.И., Колычева А.А. 51
Влияние режимов лесопользования на структурное разнообразие лесных экосистем: результаты сценарного моделирования

Колычева А.А., Чумаченко С.И., Киселева В.В., Агольцов А.Ю., Карминов В.Н., Митрофанов Е.М. 54
Имитационное моделирование урожайности лесных ягод с учетом освещенности на уровне напочвенного покрова

Коротков В.Н., Шанин В.Н., Фролов П.В. 57
Всегда ли искусственное лесовосстановление может быть лесоклиматическим проектом?

Котенев Е.С., Сердюков В.В., Кот Л.А., Сердюкова Д.В., Чишениук Т.И., Шкарлет Г.П., Пишихачев Н.Х. 59
Пространственное распределение горного суслика *Spermophilus musicus* и его взаимосвязь с факторами окружающей среды

Кренке А.Н. 62
Выявление инвариантных состояний агроландшафтов на основе иерархического факторного анализа дистанционной информации

Кузнецова Н.А., Суховольский В.Г., Ковалев А.В., Бабенко А.Б. 65
Динамика структуры сообщества коллембол: модели ранговых распределений

Логофет Д.О., Разжевайкин В.Н. 67
Индикаторы потенциального роста популяций: история и современность

Локишина Л.Я., Вавилин В.А., Литти Ю.В. 70
Оценка продукции метана в образцах торфа из типичных болот западной сибери с помощью моделирования динамики стабильных изотопов углерода в метане и углекислом газе

Мателенок И.В. 73
Моделирование влияния свойств лесного полога на видимость расположенного на земле пламени сквозь кроны деревьев

Михайлов В.В., Соболевский В.А., Колтащиков Л.А. 76
Подсчет северных оленей в скоплениях с использованием сверточной нейронной сети архитектуры Mask R-CNN

Молчанов А.Г. 79
Соотношения фотосинтеза и транспирации у сосны и ели в разных условиях окружающей среды

<i>Мухартова Ю.В., Ольчев А.В., Курбатова Ю.А.</i> Трёхмерное моделирование вертикальных и горизонтальных потоков диоксида углерода между верховым болотом и атмосферой	82
<i>Надпорожская М.А., Быховец С.С., Абакумов Е.В.</i> Математическая модель ROMUL: анализ динамики органического вещества литоземов субантарктики	84
<i>Немчинова А.В.</i> Моделирование климаторегулирующей пластичности лесных ландшафтов	86
<i>Остроумов В.Е.</i> Реконструкция истории накопления почвенно-осадочной толщи	89
<i>Парфенова Е.И., Чебакова Н.М., Бажина Е.В.</i> Изменчивость общего содержания озона над территорией Южной Сибири за период наблюдений на станциях сети WOUDC	93
<i>Петросян В.Г., Осипов Ф.А., Кривошеина М.Г., Дергунова Н.Н., Хляп Л.А.</i> Применение ансамблевого подхода для создания моделей динамики ареалов самых опасных инвазионных видов растений России в условиях глобальных климатических изменений	96
<i>Портнов А.М., Быховец С.С., Дин Е.С., Иванова Н.В., Фролов П.В., Шанин В.Н., Шашков М.П.</i> Количественная оценка размеров окон в пологе старовозрастного широколиственного леса наземными и дистанционными методами	99
<i>Потапов М.Б., Бокова А.И., Кузнецова Н.А., Панина К.С., Сараева А.К.</i> Агрегации коллембол на полях озимой пшеницы: структуры в «бесструктурной» среде	103
<i>Припутина И.В., Чертов О.Г., Фролов П.В., Шанин В.Н., Грабарник П.Я.</i> Включение ризосферного прайминг-эффекта в модель динамики органического вещества почв Romul_Hum: подходы и результаты предварительного тестирования	106
<i>Пузаченко М.Ю.</i> Пространственно-временные инвариантные и динамические параметры порядка ландшафтного покрова по данным Landsat 4-8	109
<i>Русаков А.В., Адамович Б.В., Жукова А.А., Медвинский А.Б., Михеева Т.М., Нуриева Н.И.</i> Корреляция и фазовая синхронизация - дополняющие друг друга методы оценки гидроэкологических показателей	112
<i>Сандлерский Р.Б., Кренке А.Н.</i> Регулирующие экосистемные услуги лесных ландшафтов Европейской равнины по данным дистанционного зондирования	115
<i>Соколов А.В., Соколова Л.А.</i> Технология сбалансированной идентификации: выбор моделей мониторинга и прогноза эпидемии COVID-19 в г. Москве	117
<i>Суховеева О.Э., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Карелин Д.В.</i> Решение обратной задачи для моделирования потоков углерода в почвах	119
<i>Суховольский В.Г., Савченко А.П., Ковалев А.В., Савченко П.А., Муравьев А.Н., Дубинцов С.А., Исаченко А.И.</i> Оценка состояния северных оленей по дистанционным данным	122

<i>Суховольский В.Г., Тарасова О.В., Ковалев А.В.</i> Пространственно-временная динамика популяций лесных насекомых	125
<i>Терентьева И.Е., Филиппов И.В., Сабреков А.Ф., Глаголев М.В.</i> Картографирования метановых сипов Западной Сибири при помощи сверточных нейронных сетей	127
<i>Титлянова А.А., Шибарева С.В.</i> Продуктивность травяных экосистем Тувы — время и пространство	130
<i>Топаж А.Г.</i> Экология, экономика и этика сообществ простейших социальных организмов	133
<i>Ухманьски Я., Невольски М., Янишевски Ю.</i> Межвидовая конкуренция многолетних оседлых организмов	136
<i>Фурсова П.В., Ризниченко Г.Ю., Погосян С.И.</i> Агентная модель динамики популяции фитопланктона в условиях стратификации среды обитания	137
<i>Хрущев С.С., Плюснина Т.Ю., Червищев Р.Н., Киселева Д.Г., Дрозденко Т.В., Антал Т.К., Ризниченко Г.Ю.</i> Применение методов машинного обучения для определения функционального состояния фитопланктона природных водоёмов	139
<i>Юрова А.Ю., Козлов Д.Н., Смирнова М.А.</i> Степень гидроморфизма и гидрологический режим почв. Сквозное моделирование	141

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА И ПРОДУКТИВНОСТИ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ. ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Абакумов А.И.¹, Пак С.Я.¹

¹*ФГБУН Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия*

abakumov@iacp.dvo.ru

packsa@iacp.dvo.ru

Аннотация: совмещение моделирования распределения фитопланктона в водоеме по глубине со спутниковыми данными о поверхностном слое воды приводит к возможности оценок состояния фитопланктона и первичной продукции водной экосистемы. Такой метод уточняется более детальным описанием фотосинтетических процессов продуцирования. Анализируются результаты его применения к морским районам в Японском и Охотском морях.

Дистанционные методы наблюдения поверхности крупных водоемов сенсорами искусственных спутников Земли дает обильный материал для изучения морских экосистем (Platt, Sathyendranath, 1993). Вместе с тем, точность таких измерений оставляет желать лучшего. Существенное ограничение дистанционных методов состоит в том, что обработке доступен только верхний слой воды. При этом биомасса, сосредоточенная в толще воды, может существенно менять картину распределения по пространству. Возникает задача реконструкции состояния фитопланктона ниже приповерхностного слоя. Для этого применяется аппарат математического моделирования (Ryabov, Rudolf, Blasius, 2010). Разработанные математические модели призваны восстановить состояние фитопланктона во всем фотическом слое с учетом погрешностей дистанционных измерений поверхностного слоя моря. При этом учитывается влияние среды (концентрации биогенов, освещенность, температура). Существенным является переход от измеренных спутником концентраций фотосинтезирующих соединений к оценкам плотности биомассы фитопланктона. В моделях применяется аппарат дифференциальных уравнений различного типа. Для верификации моделей и уточнения расчетов используются данные контактных измерений. Разработаны модели световой и темновой стадий фотосинтеза для оценки первичной продуктивности экосистем.

Итак, наша схема исследований состоит из следующих шагов.

- Получение спутниковых данных о поверхностном слое моря (температура, освещенность, концентрация хлорофилла).
- Исследование функционирования фитопланктона в толще воды (в фотическом слое) с помощью математических моделей.
- Оценка содержания фитопланктона и первичной продукции морской экосистемы под единицей площади водной поверхности.

Объектами исследования стали Японское море и западнокамчатский шельф Охотского моря. Спутниковые данные предоставлены Центром коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды Дальневосточного отделения РАН.

Для оценок состояния фитопланктона и величины первичной продукции в Японском море использованы данные о концентрациях хлорофилла «а», фотосинтетически активной радиации и температуре в поверхностном слое Японского моря за пятилетний период, с 2008 по 2012 г. При указанных выше характеристиках и функциях рассчитано распределение суточной и годовой продукции фитопланктона по поверхности Японского моря в 2008–2012 гг. (Abakumov, Izrailsky, Pak, 2015). Полученные результаты зависят от возможностей

спутникового зондирования в связи с погодными условиями и точности дистанционных измерений (Yamada, Ishizaka, Nagata, 2005).

Подобные оценки сделаны для западнокамчатского шельфа Охотского моря по данным 2015 и 2016 годов (Мониторинг состояния..., 2016; Доклад об экологической ситуации..., 2017; Pak, Abakumov, 2020).

Уровень достоверности результатов расчетов связан с уровнем надежности исходных данных и уровнем адекватности модели. Качественно оценивая точность спутниковых данных, можно утверждать, что приведенные математические модели адекватны исходной информации об объекте и результаты имеют сравнимый с исходной спутниковой информацией уровень точности. В то же время сочетание математического моделирования с дистанционными методами получения информации предоставляет возможности исследования крупных природных объектов.

Литература

- Доклад об экологической ситуации в Камчатском крае в 2016 году. Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края. – Петропавловск-Камчатский. 2017. 374 с.
- Мониторинг состояния окружающей среды на Западно-Камчатском лицензионном участке в 2015-2016 гг.: информ. бюл. – Красноярск – Петропавловск-Камчатский, 2015. 376 с.
- Abakumov A., Izrailsky Yu., Park S. Functioning of the phytoplankton in seas and estimates of primary production for aquatic ecosystems // *Developments in Environmental Modelling*. 2015. V. 27. P.339-349. DOI:10.1016/B978-0-444-63536-5.00015-6.
- Pak S.Ya., Abakumov A.I. Phytoplankton in the Sea of Okhotsk along Western Kamchatka: warm vs cold years // *Ecological Modelling*. 2020. V. 433, 1 October. Article 109244. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109244>.
- Platt T., Sathyendranath S. Estimators of primary production for interpretation of re-motely sensed data on ocean color // *Journal of Geophysical Research*. 1993. V. 98, Is. C8. P. 14561–14576.
- Ryabov A.B., Rudolf L., Blasius B. Vertical distribution and composition of phytoplankton under the influence of an upper mixed layer // *Journal of Theoretical Biology*. 2010. V. 263. P. 120-133.
- Yamada K., Ishizaka J., Nagata H. Spatial and temporal variability of satellite estimated primary production in the Japan Sea from 1998 to 2002 // *J. Oceanogr*. 2005. V. 61. P.857–869.

ВИЗУАЛЬНАЯ АНАЛИТИКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Андриенко Г.Л.¹, Андриенко Н.В.²

¹*Институт математических проблем биологии РАН, Пущино, Россия*
gandrienko@gmail.com

²*Fraunhofer Institute IAIS, Sankt Augustin, Germany & City University London, London, UK*
natalia.andrienko.1@city.ac.uk

Аннотация: Визуальная аналитика предлагает методы, аналитические процессы, и программные средства для анализа разнообразных данных, включая пространственно-временные данные. Ключевая идея визуальной аналитики - объединение творческих и когнитивных способностей человека с вычислительными и графическими возможностями современных компьютеров. Мы предлагаем краткий обзор современного состояния и выделяем перспективные направления исследований.

1. Введение

Визуальная аналитика (visual analytics) — это научное направление по разработке методов анализа данных, поддерживающих аналитические способности человека путём предоставления визуальных представлений релевантной информации, используя компьютерные средства для хранения, поиска, обработки, анализа и визуализации информации (Andrienko et al., 2020). Понимание процессов, происходящих в природе, окружающем мире, обществе и экономике крайне важно для человечества. Эти пространственно-временные процессы описываются разнообразными пространственно-временными данными.

2. Современное состояние

Выделяются три основных формы пространственно-временных данных: события (events) с их пространственной и временной привязкой, временные ряды (time series; динамика значений атрибутов), и траектории (trajectories; последовательности позиций) движущихся объектов (Andrienko et al., 2013). Разработано множество методов по выбору и преобразованию данных, визуализации, агрегированию и кластеризации данных. Например, траектории могут быть агрегированы в форме динамичных потоков между местами, представляющими интерес. Существенные изменения в динамике потоков могут быть представлены в форме событий. События, в свою очередь, могут быть интегрированы во временные ряды.

Особый интерес представляют методы проверки качества данных и выявления проблем в данных, которые могут привести к недостоверным результатам (Andrienko et al., 2016). Появились открытые средства для подобных проверок, например, в форме Python Notebooks (Graser, 2021).

Одно из наиболее интересных недавно предложенных средств анализа — это инструмент временных запросов на основе маски времени. Идея метода заключается в выборе временных интервалов, удовлетворяющих определённым характеристикам. Этот метод был успешно применён в разнообразных задачах, включая анализ фотодокументирования цветения растений (Рисунок 1), выявление проблемных секторов в авиации, и исследование командной тактики в футболе (Andrienko et al., 2021).

Выделяются следующие тренды в современных направлениях исследований:

- концептуализация пространственно-временных данных и систематические подходы к анализу, основанные на рассмотрении структуры данных и задач;
- детальное рассмотрение свойств данных и семантическая интерпретация данных;

- преодоление разрывов между проверкой качества данных, поиском интересных закономерностей в данных, всеобъемлющим анализом данных, и построением математических моделей на основе данных.

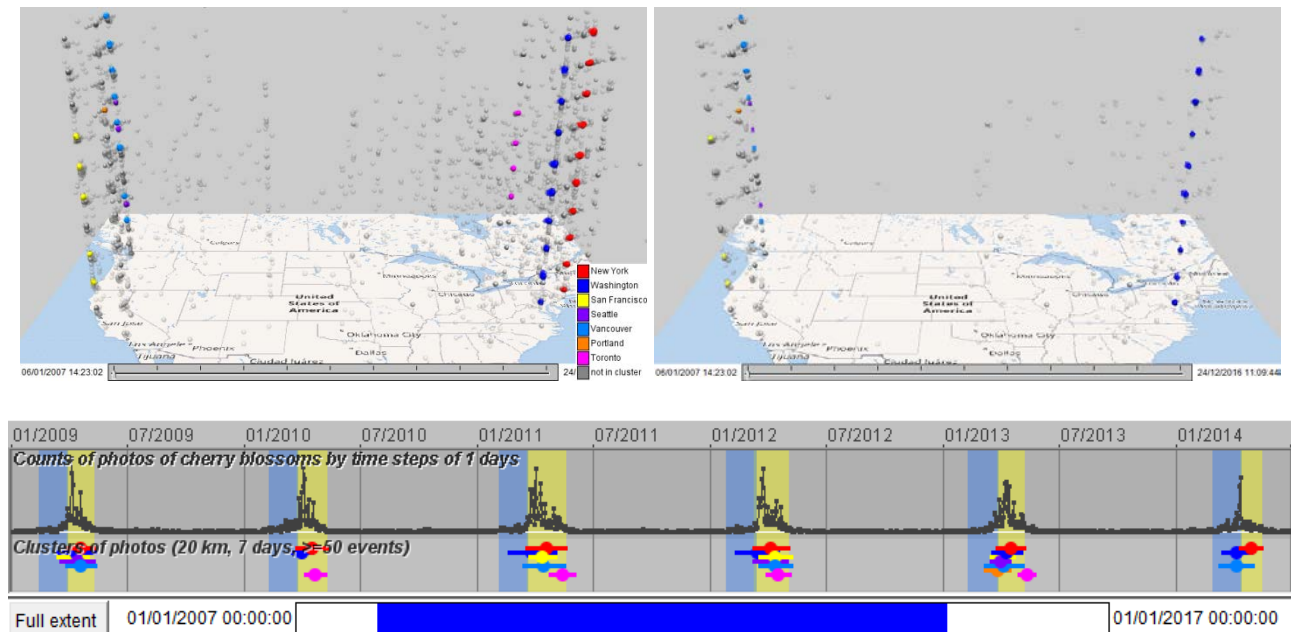


Рисунок 1 – Идея метода временной маски. Вверху слева: все события по избранной теме. Внизу: временная маска выбирает временные интервалы длиной 45 дней, предшествующие крупным кластерам событий в избранном месте. Вверху справа: показаны только события, соответствующие выбранным интервалам времени.

3. Перспективные направления исследований

Перспективные направления исследований во многом связаны с появлением и использованием больших данных (big data). Большие данные требуют разработки интеллектуальных человеко-машинных подходов к анализу. Необходима глубокая интеграция средств визуальной аналитики с методами машинного обучения (machine learning, ML) и искусственного интеллекта (artificial intelligence, AI).

Выделяются следующие тренды:

- использование разнообразных методов машинного обучения в визуально-аналитических процедурах;
- визуально-аналитические подходы к построению моделей;
- интерактивные визуальные интерфейсы к объяснению поведения систем искусственного интеллекта (eXplainable AI, XAI).

Литература

- Andrienko G., Andrienko N., Bak P., Keim D., Wrobel S. Visual Analytics of Movement. Springer, 2013.
- Andrienko G., Andrienko N., Fuchs G. Understanding movement data quality // J Location Based Services. 2016, v.10(1), pp.31-46.
- Andrienko G., Andrienko N., Fuchs G., Turkay C., Wrobel S. Visual Analytics for Data Scientists. Springer, 2020.
- Andrienko G., Andrienko N., Anzer G., Bauer P., Budziak G., Fuchs G., Hecker D., Weber H., Wrobel S. Constructing Spaces and Times for Tactical Analysis in Football // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2021, vol. 27(4), pp.2280-2297
- Graser A. An exploratory data analysis protocol for identifying problems in continuous movement data // quality // J Location Based Services. 2021, v.15(2), pp.89-117.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СОЧЕТАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИМИ И ГЕОПОЛИТИЧЕСКИМИ РИСКАМИ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Башкин В.Н.¹, Трубицина О.П.²

¹*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино, Россия*

vladimirbashkin@yandex.ru

²*Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Россия*

o.trubitsina@narfu.ru

Аннотация: представлена разработка концепции и соответствующей ЭС для сочетанного управления геоэкологическими и геополитическими рисками при разработке нефтегазовых ресурсов в Арктическом регионе.

Концепция возникновения экологических, геоэкологических и геополитических рисков (ЭР, ГЭР, ГПР соответственно) в Арктике моделируется на основе определений российских нормативно-правовых актов, а также понятий фундаментальной науки. Так, ЭР - вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера. Из данного определения вытекает тесная связь ЭР с техногенными рисками (ТР), что следует понимать как увеличение вероятности возможного ущерба по мере увеличения вероятности природных и техногенных катастроф. Для учета ответных воздействий изменений окружающей среды Арктики на объекты нефтегазовой промышленности используется понятие ГЭР, под которым понимают риски, возникающие в системе "нефтегазовая промышленность - окружающая среда Арктики", связанные с взаимообусловленным воздействием объектов промышленности на окружающую среду и окружающей среды на объекты промышленности. К тому же для объектов нефтегазовой отрасли, осуществляющих хозяйственную деятельность в Арктике, крайне актуальны ГПР как результат взаимодействия компонентов системы «геополитическая сфера деятельности государств - окружающая среда Арктики». При этом геополитика государств основывается на политологической концепции, согласно которой политика государств, главным образом внешняя, предопределяется природно-ресурсным потенциалом Арктики, как главным привлекательным компонентом окружающей среды региона.

Актуальность геоэкологических вызовов для предприятий нефтегазовой отрасли предопределяет акцент на проблемы охраны труда, техники безопасности и охраны окружающей среды. Основные причины возросшего внимания: 1) руководители нефтегазовых компаний усиливают стабильность и устойчивость модели деятельности; 2) усложняются задачи операционного характера, стоящие перед участниками отрасли; 3) возрастает влияние общественности. Для Арктического региона, характеризующегося повышенной экологической чувствительностью, данные причины могут повлиять на способность предприятий нефтегазовой отрасли вести здесь работы по разведке и добыче углеводородных ресурсов. В настоящее время на государственном, общественно-политическом, акционерном уровне растет обеспокоенность в связи с возможными экологическими последствиями освоения нефтегазоносных месторождений Арктики. Спецификой управления ГЭР при освоении арктических месторождений являются проблемы безопасности их эксплуатации в качестве природно-техногенных объектов.

Глобальный уровень ГПР связан с общемировыми процессами и тенденциями объявления зоны Арктики с ее природно-ресурсным потенциалом международной. Индикатором возможного проявления ГПР считается нарушение состояния стратегической

стабильности в геостратегическом пространстве Арктики. В данном контексте ГПР представляет собой вероятность изменения геополитической ситуации на региональном и глобальном уровнях, выражающегося в неблагоприятных условиях (риск гибридной войны, военные столкновения и т.д.) или дополнительных возможностях.

Мировой опыт показывает, что такими рисками можно управлять. Однако для этой цели необходимо располагать соответствующей концепцией, а также методологией анализа соответствующих рисков. Авторами предложена двухэтапная модель анализа ГЭР с учетом ГПР для выработки эффективного управленческого решения с целью оптимальной эксплуатации объекта нефтегазовой отрасли и минимизации воздействия на окружающую среду в геополитических условиях Арктики. Методы этапа оценки ГЭР представлены ранее (Башкин, Припутина, 2010; Башкин, 2014; Bashkin, 2016; 2017), а для этапа управления ГЭР при определении приемлемости риска требуется разработка методологии экспертных оценок факторов внешней среды.

Взаимодействие составляющих системы «нефтегазовая промышленность – окружающая среда Арктики» предопределяет возникновение ГЭР как неизбежного фактора функционирования и дальнейшего развития нефтегазовой отрасли России. При углеводородном освоении Арктики анализ ГЭР необходимо проводить с учетом ГПР. По сути, ГЭР включает в себя две группы:

1) технические риски (ТР), обусловленные техническими факторами и связанные с отказами оборудования, разрушением конструкций и сооружений объектов нефтегазовой отрасли. ТР выражают вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений в условиях экстремально высоких параметров природной среды Арктики, приводящие к разрушениям сооружений, выходу из строя оборудования и гибели людей;

2) экологические риски (ЭР), обусловленные поступлением в окружающую среду загрязняющих веществ и негативным влиянием сооружений и транспортных средств на природные компоненты – активизацией экзогенных процессов, изменением биогеохимических циклов и прочим, следствием чего является ухудшение здоровья населения и необратимые изменения в арктических экосистемах.

ГПР возникают в условиях противоречивого и нестабильного законодательства и изменчивости поведения органов власти Арктических государств, что ведет к нарушению состояния стратегической стабильности в геостратегическом пространстве Арктики.

Часть рисков, относящихся к различным группам, связана между собой, причем связь эта не взаимно равнозначна. Так, при возникновении аварии (ТР) возникает экологический риск, а его трансформация в ГЭР зачастую сопровождается негативным влиянием на нефтегазовые объекты. С другой стороны, некоторые виды рисков могут объединяться, влияя друг на друга.

Управление рисками должно опираться на максимально полное сочетание всех факторов в единую систему анализа ГЭР. Угрозы и возможности относятся к факторам внешней среды объектов нефтегазовой отрасли, и трансформация в них ГЭР и ГПР зависит от их сочетанного анализа. Эта процедура рекомендуется к применению в рамках реализации модели анализа ГЭР и ГПР на основе разрабатываемой экспертно-моделирующей системы.

Литература

- Башкин В.Н., Припутина И.В. Управление экологическими рисками при эмиссии поллютантов. – М.: Газпром-ВНИИГАЗ, 2010.- 189 с.
- Башкин В.Н. Биогеохимия полярных экосистем в зонах влияния газовой промышленности. – М.: Газпром-ВНИИГАЗ, 2012.- 300 с.
- Bashkin V. (ed.) Biogeochemical technologies for managing pollution in polar ecosystems. Environmental Pollution, Vol. 26, Springer: Switzerland, 2016, 219 pp.

Bashkin V. (Ed). Ecological and biogeochemical cycling in impacted polar ecosystems. NOVA Publishers, 2017, 308 pp.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ ДИНАМИКИ ЛЕСОВ С ПОМОЩЬЮ НЕЧЕТКОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ФЕРХЮЛЬСТА

Бутусов О.Б.

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, Москва
obutusov@yandex.ru

Аннотация: Разработаны два варианта нечеткой модели Ферхюльста: модель с правой нечеткой производной (ПНП) и модель с левой нечеткой производной (ЛНП). Установлено, что модель ПНП не имеет асимптот и ширина интервала неопределенности катастрофически возрастает. Модель ЛНП имеет асимптоты и ширина интервала неопределенности быстро приближается к стационарному пределу, после которого сохраняет постоянную величину.

В работе (Бутусов, Редикульцева, 2019) предложена математическая модель для описания динамики биомассы лесов под воздействием химических загрязнений промышленных предприятий с использованием виртуальных потоков биомассы. Учитывая, что виртуальные потоки имеют нечеткий характер, в настоящей работе предложены результаты, полученные с помощью нечеткой дифференциальной модели Ферхюльста. Предложенная концептуальная феноменологическая модель позволяет описывать изменение экологического состояния окружающей среды (ОС) с использованием виртуальных потоков биомассы: улучшение экологического состояния ОС может быть описано с помощью виртуальных положительных потоков биомассы, а ухудшение экологического состояния ОС с помощью виртуальных отрицательных потоков биомассы. Используемая феноменологическая модель имеет следующий вид:

$$\frac{dB}{dt} = GBM \left(1 - \frac{B}{M} \right) - E, \quad (1)$$

где B – плотность лесной биомассы ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$), t – время (месяц⁻¹), G – коэффициент прироста биомассы ($\text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{месяц}^{-1}$), оцененный, например, по спутниковым данным, M – плотность биомассы при нулевом потоке ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$), E – отрицательный поток биомассы ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{месяц}^{-1}$).

Модель (формула 1) является трех параметрической моделью и относится к классу моделей Ферхюльста (Воусе, 2001, р. 76). В безразмерной форме модель имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{db}{d\tau} = b(1-b) - e, \\ b(0) = b_0 \end{cases}, \quad (2)$$

где $b = B / M$ – безразмерная плотность биомассы, M – предельная плотность биомассы при нулевом потоке ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2}$), T – время релаксации динамической системы за вегетационный период (ВП), $g = GM$ – удельный коэффициент прироста биомассы (ВП⁻¹), $\tau = gt$ – безразмерное время, $T_g = gT$ – безразмерное время релаксации динамической системы, $\tau_n = \tau / T_g = t / T$ – безразмерное нормализованное время, $e = E / Mg$ – безразмерный отрицательный поток биомассы, b_0 – начальная безразмерная плотность биомассы.

Нечеткий дифференциальный вариант модели в приближении Рунге-Кутты второго порядка имеет следующий вид (Hullermeier, 1999):

$$d_{i+1} = d_i + \frac{dt}{2} (f(u_i, d_i, ed) + f(U_i, D_i, ed)), \quad (3)$$

$$u_{i+1} = u_i + \frac{dt}{2} (f(d_i, u_i, eu) + f(D_i, U_i, eu)), \quad (4)$$

где $eu = \bar{e}$, $ed = \underline{e}$, $D_i = d_i + dt \cdot f(u_i, d_i, ed)$, $U_i = u_i + dt \cdot f(d_i, u_i, eu)$

(черточка сверху обозначает верхнюю границу интервального числа; черточка снизу – нижнюю границу). Полученные результаты представлены на рисунке 1.

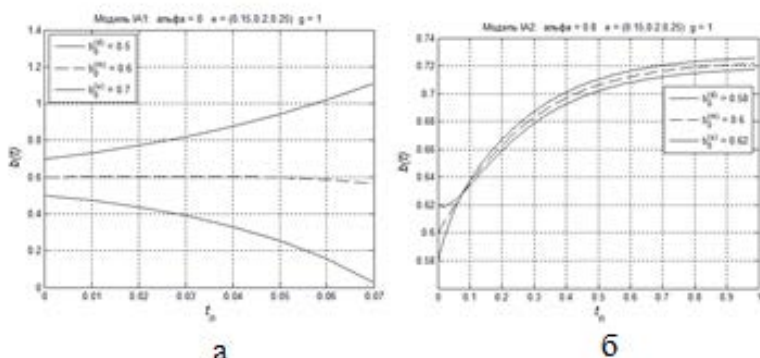


Рисунок 1. Динамика границ интервалов нечеткости (неопределенности): а – модель «ПНП»; б – модель «ЛНП»

В численных экспериментах использованы два варианта нечеткой модели: модель с правой нечеткой производной (ПНП) и модель с левой нечеткой производной (ЛНП). Установлено, что в модели ПНП ширина интервалов неопределенности катастрофически возрастает. В модели ЛНП ширина интервала неопределенности постоянна.

Выводы

1. Для моделирования процессов деградации лесных экосистем под воздействием газовых выбросов промышленных предприятий предложено использовать понятие виртуальных потоков биомассы и модернизированное уравнение Ферхюльста учитывающее потоки биомассы.
2. Установлено, что безразмерный отрицательный поток биомассы: $e = 0.289$ является критическим и соответствует условиям катастрофической деградации древостоя, при которой начинаются процессы разрушения лесной экосистемы.

Литература

- Бутусов О.Б., Редикульцева Н.И. Моделирование техногенного воздействия на леса с помощью виртуальных отрицательных потоков биомассы // Математическое моделирование в экологии / Материалы Шестой Национальной научной конференции с международным участием, 26-29 сентября 2019 г. – Пущино, ФИЦ ПНЦБИ РАН, 2019, с. 25–29.
- Boyce W.E. Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems. / William E. Boyce, Richard C. DiPrima. – New York: John Wiley, 2001. 1310 p.
- Hullermeier Eyke. Numerical methods for fuzzy initial value problem // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. – 1999. – Vol.7. – N 5. – P.439–461.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ РАЗБИЕНИЙ КАРАПАКСА

Войтеховский Ю.Л.¹, Степенщиков В.Г.²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
voytekhovskiy_yul@pers.spmi.ru

² Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия
voytekhovskiy_yul@pers.spmi.ru

Аннотация: В результате моделирования карапакса пресноводной красноухой черепахи как полигонального разбиения квазиплоской поверхности при естественных ограничивающих условиях найдены 426 разбиений, охарактеризованных точечными группами симметрии: $6mm - 1$, $4mm - 1$, $3m - 2$, $mm2 - 10$, $m - 100$, $2 - 4$, $1 - 308$. Моделируемый карапакс обладает избыточной симметрией. Это ставит вопрос о ее природе.

1. Введение

Естественные науки стоят на том, что форма объекта создается в онтогенезе как компромисс между внутренней интенцией (в кристаллах – требование решетки, в организмах – генома, сложившегося в филогенезе) и ограничениями среды. Наиболее важен характер движения в поле силы тяжести. Согласно принципу Кюри, кристаллы, растения и прирастающие организмы, ориентированные вдоль вектора силы тяжести, приобретают радиальную симметрию, прирастающие к вертикальным стенкам – планальную. Растения и организмы, свободно вращающиеся в воде, тем более сферичны, чем менее специализированы их органы. Организмы, перемещающиеся вдоль земной поверхности (под, по, над ней), приобретают планальную симметрию.



Рисунок 1 – Предмет моделирования – центральная часть карапакса красноухой черепахи.

2. Моделирование и результаты

Авторы обратили внимание на карапаксы (панцири) черепах – примеры естественных полигональных разбиений квазиплоских поверхностей. Разное число пластин обеспечивает разную выпуклость карапакса у разных видов: *Plesiochelye*, *Mauremys*, *Testudo*, *Melanochelys* имеют до 50 пластин в карапаксе и 9 в пластроне (по периметру), у *Eusarkia* 39 и 11, у *Trionyx* 25 и 9, у *Kinosternon* 44 и 8, у *Archelon* 52 и 7, соответственно, и т. д. Но в норме все они имеют продольную плоскость симметрии. Компьютерным моделированием найдено полное число разбиений условного карапакса на 13 (как у сухопутной красноухой черепахи,

рисунок 1) 4-, 5- и 6-угольных пластин при условии, что пластрон содержит их не менее 6, а пластины стыкуются по три в точке. Всего комбинаторно различных разбиений оказалось 426 (Войтеховский, Степенщиков, 2018). Их распределение по точечным группам симметрии (т. г. с.): $6mm - 1$, $4mm - 1$, $3m - 2$, $mm2 - 10$ (Рис. 1), $m - 100$, $2 - 4$, $1 - 308$; хотя бы с одной плоскостью симметрии – 114, ровно с одной – 100. Карапакс красноухой черепахи попадает в группу $mm2$ с дополнительной плоскостью симметрии, ортогональной направлению движения (рисунок 2, 5-я в нижнем ряду).

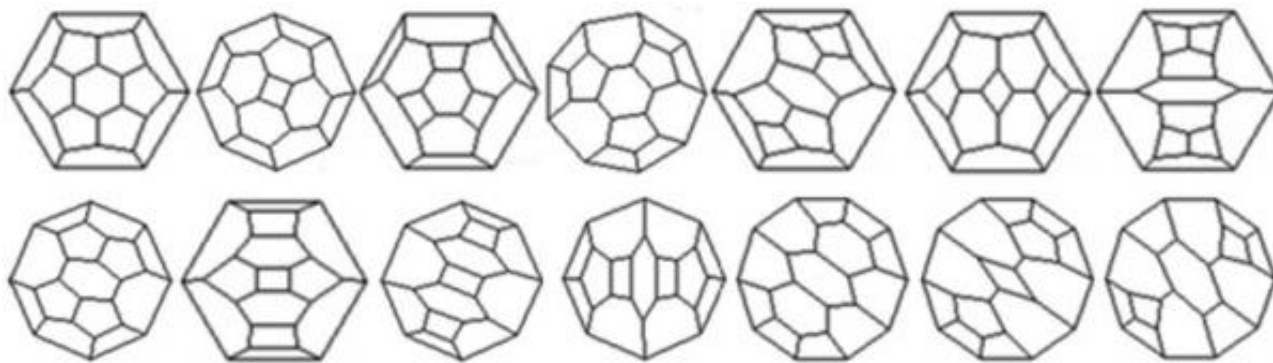


Рисунок 2 – Разбиения с т. г. с. $6mm - 1$, $4mm - 1$, $3m - 2$, $mm2 - 10$ (в указанном порядке).

3. Выводы

Таким образом, результаты компьютерного моделирования карапакса (для естественных ограничивающих условий, специальных для разных видов черепах) позволяют увидеть разнообразие возможностей, из которых организм (в нашем случае сухопутная красноухая черепаха) совершал выбор формы. Частые отклонения от нормы указывают на то, что этот выбор не абсолютно детерминирован (Черепанов, 1994, 2004, 2016; Киладзе, 2017). Все известные отклонения попадают в число модельных разбиений и тоже поддаются анализу. Симметрия $mm2$ центральной части карапакса красноухой черепахи кажется избыточной из-за наличия плоскости симметрии, ортогональной направлению движения. (Как если бы ее предки могли менять направление движения, не разворачивая тяжелый карапакс, но поворачиваясь под ним...) Впрочем, щитки пластрона по периметру карапакса понижают его симметрию до планальной m в полном соответствии с принципом диссимметрии Кюри.

Литература

- Войтеховский Ю.Л., Степенщиков Д.Г. Черепаший карапакс как пример полигонального разбиения // Математические исследования в естественных науках. Апатиты: К & М, 2018. С. 141-149.
- Киладзе А.Б. Морфологическая геометрия карапакса различных экологических форм черепах. М.: РУСАЙНС, 2017. 194 с.
- Черепанов Г.О. Аномалии костного панциря черепах // Зоол. ж-л. 1994. № 6. С. 68-78.
- Черепанов Г.О. Панцирь черепах: происхождение и развитие в онто- и филогенезе. Автореф. дис. д. б. н. СПбГУ, 2004. 34 с.
- Черепанов Г.О. Изменчивость щитков панциря черепах: закономерности морфогенеза и природа аномалий // Вестник СПбГУ. Сер. Биология. 2016. № 3. С. 170-174.

ФРАКТАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТИЛАКОИДОВ ЦИАНОБАКТЕРИЙ

Галицкий В.В.¹

¹ *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, Пущинский научный центр биологических исследований РАН, Пущино, Россия*
galvv@rambler.ru

Аннотация: Появление тилакоида - важного морфологического элемента многократно увеличило фотосинтетическую мощность цианобактерий, игравших основную роль в переходе от темного фотосинтеза к светлостроению и образовании кислородной атмосферы и растительного покрова Земли. Ранее было показано, что фрактальные свойства точечных множеств могут определять характер морфологической эволюции биологических организмов. Для эволюции цианобактерий таким свойством явилось уменьшение фрактального показателя множеств при групповом размещении растущего числа точек множества и постоянном числе их в группе. Невозможность экстенсивного роста побудило цианобактерии к эволюционным изменениям своей внутренней морфологии – созданию тилакоидов с дополнительными площадями для размещения новых фотосинтезирующих “точек”.

Особенности зависимости фрактального параметра $\mu(N_g, n_g)$ множества точек от числа групп (N_g) и точек в группе (n_g) (Рис. 1) могли стимулировать образование тилакоидов, несущих фотосистемы PSI и PSII, в процессе эволюции цианобактерий (Галицкий, 2021). Если количества групп N_g увеличивалось при фиксированном количестве точек n_g (2–3, димеры, тримеры) на группу, то виртуальный общий размер $H \sim (N_g n_g)^{1/\mu}$ фотосинтетического аппарата цианобактерий мог стать во много раз больше, чем ограниченный размер самой бактерии. Обсуждаются опубликованные экспериментальные данные, подтверждающие справедливость этого вывода.

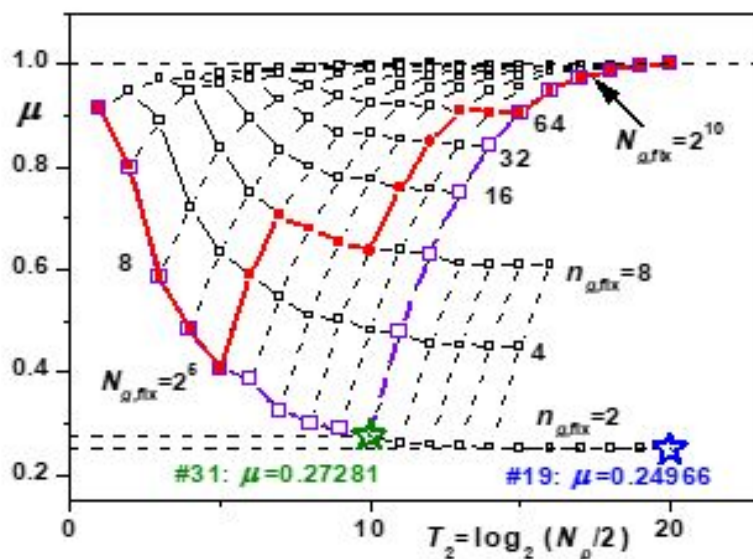
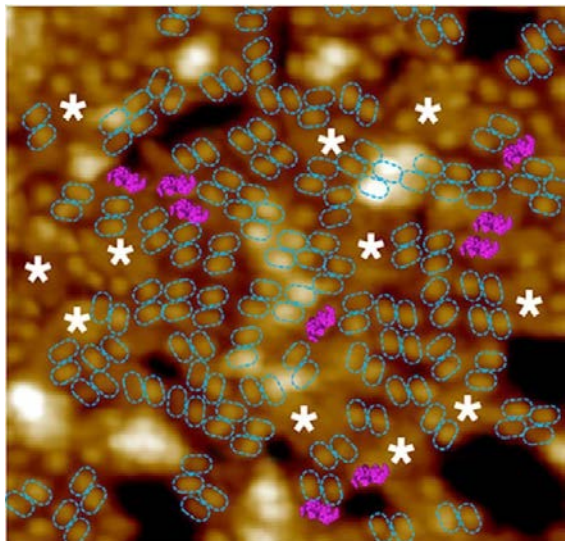


Рисунок 1. Двумерные изображения трехмерных зависимостей $\mu(N_g, n_g)$ для групповых размещений математических точек (по: Галицкий, 2018). Два типа траекторий: спадающие траектории μ для фиксированных значений $n_{g,fix}$ (тонкие сплошные линии, маленькие пустые кружки) и растущие траектории для фиксированных величин $N_{g,fix}$ (тонкие пунктирные линии), – которые соответственно проходят через те же точки с ординатами $\mu(N_g, n_g)$ и целыми абсциссами $\log_2(N_g \times n_g/2)$. Два примера эволюции фрактального параметра для размещений фотосинтезирующих точек в ходе эволюции от цианобактерий до протопорастения, состоящие из элементов двух типов траекторий (толстая сплошная линия и тонкая штриховая линия с большими пустыми квадратами). Обе начинаются в различных местах траектории $n_{g,fix} = 2$ и идут различными путями к $\mu = 1$. Значения μ при ☆ ($\mu_{\#19} =$

0.24966 и $\mu_{\#31} = 0.27281$, см. ☆ на рис. 1 для #19 как пример получения этих значений) соответствуют двум группам натуральных данных о продолжительностях жизни ветвей всех порядков ели (Цельникер, 1994) и их модельной интерпретации (Галицкий, 2012). $T_2 = \log_2(N_p/2)$, где $N_p = N_g \times n_{g,fix}$ или $N_{g,fix} \times n_g$ есть эволюционное эрзац-“время”, измеряемое числом удвоений N_p вдоль траектории. T_2 не является временем эволюции.

а



б

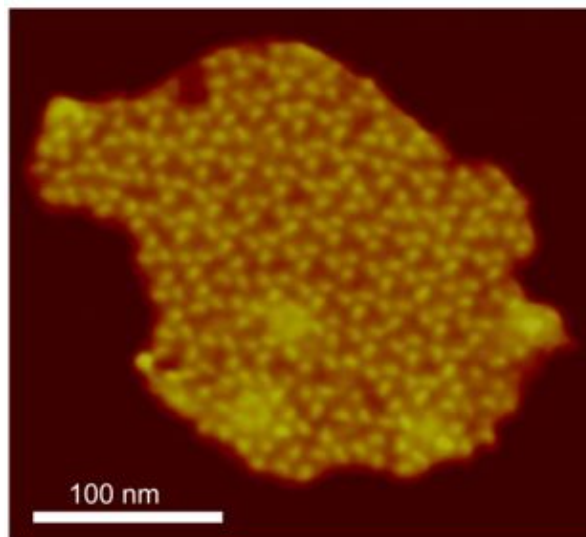


Рисунок 2. **а** – AFM топография высокого разрешения просветной поверхности тилакоидных мембран цианобактерии *Synechococcus elongatus* PCC 7942 в жидком растворе (по: Casella et al., 2017, Fig. 1F). Отдельные димеры представляют собой комплексы PSII (штрих-овалы) на основании выступов комплексов на просветной поверхности мембраны. Белые звездочки указывают на возможное расположение тримеров PSI – выступы на стромальной стороне мембраны. **б** – AFM топография домена тилакоидной мембраны, содержащая массивы тримерных комплексов тилакоидной мембраны из *Thermosynechococcus elongates* (по: MacGregor-Chatwin et al., 2017, Fig. 1A). Это изображение нативной мембранной организации показывает упорядоченные массивы макромолекул, состоящие исключительно из PSI, идентифицированные по их характерной тримерной форме. Другие четыре участка мембраны показали, что PSI перемежается с белковыми комплексами, идентифицированными как PSII.

Литература

- Галицкий В.В. Динамика биомассы ветвей высших порядков дерева. модельный анализ // Журн. общ. Биол. 2012. Т. 73. № 6. С. 442–452.
- Галицкий В.В. Фрактальный характер формирования системы тилакоидов цианобактерий // Журн. общ. Биол. 2021. Т.82. № 6. С. 382–388. URL: https://elementy.ru/genbio/synopsis/675/Fraktalnyy_kharakter_formirovaniya_sistemy_tilakoidov_tsianobakteriy (дата обращения 15.10.2021)
- Цельникер Ю.Л. Структура кроны ели // Лесоведение. 1994. № 4. С. 35–44.
- Casella S., Huang F., Mason D., Zhao G., Johnson G.N. et al. Dissecting the native architecture and dynamics of cyanobacterial photosynthetic machinery // Mol. Plant. 2017. V. 10. P. 1434–1448.
- Galitskii V.V. Fractal Features of Proto-Plant’s Origin and their Possible Consequences // BioRxiv. 2018. URL: <https://doi.org/10.1101/083543> (дата обращения 15.10.2021)
- Li T., Angeles O., Marcaida M. III, Manalo E., Manalili M. P., Radanielson A., Mohanty S. From ORYZA2000 to ORYZA (v3): An improved simulation model for rice in drought and nitrogen-deficient environments. // Agricultural and Forest Meteorology. 2017. V. 237–238. P. 246–256.

- MacGregor-Chatwin C., Sener M., Barnett S.F.H., Hitchcock A., Barnhart-Dailey M.C. et al. Lateral segregation of photosystem I in cyanobacterial thylakoids // *Plant Cell*. 2017. V. 29. P. 1119–1136.
- Matthew R.B., Bachelet D., van Laar H.H. (eds.) *Modeling the impact of climate change on rice production in Asia*. Wallingford, United Kingdom: CAB International, 1995.
- PROSPECT+SAIL: 15 Years of Use for Land Surface Characterization.
URL:http://webdocs.dow.wur.nl/internet/grs/Workshops/Environmental_Applications_Imaging_Spectroscopy/12_Jacquemoud_Prospect/IEEE_Jacquemoud_PROSPECT.pdf (дата обращения 15.10.2021)
- Setiyono T. D., Quicho E.D., Holecz F.H., et al. Rice yield estimation using synthetic aperture radar (SAR) and the ORYZA crop growth model: development and application of the system in South and South-east Asian countries // *International Journal of Remote Sensing*. 2018. № 40 (21). P. 8093–8124.
URL:<https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1547457> (дата обращения 15.10.2021)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ WOFOST И ПОГОДНОЙ ИСТОРИИ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ПОЛИВА

Гасанов М.Э.¹, Петровская А.Ю.¹, Меркулов Д.М.¹, Трегубова П.Н.¹, Пукальчик М.А.¹,
Оселедец И.В.^{1,2}

¹*Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия*

m.gasanov@skoltech.ru

anna.petrovskaya@skoltech.ru

daniil.merkulov@skoltech.ru

p.tregubova@skoltech.ru

m.pukalchik@skoltech.ru

²*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука, Москва, Россия*

i.oseledets@skoltech.ru

Аннотация: оптимизация агротехнологий необходима для сохранения пресной воды. Поиск оптимальных стратегий полива необходим для эффективного использования воды в сельском хозяйстве, однако многие решения максимизируют урожайность культур не учитывая воздействие на окружающую среду. Наш метод оптимизации на основе алгоритма NSGA-II позволил увеличить урожайности и эффективнее использовать воду.

Оптимизация агротехнологий в сельском хозяйстве необходима для сохранения запасов пресной воды и снижения нагрузки на водные объекты окружающей среды. Поиск оптимальных стратегий полива и использования водных ресурсов важен для повышения эффективности использования воды в сельском хозяйстве, однако многие решения в оптимизации агротехнологий максимизируют урожайность культур или общую выручку предприятия, но не учитывают воздействие на окружающую среду. Существует несколько факторов, влияющих на эффективность использования водных ресурсов (Mbava et al., 2020; Pretty, 2008). Часть воды участвует в росте, развитии и транспирации растений, другая часть воды недоступна для корней растений из-за испарения, миграции с поверхностным стоком и просачивания в нижние почвенные горизонты. Таким образом, мы можем определить потери воды (часть оросительной воды, которая не может быть преобразована в экономическую выгоду) и эффективно используемую воду (вода, которая преобразуется в урожай). Для ирригационного сельского хозяйства эффективность использования воды может варьироваться от 13 до 18% от поставляемой воды (Wallace & Gregory, 2002). Стоит отметить, что высокий уровень миграции воды из корневой зоны может привести к просачиванию минеральных удобрений в грунтовые воды, что вызывает эвтрофикацию и дополнительную нагрузку на водные системы. Проведение полевых экспериментов для поиска наилучших агротехнологий может быть времязатратным, так как требует оценки всех возможных комбинаций. Имитационные модели урожайности широко используются для планирования сельскохозяйственных практик, таких как посадка и сбор урожая, внесение удобрений и полив. Мы предлагаем метод оптимизации агротехнологий основанный на использовании имитационной модели урожайности WOFOST, а также использовании истории погоды за несколько десятков лет. Мы используем систему NASA POWER для получения погодных данных и вычисляем среднюю урожайность и среднюю потерю воды за последние 20 лет для оценки различных сценариев погоды. Применение многокритериальной оптимизации, основанной на генетическом алгоритме NSGA-II, позволяет находить даты и объем воды для орошения, максимизировать урожай и снизить общее потребление воды. В ходе исследования мы сравнили эффективность NSGA-II с поиском по методу Монте-Карло для задачи оптимизации полива, а также со стратегией полива реального фермера. Мы показали снижение потребления воды одновременно с увеличением урожайности сахарной свеклы с использованием алгоритма NSGA-II. Наш подход позволил достичь большой урожайности картофеля, чем у фермера с аналогичным

уровнем потребления воды. Наш метод на основе алгоритма NSGA-II позволил достичь увеличение урожайности картофеля, но эффективность использования воды осталась на уровне фермера.

Многокритериальная оптимизация на основе имитационной модели WOFOST и генетического алгоритма NSGA-II продемонстрировала свою эффективность в поиске оптимальной стратегии орошения. Мы показали эффективность использования подхода на примере конкретного исследования с культурами сахарной свеклы и картофеля. Результаты экспериментов с картофелем показывают, что алгоритм NSGA-II последовательно достигает более высоких значений. В экспериментах с сахарной свеклой метод Монте-Карло и NSGA-II дали примерно одинаковый уровень урожайности. Однако алгоритм NSGA-II выбрал стратегии со значительно меньшими потерями воды. Основываясь на наших численных экспериментах, мы видим преимущество использования многокритериальной оптимизации над поиском по методу Монте-Карло. Использование алгоритма снижает сезонные потери воды и повышает урожайность сельскохозяйственных культур на основе погодной истории.

Литература

- Mbava, N., Mutema, M., Zengeni, R., Shimelis, H., & Chaplot, V. (2020). Factors affecting crop water use efficiency: A worldwide meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 228, 105878.
- Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 447–465.
- Wallace, J. S., & Gregory, P. J. (2002). Water resources and their use in food production systems. *Aquatic Sciences*, 64(4), 363–375.

ДИНАМИКА ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА СУХОРЕЧЬЯ РЕКИ КУМА НА ФОНЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Гасанова З.У.

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

Аннотация: Установлена степень динамики мобильных ареалов (mob) засоленного почвенного покрова в зависимости от контрастности почвенных профилей по гранулометрическому составу (gk). Построение моделей динамики ПП позволило оконтурить мобильные ареалы почв в годичном и многолетнем временном отрезках. На положительных формах рельефа отмечается низкая и средняя динамика ПП, на равнине - средняя и высокая.

Сравнительно недавно почвы и почвенный покров еще воспринимались как статическое тело. Концепция функционирующего почвенного покрова Г.В. Добровольского вывела учение о почвах на принципиально новый уровень. В настоящее время почва рассматривается как биокосное тело, находящееся в динамическом равновесии с факторами почвообразования и обладающее присущими только почве функциями.

Основным условием стабильного функционирования почвенного покрова является сбалансированное взаимодействие почвообразующих факторов. Для Северо-Западного Прикаспия в последние десятилетия таким фактором является климатический: до 2012 г. происходила некоторая гумидизация климата: наблюдались положительные тренды осадков, среднегодовых температур, гидротермического коэффициента (ГТК). В настоящее время ГТК понижается. Для ландшафтов, обладающих хрупкими экосистемами, даже небольшие отклонения гидротермических условий способствуют изменению его параметров, таких как засоление. В засоленном почвенном покрове динамика находит свое выражение в миграции легкорастворимых солей в виде латеральных потоков почвенных растворов. Игнорирование пространственной динамики засоления ПП может привести к нежелательным последствиям вплоть до образования вторичных солончаков по периферии мелиорируемых участков. Изучение динамики засоления почвенного покрова проводилось на тестовом полигоне в пределах сухоречья реки Кума. В состав ПП входят почвы, занимающие значительную часть Северо-Западного Прикаспия: светло-каштановые, солончаки, солонцы-солончаки (Рисунок). Почвы содержат легкорастворимые соли, степень засоления варьирует от слабой до очень сильной, слабогумусированы, имеют слабощелочную реакцию.

Для построения моделей динамики ПП были преобразованы картограммы засоления почвенного покрова (Гасанова, 2017) с помощью скользящей палетки с последующим вычитанием сглаженных поверхностей. Последовательное вычитание разновременных сглаженных картограмм засоления дало убедительную картину миграции солей в почвенном покрове и выявило разную степень динамики ПП. Динамика ПП определялась для 0.5 м толщ почв. Средневзвешенное значение сухих остатков рассчитывалось по Е.А.Дмитриеву (1972).

Смягчение климата и повышение осадков в течение 21 года способствовало оптимизации светло-каштановых почв, расположенных на доминирующих элементах рельефа. На аллювиально-морской равнине наблюдается прирост высоко динамичных ареалов за счет повышения уровня грунтовых вод.

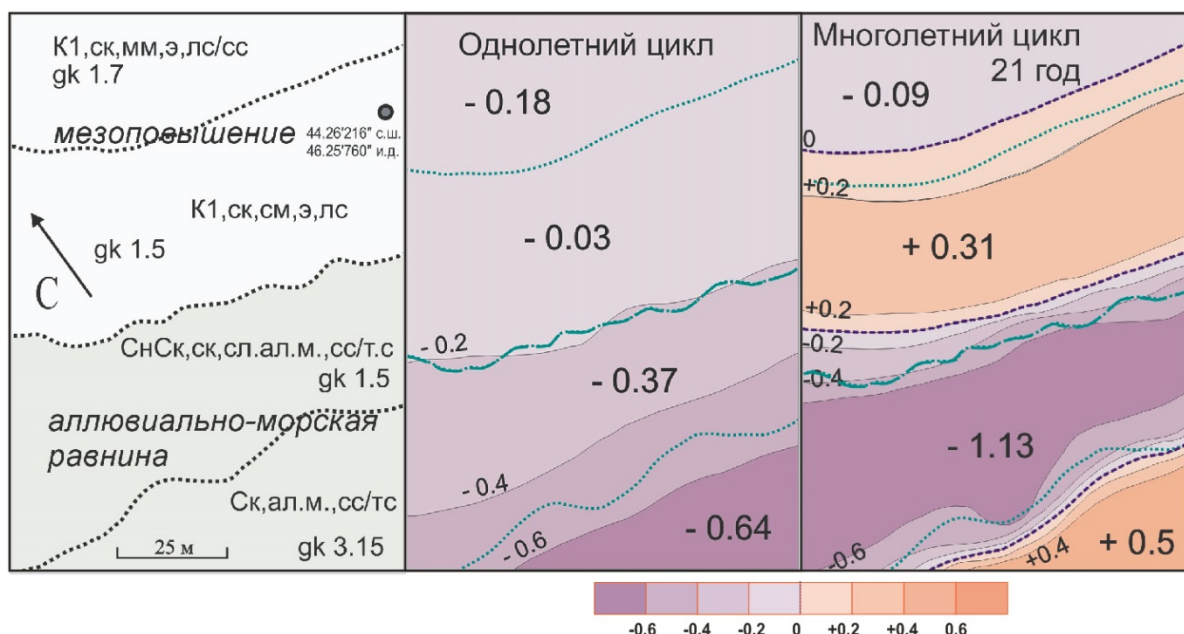


Рисунок – Динамика засоленного ПП в однолетних и многолетних циклах

Почвы: К₁ – светло-каштановые, Ск – солончаки луговые на контрастных двучленных отложениях, СнСк – солонцы-солончаки, Ск_{сч/тс} – солончаки луговые.

Высота солей в профиле: ск – солончаковые (< 30 см); сч – солончаковатые (> 30 см).

Гранулометрический состав: лс – легкий суглинок, сс – средний с., тс – тяжелый с., л.г.л. – легкая глина, с.г.л. – средняя гл., т.г.л. – тяжелая гл.

Степень динамики ПП: низкая ($\leq \pm 0.2$); средняя ($\pm 0.2 - \pm 0.6$); высокая ($\geq \pm 0.6$).

Выявлена связь между профильной и пространственной миграцией солей: чем выше контрастность почвенных профилей по гранулометрическому составу (gk), тем значительнее доля средне- и высокодинамичных мобильных ареалов почв.

Годичная динамика ПП обусловлена увеличением атмосферных осадков. Многолетняя динамика ПП обусловлена уровнем грунтовых вод в соответствии с трансгрессивно-регрессивными колебаниями Каспийского моря. Наименее динамичными себя показали светло-каштановые почвы на мезоповышении, наиболее динамичными – солончаки на контрастных двучленных отложениях и подчиненные солонцы-солончаки на равнине.

Определение градиента контрастности почвенных профилей дает возможность выявлять потенциальную динамику почвенного покрова по засолению и строить долгосрочные прогнозы последствий от подъема или снижения уровня моря, а также при планировании сельскохозяйственного использования в виде мелиорации, пастбищного использования.

Учет динамики почвенных ареалов в ПП, определение областей влияния таких почв может быть полезным для оптимизации мелиоративных мероприятий, «подстраивания» их под естественную динамику почвенного покрова.

Литература

- Гасанова З.У. Методические подходы к изучению динамики засоления переходных областей почвенного покрова // Успехи современного естествознания. 2017. № 4. С. 35-39. URL: <https://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36431> (дата обращения 15.07.2021).
- Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении / Дмитриев Е.А. – М.: Изд-во МГУ, 1972. – С. 61–62.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЮДЖЕТА МЕТАНА В БОЛОТНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО ТРАНСПОРТА В ГРУНТОВЫЕ ВОДЫ

Глаголев М.В.^{1,2,3,4}, Сабреков А.Ф.^{3,4}, Литти Ю.В.⁴, Терентьева И.Е.^{3,4}

¹Московский государственный университет, Москва, Россия

²Институт лесоведения РАН, Успенское (Одинцовского р-на), Россия
m_glagolev@mail.ru

³Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия
sabrekovaf@gmail.com

⁴Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия
kleptsova@gmail.com

Аннотация: Для оценки количества метана, мигрирующего из болот с током грунтовых вод, рассмотрена модель продукции и окисления метана в олиготрофном болоте.

1. Введение

Несколько десятилетий назад в поймах рек средней тайги Западной Сибири были обнаружены локализованные выходы метана – сипы. Они представляют собой плоские не покрытые растительностью участки насыщенного водой грунта супесчаного гранулометрического состава с многочисленными отверстиями, воронками, кратерами, из которых, как правило, сочится вода. Также из сипов выделяется метан (как посредством диффузии из жидкой фазы, так и в виде пузырей газа). Происхождение и пути миграции этого метана, однако, до сих пор остаются неясными (Belova et al., 2013). Было предложено три гипотезы: миграция газа из месторождений углеводородов; его выделение из деградирующих реликтовых многолетнемёрзлых пород; горизонтальный транспорт метана из болот, покрывающих водораздельные пространства. На протяжении последних лет авторы настоящего доклада проводили полевые и лабораторные исследования (изучали закономерности распространения сипов, состав стабильных изотопов С и Н в них, интенсивность биологической продукции и эмиссии метана и др.) с целью определить происхождение метана в сипах.

В настоящей работе мы ставили следующую задачу: оценить при помощи математического моделирования может ли типичная болотная экосистема («Мухрино», ХМАО) обеспечить грунтовые воды тем количеством метана, которое экспериментально обнаруживается на выходе из сипов.

2. Модель

Потенциальную продукцию (ПоП) метана определяли экспериментально (путем инкубации торфа в анаэробных условиях) и приводили к «стандартной температуре» (10 °С):

$$P_p = P \cdot f_1(10^\circ\text{C})/f_1(T) \quad (1)$$

где P и P_p – ПоП, соответственно, при произвольной температуре (T , °С) и при 10 °С; в качестве температурной зависимости $f_1(T)$ использовали закон Вант-Гоффа.

Поскольку потенциальная продукция измерялась в образцах, взятых только с глубин 0.15-0.2, 0.4-0.5, 1.2 и 2 м (под уровнем воды) и, исходя из физического смысла, принималась нулевой под слоем торфа (т.е. глубже $L = 3.5$ м), то на остальных глубинах она интерполировалась при помощи кубического эрмитового (монотонного) сплайна, который будем далее обозначать $S(z)$. Актуальную величину продукции $P_a(z)$ в болоте на заданной глубине (z) представляли в виде:

$$P_a(z) = F_1(T) \cdot F_2(z, \text{WTL}) \cdot S(z) \quad (2)$$

где $F_1(T)$, $F_2(z, \text{WTL})$ – «температурный фактор» и «гидрологический фактор», т.е. функции, отражающие влияние, соответственно, температуры и уровня стояния воды (WTL, м) на метаногенез; WTL будем отсчитывать от поверхности (WTL = 0) вглубь почвы (WTL > 0). Очевидно, что $F_1(T) = f_1(T)/f_1(10^\circ\text{C})$, а $F_2(z, \text{WTL})$ задавали как это делалось в

CH₄_Model (Глаголев, 2012). Суммарную продукцию (П, мг/м²/час) получали интегрированием актуальной продукции по всему слою торфа до глубины L с весовой функцией, представляющую собой зависимость плотности скелета (ρ , кг/м³) от глубины (т.к. лабораторные результаты измерения продукции обычно представляются в расчете на массу сухого вещества торфа, а в реальном болоте количество сухого вещества в заданном объеме на разных глубинах сильно различается. При расчетах мы использовали профиль плотности скелета, полученный для похожего болота в (Turunen et al., 2001).

Для вычисления потенциально возможной эмиссии (E_p) учитывали окисление CH₄:

$$E_p = P \cdot (1-r) \quad (3)$$

где r – доля метана, окисленного в некотором слое (при движении CH₄ с глубины b до глубины a), определялась по формуле 4:

$$r = 1 - \exp\{(\delta_a - \delta_b)/1000/(1/\alpha - 1)\} \quad (4)$$

основанной на теории Рэлея. Здесь δ_a , δ_b (‰) – изотопные составы углерода метана, соответственно, на глубинах a и b ; α – кинетический фактор разделения изотопов ($\alpha \approx 1.03$).

Сток вычисляли из уравнения водного баланса почвы:

$$Y = (W_0 + X) - (W + Z) \quad (5)$$

где W_0 и W — запасы влаги в почве, соответственно, в начале и в конце рассматриваемого промежутка времени, X — сумма атмосферных осадков, Y — сток, Z — испарение за рассматриваемый период (Давыдов, 1947).

3. Результаты и обсуждение

Расчеты, проведенные по описанной выше модели, дали значение $P = 36.6 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$. Для вычисления потенциально возможной эмиссии (E_p) нужно учесть окисление: $E_p = P \cdot (1-r) = 36.6 \cdot (1-0.185) \approx 29.8 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Однако полевые измерения эмиссии (которую мы будем называть «актуальной» и обозначать E_a) дали величины эмиссии $3.7 \div 5.0 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, т.е. в среднем можно принять значение $4.4 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$. Таким образом, под каждым квадратным метром поверхности болота ежечасно метан в количестве $E_p - E_a \approx 25.4 \text{ мг}$ не окисляется и не выходит в атмосферу там, где он образовался. Следовательно, это тот источник, который может пополнять запасы растворенного метана, непрерывно уносимого медленно текущими болотными водами.

При помощи полученного выше значения стока легко оценить концентрацию метана, которую следует ожидать при действии указанного источника. В первом приближении можно считать, что вся полученная разница $E_p - E_a$ уходит со стоком, тогда концентрация метана в уходящей воде составит $(E_p - E_a)/Y = 25.4/(1/24) (\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1})/(\text{л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}) \approx 610 \text{ мг/л}$, что, разумеется, невозможно. Реально наблюдавшиеся (в августе - сентябре) концентрации составили от 5 до 20 мг/л.

Однако выше мы считали, что образующийся метан может либо окисляться, либо выходить в атмосферу, либо растворяться в воде. Очевидно, что существует еще одна возможность – он может поступать в газовую фазу почвы (газовые пузыри, не могущие сразу прорваться к поверхности). К сожалению, специальных исследований в этом направлении на описываемом болоте не производилось. Но для других болот такие исследования выполнялись. Опираясь на (Мастепанов, 2004; Glagolev et al., 2000), мы смоделировали возможный профиль содержания CH₄ в газовой фазе (ГаФ) болотной почвы. Моделирование показало, что если в нее в летний период поступает $\approx 25 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ (а потом в осенне-зимне-весенний период значительного поступления нет, но разгрузка в атмосферу продолжается), то, во-первых, концентрация метана в ГаФ примерно соответствует экспериментально наблюдаемой и, во-вторых, равновесная концентрация метана, растворенного в болотных водах составит как раз десятки мг/л.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-77-10074).

Литература

- Глаголев М.В. Высокий уровень стояния воды может снижать эмиссию метана из почвы // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2012. Т. 3. № 1(5). С. 1-10.
- Давыдов Л.К. Водоносность рек СССР, ее колебания и влияние на нее физико-географических факторов. Л.: Гидрометеиздат, 1947. С. 16.
- Мастепанов М.А. Кинетика газообмена в профиле сфагнового болота: от метаногенеза к эмиссии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: МГУ, 2004. 25 с.
- Belova S.E., Oshkin I.Y., Glagolev M.V., Lapshina E.D., Maksyutov S.S., Dedysh S.N. Methanotrophic bacteria in cold seeps of the floodplains of northern rivers // Microbiology. 2013. V. 82. № 6. P. 743-750.
- Glagolev M.V., Uchiyama H., Lebedev V., Utsumi M., Smagin A.V., Glagoleva O., Erokhin V., Olenov P., Nozhevnikova A. Oxidation and Plant-Mediated Transport of Methane in West Siberian Bog // Proceedings of Eighth Symposium on the Joint Permafrost Studies between Japan and Russia in 1999. 2000. P. 143-149.
- Turunen J., Tahvanainen T., Tolonen K., Pitkänen A. Carbon accumulation in West Siberian mires, Russia // Global Biogeochemical Cycles. 2001. V. 15. No 2. P. 285-296.

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВИДОВ

Дружинина О.В.¹, Масина О.Н.², Щербаков А.В.², Васильева И.И.², Корепанова А.Э.³

¹*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской Академии Наук, Москва, Россия*

ovdruzh@mail.ru

²*Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, Елец, Россия*

olga121@inbox.ru

shcherbakov_al.vl@mail.ru

irinavsl@yandex.ru

³*Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова Российского технологического университета МИРЭА, Москва, Россия*

anna.korepanova.01@mail.ru

Аннотация: рассмотрено построение многомерных математических моделей динамики взаимодействующих видов с учетом конкуренции и мутуализма. Описано применение принципа редукции задач устойчивости дифференциальных включений к задачам устойчивости траекторий других типов уравнений. Результаты могут быть использованы при решении задач моделирования и устойчивости детерминированных и стохастических популяционных моделей.

1. Введение

Различные вопросы, связанные с построением и анализом устойчивости математических моделей динамики взаимодействующих видов, рассматривались в разных работах (Александров и др., 2006; Базыкин, 2003; Свирижев, Логофет, 1978; Пых, 1983, и др.). Одним из подходов к исследованию устойчивости моделей динамики взаимодействующих видов является применение принципа редукции задачи об устойчивости решений дифференциального включения к задаче об устойчивости решений других типов уравнений. Применяя принцип редукции, мы используем обобщенный прямой метод Ляпунова. Теоретические основы принципа редукции заложены в (Шестаков, 1990; Меренков, 2000; Дружинина, Масина, 2009) Развитие, конкретизация и обобщение принципа редукции представлены в (Demidova et al., 2017; Demidova et al., 2018) и в других работах.

2. Модели и результаты

В качестве базовой рассматривается многомерная модель динамики взаимодействующих видов, описываемая системой обыкновенных дифференциальных уравнений, с учетом внутривидовой и межвидовой конкуренции. Указанная модель является обобщением классической модели Лотки–Вольтерра на многомерный случай.

В работе предложено обобщение базовой модели на основе построения многомерной модели динамики взаимодействующих видов, учитывающей конкуренцию и мутуализм.

От детерминированной модели с конкуренцией и мутуализмом выполнен переход к моделям, описываемым дифференциальными включениями, нечеткими и стохастическими дифференциальными уравнениями (в векторном виде). В качестве примеров рассмотрены четырехмерные, шестимерные и восьмимерные конкретизации детерминированных и стохастических моделей.

Принцип редукции предполагает, в частности, определение соответствия между многомерным дифференциальным включением и нечетким дифференциальным уравнением для каждого альфа-уровня. Соответствие базируется на том факте, что многозначное отображение, порождаемое множеством всех движений включения, отвечает альфа-уровню функции, которая является решением нечеткого дифференциального уравнения. Для

перехода к включениям используются многозначные модификации правой части обобщенной нестационарной модели с конкуренцией и мутуализмом.

В настоящей работе сформулированы определения различных типов устойчивости дифференциальных включений, нечетких и стохастических дифференциальных уравнений, используемых для описания многомерных моделей динамики взаимодействующих видов с учетом конкуренции и мутуализма. Сформулированы определения функций Ляпунова и их производных для указанных типов уравнений. Получены достаточные условия устойчивости, асимптотической устойчивости (в том числе по вероятности) с помощью принципа редукции. Показано, что если нулевое решение нечеткого уравнения асимптотически альфа-устойчиво (равномерно по альфа), то нулевое решение соответствующего стохастического уравнения асимптотически устойчиво по вероятности (соответственно асимптотически устойчиво почти наверное).

3. Заключение

Принцип редукции позволяет с единой точки зрения изучать свойства устойчивости решений различных типов детерминированных и недетерминированных систем и применяется, в частности, для исследования устойчивости математических моделей динамики взаимодействующих видов. Результаты могут быть использованы при решении задач устойчивости нелинейных динамических систем (в частности, систем с миграционными потоками), а также для сравнительного анализа качественных свойств детерминированных моделей и соответствующих им стохастических моделей. Одна из перспектив исследований состоит в разработке алгоритмов и инструментального программного обеспечения.

Литература

- Александров А.Ю., Платонов А.В., Старков В.Н., Степенко Н.А. Математическое моделирование и исследование устойчивости биологических видов. СПб.: Соло, 2006. 272 с.
- Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. Москва–Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2003. 368 с.
- Дружинина О.В., Масина О.Н. Методы исследования устойчивости и управляемости нечетких и стохастических динамических систем. М.: ВЦ РАН, 2009. 180 с.
- Дружинина О.В., Масина О.Н., Щербаков А.В. Структура и качественный анализ математических моделей динамики популяций при наличии мутуализма // Нелинейный мир. 2016. Т.14. № 6. С. 34–42.
- Меренков Ю.Н. Устойчивоподобные свойства дифференциальных включений, нечетких и стохастических дифференциальных уравнений. М.: Изд-во РУДН, 2000. 122 с.
- Свирижев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.
- Пых Ю.А. Равновесие и устойчивость в моделях популяционной динамики. М.: Наука, 1983. 182 с.
- Шестаков А.А. Обобщенный прямой метод Ляпунова для систем с распределенными параметрами. М.: Наука, 1990. 316 с.
- Demidova A.V., Druzhinina O.V., Jacimovic M., Masina O.N., Mijajlovic N. Synthesis and analysis of multidimensional mathematical models of population dynamics // Proceedings of the Selected Papers of the 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems ICUMT (Moscow, Russia, November 5–9, 2018). New York: IEEE Xplore Digital Library, 2018. IEEE Catalog Number CFP 1863G-USB. P. 361–366.
- Demidova A.V., Druzhinina O.V., Masina O.N. Design and stability analysis of nondeterministic multidimensional populations dynamics models // Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series Mathematics. Information Sciences. Physics. 2017. V. 25. № 4. P. 363–372.

АССИМИЛЯЦИЯ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛЬЮ АГРОЭКОСИСТЕМЫ МЕТОДОМ МИНИМИЗАЦИИ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОСРЕДСТВОМ УПРАВЛЕНИЯ АЗОТНЫМИ ПОДКОРМКАМИ

Ерёменко Д.А.¹, Медведев С.А.¹

¹ *Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*
jira@danilaeremenko.atlassian.net
glorguin@yandex.ru

Аннотация: для повышения точности динамических моделей продукционного процесса перспективной идеей выглядит использование данных дистанционного зондирования для оперативной коррекции модельных расчётов. Как правило, для этого используется индекс NDVI, который может быть как измерен в ходе дистанционного зондирования, так и вычислен по листовому индексу, который входит в состав выходных данных большинства динамических моделей продукционного процесса. Работа посвящена исследованию эффективности метода рекалибровки на примере динамической модели продукционного процесса риса ORYZA и с использованием доз азотных подкормок в качестве корректирующих возмущений. В результате было показано, что этот метод хорошо работает только в том случае, когда модельный урожай ниже расчётного. В противоположном случае были получены противоречивые результаты.

Введение

Динамические модели продукционного процесса активно используются для проведения теоретических исследований в сельском хозяйстве. Они позволяют на много порядков снизить трудоёмкость исследований, а также проводить вычислительные эксперименты, невозможные на реальных объектах. Однако для применения динамических моделей продукционного процесса в реальных задачах земледелия встаёт вопрос их достоверности. Модель, как правило, учитывает не все процессы, протекающие в агроэкосистеме, и на поведение посева на реальном поле могут влиять факторы, не учтённые моделью. В то же время, широкое распространение средств дистанционного зондирования позволяет наблюдать в ходе развития производственного посева его состояние. Как правило, для этих целей используются гиперспектральные спутниковые снимки и индекс NDVI, коррелирующий с листовым индексом LAI, который, как правило, содержится в выходных данных динамических моделей продукционного процесса.

Для повышения достоверности результатов модельных расчётов перспективной идеей выглядит использование данных дистанционного зондирования для коррекции модельных расчётов. Однако листовый индекс не является изолированным показателем, а зависит от большого количества внутренних переменных модели, которые должны быть согласованы логикой работы модели. Поэтому ассимиляция данных дистанционного зондирования динамической моделью сталкивается с принципиальной неполнотой входных данных и представляет собой нетривиальную задачу. В мировой практике существует три основных подхода к решению этой задачи.

- Метод адаптивного обновления. Суть метода состоит в том, чтобы по набору измерений NDVI на разных шагах модели корректировать значение внутренней переменной "удельная скорость роста листьев". Этот метод требует тесного взаимодействия с логикой работы динамической модели продукционного процесса и поэтому не подходит для интеграций, необходимых для создания систем поддержки принятия решений в сельском хозяйстве.
- Метод апостериорного переприсвоения. Суть метода в том, что на основании статистики урожаев и индексов NDVI за некий период наблюдений и модельных расчётов по тем же точкам производится вывод формулы, с помощью которой требуется корректировать модельные результаты в зависимости от значений NDVI.

Этот метод не требует большого количества вычислительных ресурсов, но требует наличия достаточного объёма данных. Кроме того, не существует единой методики вывода формулы коррекции модельного урожая по данным дистанционного зондирования.

- Метод рекалибровки. Метод близок к методу адаптивного обновления, однако вместо внутренней переменной модели корректируются её входные данные, имеющие однозначный физический смысл. При этом минимизируется невязка между смоделированными и измеренными NDVI с использованием минимальных по мощности воздействий на агроэкосистему. Этот метод свободен от недостатков двух других методов, но требует большого количества вычислительных ресурсов, и желательно использовать параллельные вычисления.

Материалы и методы

В настоящей работе исследовалась эффективность метода рекалибровки на примере динамической модели продукционного процесса ORYZA. В качестве корректирующих возмущений были выбраны азотные подкормки. Для вычисления индекса NDVI по рассчитанной по модели ORYZA LAI использовалась модель PROSAIL. Сам алгоритм рекалибровки выглядел следующим образом.

1. По исходным данным определяются возможные даты подкормок, количество подкормок N . Формируется вектор подкормок N и заполняется нулями (отсутствие подкормок).
2. Запускается модель ORYZA. Помимо известной информации об условиях произрастания, ей передаётся вектор подкормок.
3. Для дат, на которые известны NDVI, по результатам модельных расчётов берётся LAI и рассчитывается с помощью модели PROSAIL NDVI.
4. Рассчитывается невязка по NDVI как сумма квадратов разностей модельных NDVI и измеренных.
5. Из текущего вектора азотных подкормок создается N новых вариантов, в каждом из которых мы пробуем добавить 5 единиц азотного удобрения в каждую доступную дату предыдущего вектора подкормок
6. Повторяются шаги 2 - 4.
7. Если невязка по NDVI ни в одном из вариантов вектора подкормок, полученных на шаге 5, не уменьшилась, значит, необходимо остаться на предыдущем варианте и считать его решением задачи. В противном случае, повторить шаг 5.

Этот алгоритм исследовался на пяти точках, для которых были известны погодные и почвенные данные, данные о культуре и способе ее выращивания для расчета при помощи модели ORYZA, а также временные ряды NDVI, полученные из спутниковых снимков, необходимые для вычисления оценки по выбранному критерию оптимизационной задачи.

Результаты

В ходе проведения исследования только в одной из точек модельный урожай без ассимиляции данных был ниже реального. Только в этой точке с помощью ассимиляции данных удалось добиться того, чтобы модельный урожай в ходе ассимиляции данных приблизился к реальному, причём невязка по урожаю составила около 2% от его величины. Для этого потребовалось 10 итераций алгоритма, описанного в разделе "Материалы и методы". В двух других точках по критерию NDVI удалось с помощью азотных подкормок приблизить модельные NDVI к измеренным, однако модельный урожай, который и так был выше реального, ещё больше увеличился, что лишь ухудшило работу модели. В этих точках для достижения результата потребовалось 9 и 10 итераций соответственно. Наконец, ещё в

двух точках первое же добавление подкормок увеличило невязку по NDVI, и поэтому в ходе ассимиляции данных модельный урожай остался неизменным.

Выводы

Причиной полученных результатов является то, что модель ORYZA при увеличении азотного питания всегда даёт прибавку урожая. Это хорошо для случая, когда фактический урожай выше измеренного, но не годится, когда фактический урожай ниже измеренного, и его необходимо понизить. Можно предположить, что в зависимости от соотношения модельного и фактического урожая следует выбирать качественно различные корректирующие возмущения, противоположным образом влияющие на урожай, но это совершенно не годится для применения моделей в системах поддержки принятия решений, поскольку в ситуации реальной сельскохозяйственной практики фактический урожай ещё не известен. В целом адекватной выглядит и третья группа результатов, когда превышение модельного урожая над фактическим привело к отсутствию необходимости внесения корректирующих возмущений. Однако вторая группа результатов, при которой внесение подкормок уменьшало невязку по NDVI, но увеличивало её по урожаю, свидетельствует о том, что требуется дальнейшая работа по выработке более корректных модельных воздействий на агроэкосистему при ассимиляции данных дистанционного зондирования.

Литература

- Гурин П.Д., Захарова Е.Т., Топаж А.Г. Алгоритм подбора оптимальных сроков внесения и уровня доз азотных удобрений и подкормок в рамках имитационной модели AGROTOOL // Материалы Международной конференции «Тенденции развития агрофизики в условиях изменяющегося климата (к 80-летию Агрофизического НИИ)». Санкт-Петербург, 20–21 сентября 2012 г. – СПб.: Любавич, 2012.- С. 494-496
- Топаж А.Г., Митрофанов Е.П. Ассимиляция данных в имитационном моделировании экологических процессов методом минимизации корректирующих возмущений // Вестник СПбГУ. Серия "Прикладная математика. Информатика. Процессы управления" 2017 Т. 13 Вып. 3, С.326-338
- Delécolle, R., Maas, S., Guérif, M., Baret, F., 1992 Remote sensing) and crop production models: present trends. ISPRS J. Photogramm. 47, 145–161.
- Jin, X., Kumar, L., Li, Z., Feng, H., Xu, X., Yang, G., Wang, J., 2018 A review of data assimilation of remote sensing) and crop models. Eur. J. Agron. 92, 141–152.
- John Weier, David Herring. Measuring Vegetation (NDVI & EVI).
URL:<https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation>
- Li, T., Angles, O., Marcaida, M. III, Manalo, E., Manalili, M. P., Radanielson, A., Mohanty, S. 2017 From ORYZA2000 to ORYZA (v3): An improved simulation model for rice in drought and nitrogen-deficient environments. Agricultural and Forest Meteorology, 237-238, 246–256.
- Matthew, R.B., D. Bachelet, and H.H. van Laar (eds.). 1995 Modeling the Impact of Climate Change on Rice Production in Asia. CAB International, Wallingford, United Kingdom.
- Setiyono, T. D., E.D. Quicho, F.H. Holec, et al. 2018 Rice yield estimation using synthetic aperture radar (SAR) and the ORYZA crop growth model: development and application of the system in South and South-east Asian countries. International Journal of Remote Sensing): 40 (21): 8093-8124.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1547457>
- Stephane Jacquemoud, Wout Verhoef. PROSPECT+SAIL: 15 Years of Use for Land Surface Characterization.
URL:http://webdocs.dow.wur.nl/internet/grs/Workshops/Environmental_Applications_Imaging_Spectroscopy/12_Jacquemoud_Prospect/IEEE_Jacquemoud_PROSPECT.pdf

ПРОГНОЗ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ ПО ПРОСТОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Замолотчиков Д.Г.¹

¹ЦЭПЛ РАН, Москва, Россия

dzamolod@mail.ru

Аннотация: Предложена простая модель динамики глобальной температуры, комбинирующая логарифмический эффект роста концентрации диоксида углерода и вклад климатических циклов. С использованием сценариев изменения концентрации диоксида углерода, предложенных в 5-м оценочном докладе МГЭИК, построен прогноз изменения среднегодовой глобальной температуры в XXI веке. Траектории роста глобальной температуры из 5-го оценочного доклада МГЭИК на 0.9–1.8 °C выше, чем найденные по статистической модели.

Проблема глобального изменения климата и история международных усилий, направленных на противодействие этому процессу, являются хорошим примером того, как меняется отношение к модельным результатам и в какой степени они влияют на принятие решений. Пятый оценочный доклад МГЭИК, вышедший в 2013 г. (Изменение климата..., 2013), использует набор сценариев выбросов (RPC2.6, RPC4.5, RPC6, RPC8.5) и мультимодельный ансамбль CMIP5 для прогнозных расчетов. Оценки роста глобальной температуры формируются путем усреднения результатов отдельных моделей, различия этих результатов используются для расчета меры неопределенности прогноза. Парижское климатическое соглашение, принятое в декабре 2015 г., в качестве цели по смягчению изменений климата ставит удержание средней глобальной температуры ниже 2 °C от доиндустриального уровня. Национальные вклады по сокращению выбросов парниковых газов были заявлены странами заранее, зафиксированы и проанализированы органами РКИК ООН. Установлено, что объявленные национальные вклады недостаточны для удержания потепления в пределах 2 °C. Эти вполне конкретные и официальные заявления были сделаны при активном использовании прогнозных результатов 5-го оценочного доклада МГЭИК.

Нами ранее (Замолотчиков, 2013, 2014) было предложено простое уравнение, описывающее динамику глобальной температуры как функцию от логарифма атмосферной концентрации CO₂ и климатических циклов. При исходной формулировке и идентификации модели были использованы данные по аномалиям глобальной температуры за 1850–2010 гг. (Jones et al., 2016), исторические сведения по динамике атмосферной концентрации CO₂ за 1850–1958 гг. (Brown, 2012) и данные мониторинга атмосферной концентрации CO₂ по станции Мауна-Лоа (Tans, Keeling, 2012). Итоговое уравнение имеет следующий вид:

$$T = -2.46 + 2.82 \ln(\text{CO}_2) - 0.101 \sin(15.7 + 0.0914 Y) + 0.0247 \sin(0.600 Y), \quad (1)$$

$$R^2=0.866, P<0.01, n=161.$$

где T – средняя глобальная температура, °C; CO₂ – концентрация углекислого газа в атмосфере, ppm; Y – порядковый номер года по нашей эре.

Уравнение 1 позволяет осуществить прогноз динамики глобальной температуры в XXI веке. Для такого прогноза необходимо иметь сценарий изменения атмосферной концентрации CO₂, которая, в свою очередь, зависит от будущей динамики антропогенных эмиссий и компенсирующих реакций природной среды. Используем траектории концентраций CO₂ из 5-го оценочного доклада МГЭИК (Meinshausen et al., 2011) и порядковые номера лет и проведем расчет глобальной температуры по уравнению 1 для 2010–2100 гг. с шагом в 1 год (рисунок).

При реализации наиболее жесткого сценария RCP8.5 средняя глобальная температура достигнет 16.8 °C. Иначе говоря, потепление за 2010–2100 гг. составит 2.4 °C. Для сценариев

RCP6.0 и RCP4.5 рост температуры за 90 лет равен 1.4 и 0.8 °C соответственно. Сценарий RCP2.6 приводит к росту глобальной температуры всего на 0.1 °C.

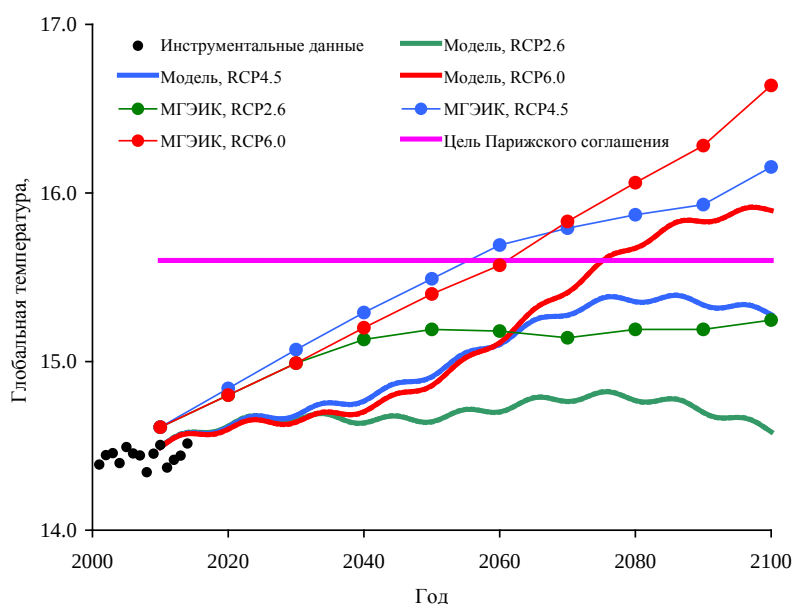


Рисунок – Прогноз средней глобальной температуры на 2010-2100 гг. по уравнению и согласно 5-му оценочному докладу МГЭИК.

Согласно прогнозу по ансамблю моделей CMIP5, глобальная температура достигнет 15.6 °C в 2042 г. при реализации сценария RCP8.5, в 2056 г. при RCP4.5, в 2062 г. при RCP6.0. Только лишь сценарий RCP2.6 оказывается соответствующим цели Парижского соглашения. Если опираться на прогноз по уравнению 1, то превышение границы 2 °C произойдет в 2061 г. при RCP8.5 и в 2075 г. при RCP6.0. Сценарии RCP4.5 и RCP2.6 будут соответствовать целям Парижского соглашения. Это означает, что человечеству надо приложить значительно меньшие усилия по сокращению выбросов парниковых газов и в более длительные сроки.

Литература

- Замолодчиков Д. Г. Естественная и антропогенная концепции современного потепления климата // Вестник Российской академии наук. 2013. Т. 83. № 3. С. 227-235.
- Замолодчиков Д. Г. Естественная и антропогенная компоненты современных изменений глобальной температуры // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 3. С. 351-354.
- Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа, резюме для политиков, техническое резюме и часто задаваемые вопросы / Ред. Т. Ф. Стокер и др. МГЭИК, 2013.
- Brown L.R. Full Planet, Empty Plates: The New Geopolitics of Food Scarcity. Supporting data. Washington: Earth Policy Institute, 2012. http://www.earth-policy.org/books/fpep/fpep_data (дата обращения 18.10.2012).
- Jones P.D., Parker D.E., Osborn T.J., Briffa K.R. Global and hemispheric temperature anomalies – land and marine instrumental records // Trends: A Compendium of Data on Global Change. Oak Ridge: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2016. <http://cdiac.ornl.gov/trends/temp/jonescru/jones.html> (дата обращения 05.02.2016).
- Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K., Daniel J.S., Kainuma M.L. T., Lamarque J-F., Matsumoto K., Montzka S.A., Raper S.C.B., Riahi K., Thomson A., Velders G.J.M., van Vuuren D.P.P. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // Climatic Change. 2011. V. 109. P. 213–241.
- Tans P., Keeling R. Trends in atmospheric carbon dioxide. Boulder: Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, NOAA, 2012. http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/co2_data_mlo.html (дата обращения 18.10.2012).

УРАВНЕНИЯ ДИФФУЗИИ-АДВЕКЦИИ-РЕАКЦИИ И ИДЕАЛЬНОЕ СВОБОДНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДОВ НА НЕОДНОРОДНОМ АРЕАЛЕ

Зеленчук П.А.¹, Цибулин В.Г.¹

¹Южный Федеральный Университет, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича, Ростов-на-Дону, Россия

zelenchukpavel@mail.ru

vgcibulin@sfedu.ru

Аннотация: рассматриваются уравнения диффузии–адвекции–реакции, моделирующие распределение видов в неоднородной среде обитания при идеальном свободном распределении (ИСП). На примере системы хищник–жертва анализируются параметры уравнений, при которых имеется стационарное решение отвечающее ИСП. Исследована устойчивость полученного решения и трансформация распределения видов, отвечающая этому решению, при малых отклонениях параметров от равновесных значений.

Введение

Моделирование пространственного распределения взаимодействующих видов является важным направлением в математической биологии и экологии (Мюррей, 2011; Ризниченко, Рубин, 2019). Наиболее успешный способ построения такого рода моделей основан на использовании уравнений диффузии–адвекции–реакции (Cantrell, Cosner, 2003), позволяющих учитывать различные миграционные факторы и неоднородность среды обитания (Будянский, Цибулин, 2019). Одной из ведущих концепций, характеризующей поведенческую реакцию биологических видов на совокупные условия окружающей среды, является концепция идеального свободного распределения (ИСП), выстраивающая миграционную динамику в соответствии с доступным ресурсом (Cressman, Křivan, 2006; Cantrell, Cosner et. al. 2018; Зеленчук, Цибулин 2021).

В данной работе исследуется модель хищник–жертва на ареале с неоднородным распределением ресурса во основе которой лежит концепция ИСП и система уравнений диффузия–адвекция–реакция.

Объекты и методы

Рассмотрим на кольцевом одномерном ареале два вида, взаимодействующих по принципу хищник–жертва, в предположении, что функция ресурса жертвы неоднородна вдоль ареала. Такая модель может быть описана системой уравнений диффузия–адвекция–реакция:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -q'_1 + u \left[\eta_1 u \left(1 - \frac{u}{p} \right) - \mu_1 v \right], & q_1 &= -k_1 u' + u \alpha_1 Q'_1 - u \beta_1 Q'_2 \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -q'_2 + v \left[-\eta_2 + \mu_2 \frac{u}{p} \right], & q_2 &= -k_2 v' + v \beta_2 Q'_3 \end{aligned} \quad (1)$$

где u и v – плотности популяций жертвы и хищника соответственно, $p(x)$ – ресурс жертвы, q_1, q_2 – миграционные потоки, а штрих означает производную по x .

Функции Q_j , ($j = 1, 2, 3$) – характеризуют стратегии направленной миграции. Выбор этих функций определяет характер пространственного распределения видов.

Система (1) дополняется условиями периодичности и начальными условиями:

$$u(0,t) = u(a,t), \quad v(0,t) = v(a,t) \quad (2)$$

$$q_i(0,t) = q_i(a,t), \quad i = 1,2$$

$$u(x,0) = u_0(x), \quad v(x,0) = v_0(x) \quad (3)$$

При отсутствии пространственных потоков ($q_1 = q_2 = 0$) система (1) имеет стационарное решение, отвечающее ИСР, в виде:

$$u = \frac{\eta_2 p}{\mu_2}, \quad v_n = \frac{\eta_1 \eta_2 p (\mu_2 - \eta_2)}{\mu_1 \mu_2^2} \quad (4)$$

$$\text{Данное решение устойчиво при выполнении условия: } \eta_2 < \mu_2 < 2\eta_2 \quad (5)$$

При $\mu_2 < \eta_2$ хищник вымирает, и система приходит к состоянию равновесия $(u, v) = (p, 0)$, если же $\mu_2 > 2\eta_2$ то возникает предельный цикл. Наличие потоков q_1, q_2 сохраняет (4) с ИСР при логарифмическом виде функций Q_j :

$$Q_1 = \ln p, \quad Q_2 = \ln v, \quad Q_3 = \ln u \quad (6)$$

и выполнении дополнительных условий:

$$k_1 = \alpha_1 - \beta_1, \quad k_2 = \beta_2 \quad (7)$$

Для численного анализа задачи (1) – (3) с учётом (6), (7) используется интегро-интерполяционный метод смещённых сеток аналогично (Будянский, Цибулин, 2019; Зеленчук, Цибулин, 2021).

Результаты

Вычислительный эксперимент для различных значений параметров системы (1) подтвердил реализацию ИСР-решений (4) при выполнении (6) и (7). Для примера, на рис. 1 приведено решение для ($\mu_1 = 4, \mu_2 = 6.5, \eta_1 = 5, \eta_2 = 5, \alpha_1 = 0.2, \beta_1 = 0.1, k_2 = 0.1, k_2 = 0.2, \beta_2 = 0.2$) и его отклонение от ИСР при малом изменении параметра β_2 . На рис. 2 показано возникновение предельного цикла при нарушении условия (5), видно, что распределение и в этом случае соответствует ИСР.

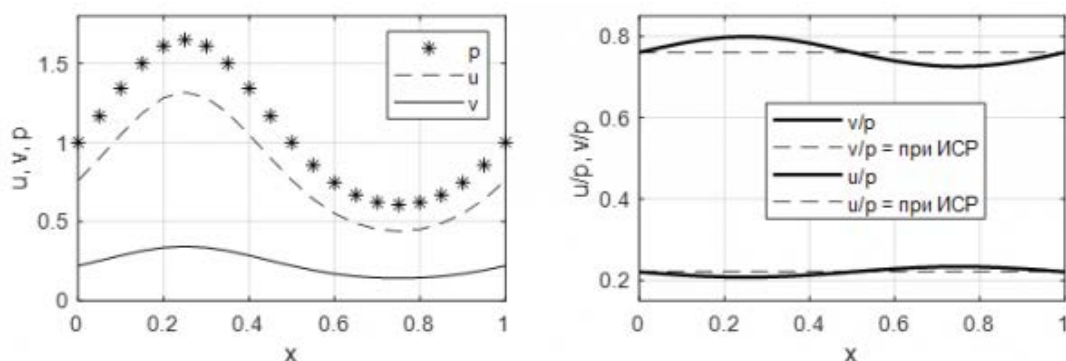


Рисунок 1 – Распределение жертвы u и хищника v в сравнении с ресурсом p соответствующее ИСР (слева) и отклонение от ИСР (справа) при малом изменении β_2 .

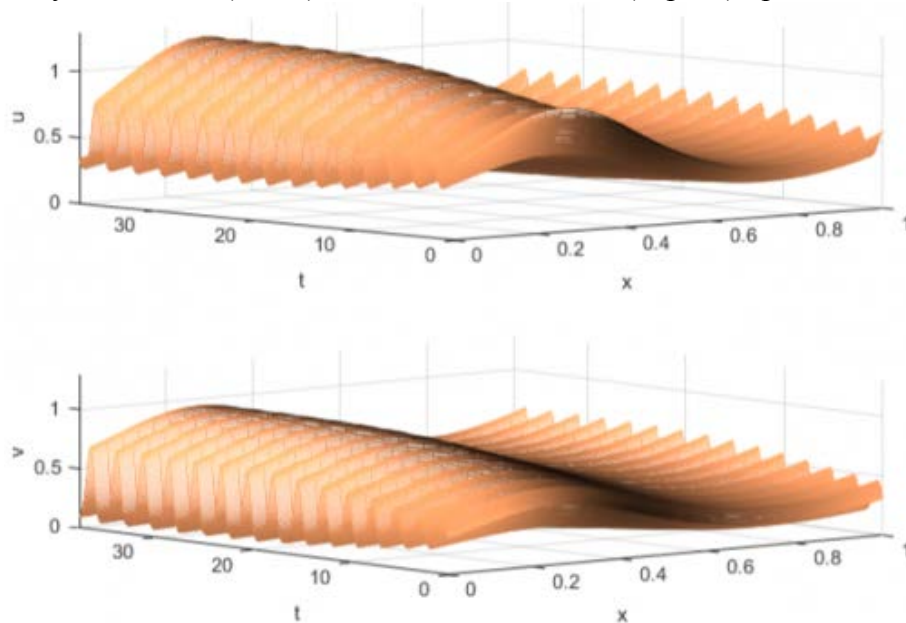


Рисунок 2 – Возникновение колебательного режима с ИСР при нарушении (5).

Выводы

Для задачи (1)–(3) на кольцевом одномерном ареале найдены условия на параметры системы, при которых имеется ненулевое стационарное аналитическое решение, соответствующее ИСР. Представлены численные результаты, демонстрирующие устойчивость найденных решений и их трансформацию при нарушении соотношений между параметрами.

Литература

- Будянский А. В., Цибулин В. Г. Моделирование многофакторного таксиса в системе “хищник – жертва” // Биофизика, 2019, Т. 64, Вып. 2, с. 343-349.
- Зеленчук П. А., Цибулин В. Г. Идеальное свободное распределение в модели хищник-жертва при многофакторном таксисе. // Биофизика, 2021, Т. 66, №3, с. 546-554.
- Мюррей Дж. Д. Математическая биология. Т. II. Пространственные модели и их приложения в биомедицине. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011 – 1104 с.
- Ризниченко Г. Ю., Рубин А. Б., Математические методы в биологии и экологии. Биофизическая динамика продуктивных процессов в 2 ч. Часть 2. М: Издат. Юрайт, 2019. – 185 с.
- Cantrell R. S. Cosner C. Spatial Ecology via Reaction-Diffusion Equations – John Wiley and Sons, Chichester, UK, 2003. 411 p.
- Cantrell, R.S., Cosner, C., Martinez, S., Torres, N. On a competitive system with ideal free dispersal // J. Diff. Equations. 2018, Vol. 265. P. 3464-3493.
- Cressman R., Krivan, V. Migration Dynamics for the Ideal Free Distribution // American Naturalist, 2006, Vol. 168, No. 3, P. 384-397.

ОЦЕНКА СВЕТОВЫХ УСЛОВИЙ ПОД ПОЛОГОМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА И ВОЗОБНОВЛЕНИЯ ДЕРЕВЬЕВ

Зубкова Е.В.¹, Быховец С.С.¹, Стаменов М.Н.¹, Фролов П.В.¹

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук, ФИЦ ПНЦБИ РАН, Пущино, Российская Федерация
zubkova@pbcras.ru

Аннотация: Инструментальными измерениями в полевых условиях показано, что ярус трав и подрост до 1,5 м могут существенно уменьшать освещенность, что влияет на условия прорастания и может вызывать гибель проростков деревьев.

1. Введение

Освещенность – один из видоспецифичных параметров, определяющих экологическую нишу растения (Hutchinson, 1978). Качественная оценка светолюбия и теневыносливости древесных пород дается в работах М.К. Турского (1904) и других авторов; количественные показатели роста подроста деревьев при недостатке света и значения их световых минимумов приводятся О.И. Евстигнеевым (Evstigneev, 2018). Для трав и кустарничков (более 2000 видов) диапазонные балловые оценки светолюбия приводятся в эколого-ценотических шкалах Д.Н. Цыганова (1983). При моделировании выживания проростков деревьев и развития ценопопуляций травяно-кустарничкового яруса (ТКЯ), наряду с учетом влияния деревьев, необходимы данные о прохождении света через кроны подроста (с учетом подроста ниже 1,5 м) и под пологом доминирующих трав.

2. Объекты и методы

В модели CAMPUS-S (Frolov et al., 2020) освещенность используется для вычисления доступной растениям фотосинтетически активной радиации и, следовательно, их потенциального прироста. Нами была выполнена работа по оценке освещенности под пологом доминирующих растений ТКЯ: осоки волосистой (*Carex pilosa* Scop.), сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria* L.), орляка обыкновенного (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.), таволги вязолистной (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim). Эти виды в лесных фитоценозах образуют локусы с покрытием более 50% и формируют подъярус травяного покрова высотой от 20–30 см (осока, сныть) до 70–100 см (орляк, таволга). Также было определено влияние на освещенность подроста до 1.5 м ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) H.Karst.), дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), клена остролистного (*Acer platanoides* L.); лещины обыкновенной (*Corylus avellana* (L.) H.Karst.). Проведено сравнение освещенности над и под растениями указанных видов. Исследования выполнены на юге Московской области в Серпуховском районе, а также в Заокском районе Тульской области (Таблица 1).

Для оценки условий освещенности выполнялась полусферическая съемка полога смартфоном Xiaomi Redmi Note 8 Pro с объективом-адаптером Apexel 195° Fisheye Lens, с последующей обработкой согласно (Фролов и др., 2019).

Таблица 1 – Объекты и территории исследований

Вид	Фитоценоз	Территория
<i>Acer platanoides</i>	Липняк с кленом	Памятник природы «Овраги», III участок в г.о. Пущино
<i>Corylus avellana</i>	Сосняк сложный	Восточная окраина г.о. Пущино
<i>Quercus robur</i>	Сосняк кустарничково-зеленомошный	Отрадинское УЛ на границе с Приокско-Террасным заповедником
<i>Picea abies</i>	Сосняк кустарничково-зеленомошный	Отрадинское УЛ на границе с Приокско-Террасным заповедником
	Сосняк сложный	Приокско-Террасный заповедник
Травяно-кустарничковый ярус		
<i>Aegopodium podagraria</i>	Сосняк сложный	Восточная окраина г.о. Пущино
	Липняк с кленом	Памятник природы «Овраги», III участок в г.о. Пущино
<i>Carex pilosa</i>	Сосняк сложный	Отрадинское УЛ на границе с Приокско-Террасным заповедником
	Березняк волосистоосоковый	Приокско-Террасный заповедник
	Липняк волосистоосоковый	Данковское участковое лесничество (УЛ) между д. Борисово и ФАД «Крым» в г.о. Серпухов
<i>Filipendula ulmaria</i>	Осинник таволговый	Заокский р-он, западнее пос. Приокский

3. Результаты и обсуждение

Полученные данные показали, что ярус трав высотой 20–30 и 70–80 см уменьшает освещенность под их пологом до уровня 3–5% от надпологовой. В парцеллах с доминированием сныти, осоки, таволги отмечается незначительное участие других видов ТКЯ. Подрост ели, клена, дуба и лещины перехватывает значительную часть светового потока, что может приводить к полному отсутствию надземных побегов трав и кустарничков и образованию мертвопокровных участков с освещенностью ниже 1%.

Для проростков деревьев освещенность под пологом трав и подроста также может быть критической. Высота проростков обычно не превышает 10 см (Онтогенетический атлас, 2013; Чистякова и др., 1989). После исчерпания запасных веществ семени единственным источником пластических веществ становится фотосинтез. Растение погибает, если не может обеспечить необходимое количество ассимилянтов для самоподдержания и роста.

4. Выводы

Показано, что ярус трав высотой более 20 см и подрост деревьев могут существенно уменьшать освещенность нижерасположенных растений и быть причиной гибели проростков древесных видов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ 18-14-00362.

Литература

- Онтогенетический атлас растений: научное издание. Том VII / Мар. гос. ун-т; отв. и науч. ред. проф. Л. А. Жукова. Йошкар-Ола, 2013. 364 с.
- Турский М.К. Лесоводство. М.: Типо-литогр. Т-ва И. Н. Кушнарев и К.°, 1904. 377 с.
- Фролов П.В., Фролова Г.Г., Шанин В.Н., Быховец С.С. Методика вычисления индекса пропускания солнечной радиации пологом по полусферической фотографии // Материалы 6^й конференции «Математическое моделирование в экологии» ЭкоМатМод-2019. Пущино, 2019. С. 216–217.
- Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука; 1983. 197 с.
- Чистякова А.А., Заугольнова Л.Б., Полтинкина И.В., Кутьина И.С., Лашинский Н.Н.; под ред. О.В. Смирновой. Ч. 1. .: «Прометей» МГПИ им. В.И. Ленина. 1989. 102 с.
- Campus. URL: <http://www.ecomodelling.ru/models/campus> (дата обращения 09.07.2021).
- Evstigneev O.I. Ontogenetic scales of relation of trees to light (on the example of Eastern European forests) // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2018. V. 3. No. 3. P. 1–18.
- Frolov P., Shanin V., Zubkova E., Bykhovets S., Grabarnik P. CAMPUS-S – The model of ground layer vegetation populations in forest ecosystems and their contribution to the dynamics of carbon and nitrogen. I. Problem formulation and description of the model // Ecological Modelling. 2020. V. 431. Article 109184. P. 1–12.
- Hutchinson G.E. An introduction to population ecology. New Haven: Yale University Press.1978. 260 p.

ОЦЕНКИ ПОТОКОВ CO₂ НА ВЕРХОВОМ БОЛОТЕ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ПЛОЩАДЕЙ МИКРОФОРМ

Иванов Д.Г.¹, Котлов И.П.¹, Минаева Т.Ю.², Курбатова Ю.А.¹

¹*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия*
ivanovdg19@gmail.com
ikotlov@gmail.com

²*Филиал «Центра сохранения и восстановления болотных экосистем» Института лесоведения РАН, Москва, Россия*
tminayeva@ilan.ras.ru
kurbatova.j@gmail.com

Аннотация: Представлен анализ многолетних данных потоков CO₂, показателей уровня грунтовых вод и данных ортофотопланов, выполненный с целью отработки методики индикации динамики потоков CO₂ на основе структуры болотных микроформ и получения интегральных оценок потоков CO₂ для участка верхового болота и определения функциональной роли болота и отдельных его компонентов.

Экспериментальные исследования выполнены на верховом болоте Старосельский мох, расположенном на юго-востоке Валдайской возвышенности в границах охранной зоны ЦЛГПБЗ (56.47 N, 33.04 W). Согласно природному зонированию, объект исследований находится в подзоне южной тайги, тип болотного массива относится к восточно-европейским сфагновым верховым болотам, которые доминируют на значительной части ЕТР. Уровень болотных вод (УБВ) колеблется от 10 см выше поверхности до 60 см ниже поверхности.

В работе рассматривался только грядово-мочажинный комплекс (ГМК) площадью 0.57 км² (9% от общей площади болота), расположенный в юго-восточной части болота. Для интегральных оценок все типы микроформ ГМК были объединены в три класса. К классу «топи» относились озерки, периодически затопляемые мочажины и деградированные римпи. Класс «мочажины» включал необводненные мочажины и приподнятые мочажины. Класс «гряды» состоит из плоских гряд, высоких гряд и кочек.

Съемка грядово-мочажинного комплекса проводилась с помощью БПЛА DJI Mavic 2 Pro в июле 2019 г. и июне-сентябре 2020 г. Измерения эмиссии (R), депонирования (GPP) и баланса (NEE) CO₂ на основных типах микроформ проводились в центральной части грядово-мочажинного комплекса в течение 4-х летних сезонов (июнь-август) 2014-2017 гг. Данные уровня грунтовых вод были получены с автоматической микроклиматической станции в центре ГМК, измеряющей основные гидротермические параметры с частотой 0 мин. Методики съемки, классификации и измерений подробно описаны в (Ivanov et al., 2017, 2021).

Полуавтоматическая объектно-ориентированная классификация с обучением и дальнейшая фильтрация шумов показала общий уровень точности 85%. Наиболее успешно различимыми оказались микроформы обводненных топей (93%) как более контрастных по цвету, менее точной была классификация гряд (83%) и мочажин (79%), поскольку оба этих класса были относительно близки по цветовым характеристикам.

В ходе площадных оценок, было установлено, что большие различия в уровне болотных вод приводят к значительному разбросу в соотношении площадей мочажин и топей в течение лета. При этом площади гряд остаются практически постоянными, поскольку даже при обильных осадках вода не может затопить даже плоские гряды. В связи с этим для оценки динамики площадей микроформ была построена зависимость площадей топей от уровня грунтовых вод, как наиболее точно классифицируемого класса микроформ. Была выбрана экспоненциальная зависимость, поскольку затопление разных элементов топей (низкие мочажины, римпи, озерки и т.д.) происходит нелинейно и с различной скоростью. На основе полученного экспоненциального уравнения и данных УГВ с

микроклиматической станции были установлены среднемесячные площади топей. Площади класса мочажин были рассчитаны за вычетом площадей гряд и топей из площади ГМК.

Наименьшая доля топей (1-4%) отмечена в наиболее засушливые летние месяцы 2014 г. и в июле-августе 2015 г. В месяцы с обильным количеством осадков (июнь-июль 2017 г.) топи занимали до 15-17% общей площади ГМК. В свою очередь доля площадей мочажин составила от 54 до 69% при постоянной доли гряд в 29%. Это говорит о том, что площадь обводненных участков может различаться в 17 раз в течение сухих и влажных месяцев.

Интегральные (площадные) потоки CO_2 рассчитывались из произведения среднемесячных значений R , GPP и NEE и среднемесячных площадей микроформ. Практически во всех случаях (за исключением влажного 2017 г.) интегральные потоки R и NEE в мочажинах были на 30-70% выше, чем на грядах несмотря на то, что относительные потоки в мочажинах были значительно ниже. В 2017 г. потоки на грядах и мочажинах были практически равны в связи с высоким УБВ на мочажинах и снижением дыхательной активности растений и микроорганизмов. По сравнению с остальными классами микроформ, потоки CO_2 на топах были незначительными, что связано с полной обводненностью и анаэробными условиями, а также с практически полным отсутствием растительности на этих микроформах. В засушливые 2014 и 2015 гг. основной вклад в положительный экосистемный баланс внесли гряды, наибольший отрицательный баланс на мочажинах отмечен в 2016 г., а в 2017 г. отрицательный баланс на грядах и мочажинах был практически равным. Суммарный вклад топей в летний баланс оказался также незначительным, в 2014 и 2015 гг. NEE был около нуля, а в 2016 и 2017 гг. немного ниже нуля.

Суммарные потоки CO_2 с грядово-мочажинного комплекса во все летние период (Рисунок 1) в большинстве случаев были выше 1000 т, что говорит о болоте как об очень активном стоке и источнике CO_2 . Функциональная роль болота определялась прежде всего количеством осадков и температурными условиями летних сезонов. В сухие 2014 и 2015 г. ГМК был источником CO_2 и с учетом поглощения CO_2 в процессе фотосинтеза в атмосферу выделилось 130-185 т диоксида углерода соответственно. В достаточно и избыточно влажные 2016 и 2017 гг. ГМК был стоком углерода и с учетом автотрофного и гетеротрофного дыхания поглотил в 2016 г. 1260 т, а в 2017 г. – 1000 т CO_2 .

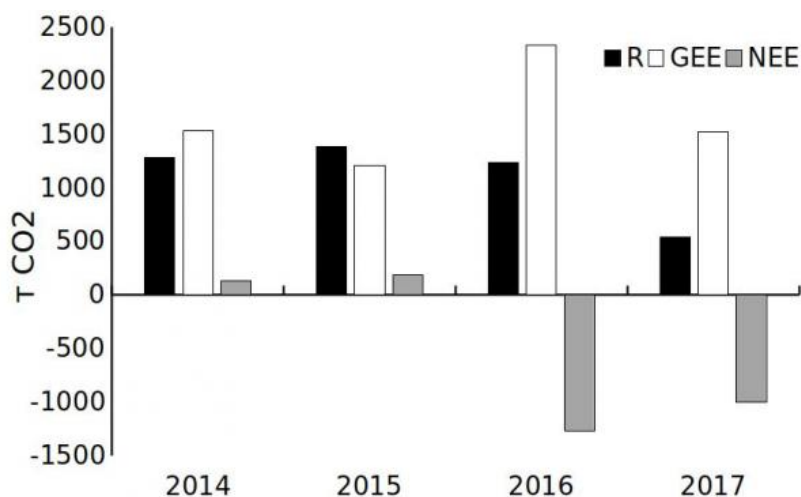


Рисунок 1 – Интегральные потоки CO_2 со всей площади ГМК за летние периоды

Результаты исследования подтвердили, что использование высокодетальных ортофотопланов, полученных с помощью БПЛА, позволяет с довольно высокой точностью выделить границы таких микроформ верхового болота как топи, мочажины и гряды, несмотря на наличие некоторых ошибок в классификации. Информация о площади

микроформ, в совокупности с данными экспериментальных наблюдений за потоками CO_2 на репрезентативных экспериментальных площадках позволяет подойти к оценке интегральных потоков CO_2 для болота в целом. Оценку интегрального потока следует проводить с учетом временной динамики структурно-функциональной организации болота, что требует одновременных наблюдений за сезонной и межгодовой изменчивостью соотношения между микроформами болота и потоками CO_2 .

Благодарность. Исследования выполнены при финансовой поддержке проектов РНФ №21-14-00209 и WWF №001539.

Литература

- Ivanov D., Avilov V., Kurbatova Y. CO_2 fluxes at south taiga bog in the European part of Russia in summer // Contemporary Problems of Ecology. 2017. V. 10. № 2. P. 97–104.
- Ivanov D., Kotlov I., Minayeva T., Kurbatova J. Estimation of carbon dioxide fluxes on a ridge-hollow bog complex using a high resolution orthophotoplan // Nature Conservation Research. 2021. V. 6. № 2. P. 16-28.

ФУНКЦИЯ ПОЛЕЗНОСТИ В ЗАДАЧЕ ФУРАЖИРОВАНИЯ С НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ

Кириллов А.Н.¹, Данилова И.В.²

¹Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия
krllv1812@yandex.ru

²Петрозаводский государственный университет, Институт математики и информационных технологий, Петрозаводск, Россия
danilovainna1987@mail.ru

Аннотация: рассматривается задача выбора популяцией наиболее пригодного участка, содержащего пищевые ресурсы. Вводятся функции полезности участков, зависящая от расстояния и времени. Рассматриваются свойства функции полезности и условия, влияющие на выбор популяцией. Построены области предпочтительной полезности участков, показано изменение этих областей с течением времени.

1. Введение

Для решения задачи оптимального выбора пригодного участка в работе (Matsumura et al., 2010) предложен подход, основанный на построенной функции полезности, которая учитывает затраты на перемещение к участку и меру информированности о его качестве. В работе (Кириллов, Данилова, 2018) на основе подхода (Matsumura et al., 2010) была предложена функция полезности, учитывающая перемещение популяции между участками. Также в работе (Кириллов, Данилова, 2018) были построены области предпочтительной полезности участков, т. е. области, находясь в которых, популяция с большей вероятностью выберет участок, находящийся в них. Вероятность выбора участка определяется распределением Больцмана (Matsumura et al., 2010).

В данной работе предлагается мера информированности, зависящая не только от изменяющегося расстояния до участка, но и от текущего времени. Показано влияние меры информированности на функцию полезности участков. Исследуются условия, влияющие на выбор популяцией участка и строятся области предпочтительной полезности. Изменение областей предпочтительной полезности с течением времени приводит к возможности попадания худшего участка в область предпочтительной полезности лучшего в некоторый момент времени t^* .

2. Влияние меры информированности на функцию полезности

Вводится функция полезности участка i в момент времени t для популяции, находящейся от него на расстоянии d_i :

$$U_i(d_i, t) = V_i I_i(d_i, t) + (1 - I_i(d_i, t)) \bar{V} - T_i(d_i), i = 1, \dots, m, \quad (1)$$

где $I_i(d_i, t) \in [0, 1]$ – мера информированности популяции об участке i , $\bar{V} = \gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2 + \dots + \gamma_m V_m$ – средняя полезность участков, $\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_m = 1$, $\gamma_i \geq 0$, $T_i(d_i)$ – функция затрат на перемещение к участку i . Участок считается «хорошим», если $V_i > \bar{V}$ и «плохим», если $V_i < \bar{V}$.

Зависимость функции полезности (1) от времени обусловлена накоплением популяцией информации о качестве участков с ростом t . Мера информированности $I_i(d_i, t)$ обладает следующими естественными свойствами:

1) популяция имеет полную информацию об участке, в котором находится: $I_i(0, t) = 1$ при любом $t \in R$;

2) чем дальше удалена популяция от участка i , тем меньшей информацией о величине V_i она обладает: $\frac{\partial I_i}{\partial d_i} < 0$, $\lim_{d_i \rightarrow \infty} I_i(d_i, t) = 0$;

3) с ростом времени t информированность популяции об участке i растет: $\frac{\partial I_i}{\partial t} > 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} I_i(d_i, t) = 1$.

Исходя из вышеперечисленных свойств меры информированности, показано, что функция полезности (1) обладает следующими свойствами:

1) с ростом времени t полезность «плохого» участка убывает, а полезность «хорошего» участка растет;

2) при увеличении расстояния d_i от популяции до «хорошего» участка i его полезность убывает;

3) при увеличении расстояния d_i от популяции до «хорошего» участка i его полезность либо убывает, либо возрастает.

Рассматривается случай двух участков A_1 и A_2 . Для функции полезности (1) участка i предложены функция затрат на перемещение к нему $T_i(d_i) = \alpha d_i^2$ и мера информированности о его качестве $I_i = e^{-\frac{\beta d_i^2}{t+C}}$, где α – коэффициент затрат, β – коэффициент «забывания» популяцией информации об участке (Кириллов, Данилова, 2018), C – параметр, определяющий меру информированности в момент времени $t = 0$, $\alpha, \beta, C > 0$.

Таким образом, функция полезности (1) для двух участков принимает вид:

$$U_i(d_i, t) = V_i e^{-\frac{\beta d_i^2}{t+C}} + (1 - e^{-\frac{\beta d_i^2}{t+C}}) \bar{V} - \alpha d_i^2, i = 1, 2. \quad (2)$$

3. Основные результаты

Исходя из свойств функции полезности (1), сформулированы и обобщены условия выбора популяцией участка. Введено понятие области предпочтительной полезности с учетом зависимости функции полезности (1) от времени t . На примере функции полезности (2) построены области предпочтительной полезности для двух участков A_1 и A_2 , показана кинематика этих областей. Сформулированы условия захвата «плохого» участка областью предпочтительной полезности «хорошего» участка.

4. Заключение

Предложенный подход позволяет описать условия выбора популяцией участка с учетом накопления информации о его качестве с течением времени

Литература

- Кириллов А.Н., Данилова И.В. Динамика распределения популяции по ареалам // Моделирование и анализ информационных систем. 2018. Т. 25. №. 3. С. 268 – 275.
- Cressman R., Krivan V. The Ideal Free Distribution as an Evolutionarily Stable State in Density-Dependent Population Games // Oikos. 2010. Vol. 119. P. 1231 – 1242.
- Ivanova A.S., Kirillov A.N. Equilibrium and Control in the Biocommunity Species Composition Preservation Problem // Automatic Remote Control. 2017, Vol. 78. № 8. P. 1500 – 1511.
- Matsumura S., Arlinghaus R., Dieckmann U. Foraging on spatially distributed resources with sub-optimal movement, imperfect information, and travelling costs: departures from the ideal free distribution // Oikos. 2010. V. 119. P. 1469 – 1483.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ, СОХРАНЯЮЩЕГО ВИДОВУЮ СТРУКТУРУ БИОСООБЩЕСТВА

Кириллов А.Н.¹, Иванова А.С.¹

¹ФГБУН Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра Российской академии наук, Петрозаводск, Россия

kirillov@krc.karelia.ru

a_s_ivanova@bk.ru

Аннотация: рассматривается модель биологического сообщества, состоящего из двух видов – хищников и жертв, причем жертвы не покидают участок, а хищники мигрируют с участка при недостаточном количестве пищи. Построено периодическое управление, заключающееся в чередовании изъятия особей с неизъятием, при котором сохраняется видовая структура биосообщества. Разработан численный метод для нахождения временных промежутков изъятия особей.

1. Введение

В работе рассматривается биологическое сообщество некоторого участка, состоящее из двух видов – хищников и жертв, причем популяция жертв не покидает участок, а популяция хищников мигрирует с участка в случае недостатка жертвы на данном участке. Решается задача сохранения видовой структуры биосообщества участка за счет изъятия особей. Построено периодическое управление, сохраняющее видовую структуру биосообщества. Предложен численный метод и создана программа, разработанные для нахождения временных промежутков, соответствующих изъятию особей.

2. Периодическое управление, сохраняющее видовую структуру биосообщества

В работе (Кириллов, 1999) критерием, по которому определяется присутствие или отсутствие хищников на участке, является значение функции времени, имеющей смысл пищевой привлекательности участка, которая определяется выражением вида

$$\tilde{n} = \tilde{n}(t) = \Lambda + \int_0^t x_2 \left(\frac{x_1}{x_2} - \lambda \right) dt, \quad (1)$$

где $t = 0$ – момент времени, в который популяция хищников находится на участке; $0 < \Lambda = \tilde{n}(0)$ – начальная пищевая привлекательность участка; $x_1 = x_1(t)$, $x_2 = x_2(t)$ – численности жертв и хищников на участке в момент времени $t \geq 0$ соответственно; $0 < \lambda$ – заданная пороговая постоянная, характеризующая минимальное количество жертв, необходимое организму хищника в единицу времени для поддержания всех жизненных функций. Предполагается, что при $t > 0$ хищники находятся на участке, если

$$\tilde{n}(t) > \Lambda; \quad (2)$$

находятся вне участка, если $\tilde{n}(t) < \Lambda$. При $\tilde{n}(t) = \Lambda$ поведение популяции определяется знаком производной $\dot{\tilde{n}} = x_1 - \lambda x_2$. Отметим, что в выражении для $\tilde{n}$ учтена идея Р. Ардити и Л. Гинзбурга (Arditi, Ginzburg, 1989, 2012) о важности рассмотрения величины отношения x_1/x_2 при описании динамики популяций и гипотеза о «стаде себялюбцев» (Hamilton, 1971), согласно которой все особи популяции появляются на участке и покидают его одновременно.

Продифференцировав 1 и предположив, что динамика популяций на участке описывается системой Лотки–Вольтерра с изъятием особей, получим

$$\dot{x}_1 = x_1(a - bx_2 - u_1), \quad \dot{x}_2 = x_2(kbx_1 - m - u_2), \quad \dot{n} = x_1 - \lambda x_2,$$

где a, b, k, m – положительные постоянные ($k < 1$); $0 \leq u_1, u_2$ – интенсивности изъятия особей жертв и хищников соответственно. Для положительного прироста популяций предполагается, что u_1, u_2 удовлетворяют ограничениям: $0 \leq u_1 < a$, $0 \leq u_2$.

Решается задача нахождения кусочно-постоянных функций $u_1(t), u_2(t)$, при которых выполняется условие 2 при любом $t > 0$, другими словами, обеспечивающих сохранение видового состава биосообщества.

В работе (Кириллов, Иванова, 2015) для начальной точки $M_0(x_{10}, x_{20}, \Lambda) \in \Pi = \{(x_1, x_2, \Lambda): x_1 - \lambda x_2 > 0, x_1 \geq \frac{m}{bk}, \varepsilon \leq x_2 \leq a/b\}$, где $\varepsilon > 0$, построено периодическое управление с периодом $\mathcal{T}$, сохраняющее видовую структуру биосообщества и представляющее собой чередование изъятия особей с неизъятием. Причем $\mathcal{T}$ вычисляется по формуле

$$\mathcal{T} = (N + 1)T(M_0) + D,$$

где $D = \frac{(N+1)|\Delta|}{x_{10} - \lambda x_{20}}$, $N = \left[(H + \int_{\tau}^{\tau+t_2} (x_1 - \lambda x_2) dt) / |\Delta| \right]$, $[\cdot]$ – символ целой части числа, $H = (x_{10} - \lambda x_{20})\tau$, $0 < \tau$ – длина начального временного промежутка изъятия особей, $t_2 = \max F - \tau$, $F = \{t: t \in [\tau, \tau + T(M_0)), x_1(t) - \lambda x_2(t) = 0\}$, $T(M_0)$ – период решения системы Лотки–Вольтерра $(x_1(t), x_2(t))$ при $u_1 = u_2 = 0$, причем $(x_1(0), x_2(0)) = (x_{10}, x_{20})$, $\Delta = a/bT(M_0) \left(\frac{m}{ak} - \lambda \right)$.

Для реализации построенного периодического управления возникает необходимость разработки численного метода нахождения $T(M_0)$ и интеграла $\int_{\tau}^{\tau+t_2} (x_1 - \lambda x_2) dt$. В работе С.-Д. Ши (Shih, 1997) приводятся пять методов вычисления $T(M_0)$, в частности метод В. Вольтерра, в котором $T(M_0)$ вычисляется как сумма четырех абсолютно сходящихся несобственных интегралов, при вычислении которых возникают дополнительные трудности. В настоящей работе предложена модификация метода В. Вольтерра, а именно: $T(M_0)$ ищется как сумма четырех собственных интегралов, причем для вычисления интегралов предлагается оригинальный численный метод, который может быть использован при вычислении интеграла $\int_{\tau}^{\tau+t_2} (x_1 - \lambda x_2) dt$. Создана программа, предназначенная для численной реализации построенного периодического управления. Другими словами, программа позволяет находить временные промежутки, соответствующие изъятию особей.

Литература

- Кириллов А.Н. Экологические системы с переменной размерностью // Обозрение прикладной и промышленной математики. 1999. Т. 6. № 2. С. 318-336.
- Кириллов А.Н., Иванова А.С. Периодический и квазипериодический процессы управления в задаче сохранения видового состава биосообщества // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 10. С. 99-106.
- Arditi R., Ginzburg L. Coupling in predator-prey dynamics: ratio-dependence. – Journal of Theoretical Biology. 1989. V. 139, pp. 311–326.
- Arditi R., Ginzburg L. How Species Interact: Altering the Standard View on Trophic Ecology. N.Y.: Oxford Univ. Press. 2012, 170 p.

Hamilton W.D. Geometry for the selfish herd. – Journal of the Theoretical Biology. 1971. V.31, pp. 295–311.

Shih S.-D. The period of a Lotka-Volterra system. – Taiwanese journal of mathematics. 1997. V. 1, no. 4, pp. 451–70.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ НА СТРУКТУРНОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ: РЕЗУЛЬТАТЫ СЦЕНАРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Киселева В.В.¹, Чумаченко С.И.¹, Колычева А.А.²

¹*Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Мытищи, Россия*

vvkisel@mail.ru

chumachenko.s.i@gmail.com

²*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия*

anna_dulina@bk.ru

Аннотация: рассматриваются результаты сценарного моделирования многолетней динамики показателей пространственной и возрастной структуры таежных лесов с использованием имитационной модели FORRUS-S. Каждый сценарий лесопользования (экстенсивное, интенсивное, выборочные рубки, заповедный режим) оказывает положительное влияние на одни показатели и отрицательное – на другие. Показатели структурного разнообразия не могут применяться формально и должны использоваться только в комплексе.

1. Введение

Биологическое разнообразие рассматривается как условие для выполнения лесом экосистемных функций (Byrnes et al., 2014). С поддержанием уровня биологического разнообразия при хозяйственной деятельности связан ряд критериев системы лесной сертификации (Национальный стандарт..., 2020). В связи с этим показатели биоразнообразия рассматриваются отдельным блоком при долгосрочном сценарном моделировании состояния лесов и режимов лесопользования на уровне участковых лесничеств.

2. Объекты и методы исследований

Моделирование проводилось с применением имитационной модели FORRUS-S (Чумаченко, Смирнова, 2009) для нескольких участковых лесничеств востока Ленинградской области. Срок моделирования составил 120 лет, шаг моделирования – 5 лет.

На основании данных таксационных описаний модель рассчитывает ряд первичных показателей для каждого выдела: число видов деревьев, число поколений каждого вида, диаметр, высоту и запас каждого элемента леса и др. На их основе описывается вертикальная структура выдела и возрастная структура ценопопуляций лесобразующих пород. Для лесного участка моделируется динамика комплексных структурных показателей:

1. Показатели видового разнообразия: соотношения площадей моно-, олиго- и полидоминантных лесов; соотношения площадей видов с разной популяционной стратегией.

2. Показатели пространственной структуры: доля одноярусных и многоярусных насаждений; доля открытых, полуоткрытых (низкополнотных) и закрытых (средне- и высокополнотных) ландшафтов.

3. Показатели возрастной структуры популяций преобладающих древесных пород: площади, занятых породой на разных возрастных стадиях, и их соотношения.

Рассматривались 11 сценариев хозяйственной деятельности, отличающихся процентом использования расчетной лесосеки, долей искусственного лесовосстановления и режимом ухода за создаваемыми насаждениями. Для защитных лесов просчитывалась возможность проведения выборочных рубок. В качестве эталона был взят сценарий естественного развития насаждений (заповедный режим).

3. Результаты и обсуждение

Моделирование естественного развития показало, что закономерно происходит усложнение вертикальной структуры лесного сообщества. Сокращаются площади как моно-,

так и полидоминантных сообществ с формированием характерных для средней тайги олигодоминантных лесов. Площадь, занятая конкурентными видами, представленными исключительно елью, в первые 40 лет увеличивается, после чего выходит на плато; ель занимает все пригодные местообитания. Происходит старение популяций, а к концу срока моделирования – сокращение площадей старовозрастных хвойных лесов; следовательно, заповедный режим не способствует в длительной перспективе сохранению этих ключевых местообитаний.

Экстенсивное лесопользование (рубки без искусственного лесовосстановления или с таковым, но без ухода за культурами) оказывает наибольшее отрицательное влияние на сукцессионный статус лесного массива, постоянно «отбрасывая» экосистемы на более ранние стадии сукцессий, и дает максимальные площади невозобновившихся лесосек (открытых пространств).

Интенсивное лесопользование (подразумевает искусственное лесовосстановление и рубки ухода) закономерно приводит к широкому распространению лесных монокультур с примитивной вертикальной структурой, однако, оно позволяет сформировать близкий к полночленному возрастной спектр популяции сосны. Старовозрастные хвойные леса при этом сохраняются только на участках защитных лесов. Создание больших площадей лесных культур или формально позволяет поддерживать стабильное соотношение между пионерными и позднесукцессионными видами, но такие «квази-позднесукцессионные» ельники, сформированные в отсутствие ранних стадий, не обладают свойствами настоящих позднесукцессионных сообществ.

При выборочных рубках, которые пропагандируются как инструмент устойчивого лесопользования, увеличивается доля полидоминантных насаждений, но снижаются, по сравнению с естественной динамикой, площади видов-конкурентов. Растет доля одноярусных насаждений, хотя снижение полноты должно способствовать развитию нижних ярусов. Выборочные рубки резко сокращают площади с преобладанием сосны: они накладываются на естественный распад участков, не затронутых вырубкой, и не компенсируются ни созданием культур, ни подселением подроста в образующиеся окна.

Изменение пространственной и возрастной структуры через условия освещенности влияет на состав и обилие видов, представляющих ценность в качестве пищевых ресурсов. Для них оптимальной оказывается интенсивная модель ведения хозяйства.

4. Заключение

Комплексные структурные показатели биологического разнообразия чувствительны к изменению режимов лесопользования. Каждый из сценариев лесопользования оказывает положительное влияние на одни показатели и отрицательное – на другие. Показатели структурного разнообразия не могут применяться формально и по отдельности во избежание их неверной трактовки.

Выборочная форма хозяйства в том виде, как она была представлена в модели, не оправдывает ожиданий по поддержанию структурного разнообразия. Заповедный режим в длительной перспективе не обеспечивает сохранение старовозрастных лесов.

Критерием экологической устойчивости будет отказ от сценариев, которые приведут к ухудшению большинства показателей структурного разнообразия или катастрофическому снижению хотя бы одного из них.

Благодарности

Авторы выражают благодарность компании ИКЕА за предоставление фактических материалов и финансовую поддержку исследований.

Литература

Национальный стандарт FSC для Российской Федерации [электронный ресурс]. Режим доступа
<https://ru.fsc.org/preview.fsc-std-rus-02-2019-ru.a-3636.pdf>.

Чумаченко С.И., Смирнова О.В. Моделирование сукцессионной динамики насаждений // Лесоведение. 2009. № 6. С. 3-17.

Byrnes J.E.K., Gamfeldt L., Isbell F., Lefcheck J.S., Griffin J.N., Hector A., Cardinale B.J., Hooper D.U., Dee L.E., Emmett Duffy J. Investigating the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality: challenges and solutions // Methods in Ecology and Evolution. 2014. Vol. 5. No. 2. Pp. 111–124.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ЛЕСНЫХ ЯГОД С УЧЕТОМ ОСВЕЩЕННОСТИ НА УРОВНЕ НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Колычева А.А.^{1,2}, Чумаченко С.И.^{1,2}, Киселева В.В.², Агольцов А.Ю.², Карминов В.Н.^{1,2},
Митрофанов Е.М.²

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

²*Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищи, Россия*

anna_dulina@bk.ru

chumachenko.s.i@gmail.com

vvkisel@mail.ru

alex.ago@mail.ru

ynk57@yandex.ru

seferok@mail.ru

Аннотация: В работе представлен подход учета урожайности черники, брусники, малины методами имитационного моделирования динамики лесного фитоценоза. С его применением возможен расчет продуктивности ягод в сложных и смешанных насаждениях, а так же с наличием подроста и подлеска. Главной особенностью подхода является использование лимитирующего фактора продуктивности лесных ягод – освещенности на уровне напочвенного покрова.

В настоящее время на территории России учет ягодников при таксации не проводится на должном уровне, поэтому вопрос определения потенциальных запасов лесных ягод остается открытым. Для простых чистопородных насаждений подходят существующие методики с применением «Таксационного справочника по лесным ресурсам России (за исключением древесины)» (Курлович, 2018), а для насаждений со сложным составом и наличием подроста и подлеска такой подход не применим. Ошибка в расчетах происходит из-за некорректности использования в качестве лимитирующего фактора полноты древостоя. Так как при одинаковой полноте в простом чистопородном насаждении и насаждении с несколькими ярусами и подростом подлеском до напочвенного покрова доходит разное количество света, определяющего характер плодоношения ягодников (Дулина, Чумаченко, 2018).

Исходя из специфичности роста и развития лесных фитоценозов, проведение долгосрочных экспериментов трудоемко и высокочатно. Использование математического моделирования позволяет с наименьшими затратами проследить ход роста всей лесной растительности и рассмотреть влияние различных типов естественного и экзогенного развития.

Цель исследования – сформировать подход расчета урожайности лесных ягод с использованием лимитирующего фактора продуктивности – освещенности на уровне напочвенного покрова, используя методы имитационного моделирования.

Работа выполнена на базе модели хода роста насаждений FORRUS-S. Входными данными работы модели являются стандартные таксационные описания, так же дополнительные справочные базы для основных лесообразующих пород деревьев: биометрические характеристики кроны, требовательность к свету, просветы в пологе, коэффициент пропускания света кроной, расстояние разноса семян, порослевая способность, возрастные коэффициенты определяющие онтогенетическое состояние, таблицы хода роста одновидовых насаждений, потенциальные бонитеты (Чумаченко, 2007). Проводится долгосрочный прогноз, на период 100 лет с шагом моделирования – 5 лет.

Для работы выбраны наиболее широко распространенные на территории России лесные ягоды: черника, брусника, малина. Проанализированы факторы, оказывающие влияние на рост и развитие кустарничков и полукустарничков. Выявлены предикторы, которые определяют возможность произрастания ягодников: лесорастительная зона, ТЛУ, древесная порода и возраст. Установлено, что на продуктивность прямое влияние оказывает освещенность на уровне напочвенного покрова (Малиновских, 2016,2017).

В модели FORRUS-S выполнен расчет освещенности на уровне напочвенного покрова с использованием коэффициентов пропускания света. Было выполнено сопоставление значений полноты и освещенности для чистопородных насаждений. Установлено, что в зависимости от породы при идентичных полнотах количество света на уровне напочвенного покрова различны, наименьшие значения у ели, наибольшие у осины и березы. Таким образом, для каждой породы можно заменить значения полноты на освещенность.

По имеющимся справочным значениям (Курлович, 2018) были зафиксированы урожайности ягодников для различных чистопородных древостоев, в зависимости от освещенности. После расстановки точек (рисунок 1) обнаружены зависимости, позволяющие исходя из экологических характеристик произрастания ягодников сформировать графики зависимости их продуктивности от освещенности.

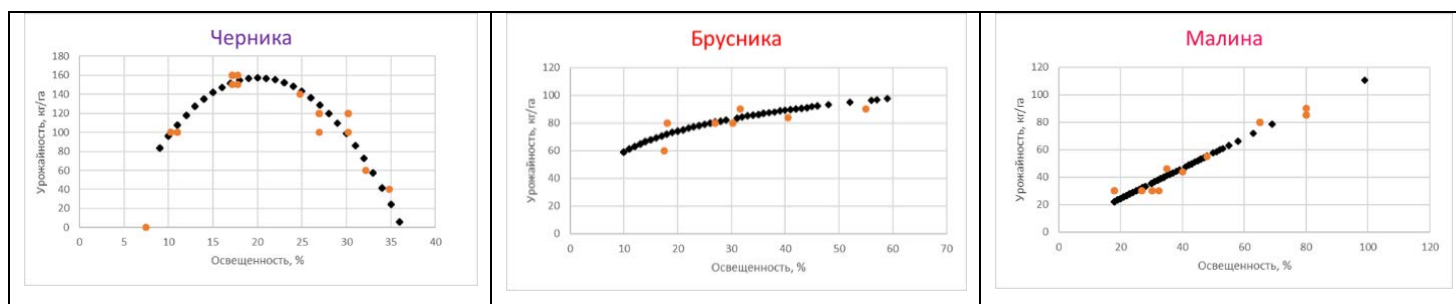


Рисунок 1 – Графики зависимости урожайности от освещенности для лесных ягод:
оранжевые точки – справочные значения урожайности, черные – результаты аппроксимации

Выведенные зависимости, имеют высокие R^2 от 0,7259 до 0,9563, что показывает сильную связь между значениями урожайности и освещенности. Условиями для их применения является комплекс характеристик: тип лесорастительных условий; порода; коэффициент состава более 4; максимальный и минимальный возрасты; при которых уравнения могут работать; максимальная и минимальная освещенности, при которых работа уравнений не противоречит экологическим лимитам произрастания ягодников. Учитывая эту совокупность факторов, появляется возможность спрогнозировать урожайность ягодников при любом значении освещенности.

Для смешанных древостоев сложного состава определен подход, учитывающий каждую породу на выделе. Сначала выполняется расчет продуктивности ягод для первой породы на выделе, затем для второй и так далее. Затем исходя из площади занимаемой каждой породой, высчитывается урожай ягодников, произрастающий под ней. Так же учитывается влияние подроста и подлеска, так как учет освещенности осуществляется с использованием коэффициентов пропускания света всех элементов лесного фитоценоза.

Таким образом, представленный подход, основанный на использовании модели FORRUS-S, позволяет рассчитывать потенциал урожайности лесных ягодников для смешанных древостоев и древостоев сложного состава, занимающих большую часть территории европейской части России.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы госзадания ЦЭПЛ РАН «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем» (номер государственной регистрации AAAA-A18-118052400130-7).

Литература

Курлович Л.Е. Таксационный справочник по лесным ресурсам России (за исключением древесины) / Л. Е. Курлович, В. Н. Косицын. Пушкино: ВНИИЛМ, 2018. 281 с.

- Дулина А.А. Обзор моделей оценки пищевых ресурсов лесов центральной части России / А.А. Дулина, С.И. Чумаченко // Вопросы лесной науки. 2018. № 1. С. 1-22.
- Чумаченко С.И. Имитационное моделирование динамики насаждений FORRUS-S - инструмент выбора стратегии и планирования лесного хозяйства / С.И. Чумаченко, М.М. Паленова, С.В. Починков, Е.В. Кухаркина // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2007. № 5. С. 143-152.
- Малиновских А.А. Влияние уровня освещенности под пологом леса на урожайность брусники в условиях Средне-обского бора Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. Т. 4 № 138. С. 105-109.
- Малиновских А.А. Влияние уровня освещенности под пологом леса на урожайность черники в условиях Средне-обского бора Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. Т. 6 № 152. С. 87-92.

ВСЕГДА ЛИ ИСКУССТВЕННОЕ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЕ МОЖЕТ БЫТЬ ЛЕСОКЛИМАТИЧЕСКИМ ПРОЕКТОМ?

Коротков В.Н.¹, Шанин В.Н.², Фролов П.В.²

¹Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля, Москва, Россия

korotkovv@list.ru

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

shaninvn@gmail.com

ximikadze@gmail.com

Аннотация: Проведена оценка баланса CO₂ на территории проектов искусственного лесовосстановления с прогнозом на 50 лет для двух сценариев: при отсутствии проекта (базовая линия – естественное возобновление березы повислой и осины) и при их реализации (создание культур сосны обыкновенной). Полученные прогнозы на территории проектов по лесовосстановлению в Красноярском крае и Иркутской области показывают, что достигнутый уровень выбросов больше, а уровень поглощения – меньше при реализации проекта по сравнению с базовой линией. С точки зрения поглощения CO₂ создание лесных культур сосны менее эффективно по сравнению с естественным возобновлением. В рассмотренном случае искусственное лесовосстановление не может считаться лесоклиматическим проектом.

В настоящее время большую популярность приобретают лесоклиматические проекты, направленные на усиление углероддепонирующей функции лесных экосистем. К числу основных требований к таким проектам относятся рассмотрение базовой линии и принципа дополнительности. Базовая линия определяется на основе сценария выбросов/поглощения парниковых газов, отражающих их динамику при отсутствии проекта. Принцип дополнительности предполагает обоснование мер дополнительного воздействия, направленного на увеличение поглощения парниковых газов при реализации проекта. Единицы сокращения выбросов в результате выполнения проекта рассчитываются как разница между результатами проектной деятельности и базовым сценарием.

Объектами исследования послужили лесные культуры сосны *Pinus sylvestris* (плотность посадки – около 4 тысяч сеянцев на 1 га), заложенные на участках гарей (Красноярский край, Дзержинское лесничество – площадь 120 га, 2019 г.; Иркутская область, Кировское лесничество – площадь 125 га, 2019 г.; Иркутская область, Гороховское лесничество – площадь 28 га, 2020 г.), а также прилегающие участки с естественным возобновлением березы (*Betula pendula*) и осины (*Populus tremula*). Посадки сеянцев проведены под меч Колесова по предварительно нарезанным бороздам, размещенными равномерно через 4 м, шаг посадки – 0,6 м. Все участки лесных культур относятся к Среднесибирскому подтаежно-лесостепному району лесостепной зоны. В качестве исходных данных для расчетов послужила информация из проектов искусственного лесовосстановления на каждый участок, предоставленная органами управления лесным хозяйством Красноярского края и Иркутской области. Дополнительно в мае 2020 г. были проведены полевые работы по выборочной оценке состояния лесных культур и естественного возобновления. Дополнительно были получены данные об объемах сжигаемого ископаемого топлива и технике, применяемой при подготовке участков, а также о потенциальных бонитетах и составе лесных культур.

В качестве основы для оценки изменения запасов углерода в фитомассе были использованы таблицы биологической продуктивности (Швиденко и др., 2008) с поправкой на потенциальный бонитет и полноту насаждений. Для прогнозных оценок использовалась комбинация модели динамики органического вещества почвы Romul_Hum [Komarov et al., 2017; Chertov et al., 2017] и модели почвенного климата SCLISS [Быховец и др., 2002]. Проведена настройка математических моделей для оценки количества углерода,

аккумулируемого различными пулами (фитомасса, подстилка, дубрис, органическое вещество почвы) искусственных насаждений сосны и мелколиственных насаждений естественного происхождения. Исходный сценарий метеоусловий был получен на основе данных с географически ближайших метеостанций, полученных во ВНИИ гидрометеорологической информации – Мировом центре данных (ВНИИГМИ-МЦД) Росгидромета. Выбросы парниковых газов от работающей техники были рассчитаны с использованием методики МГЭИК.

Проведена оценка баланса углерода на территории проектов лесовосстановления при отсутствии проекта (базовая линия – естественное возобновление березы повислой и осины) и при их реализации (создание культур сосны обыкновенной) с прогнозом на 50 лет (рисунок). Полученные прогнозы на территории проектов по лесовосстановлению в Красноярском крае и Иркутской области показывают, что достигнутый уровень выбросов больше, а уровень поглощения – меньше при реализации проекта по сравнению с базовой линией. С точки зрения поглощения CO_2 в полученном горизонте прогнозирования (50 лет) создание лесных культур сосны менее эффективно по сравнению с естественным возобновлением, однако осуществление проектов по искусственному лесовосстановлению может иметь существенное значение для воспроизводства ценных лесных ресурсов.

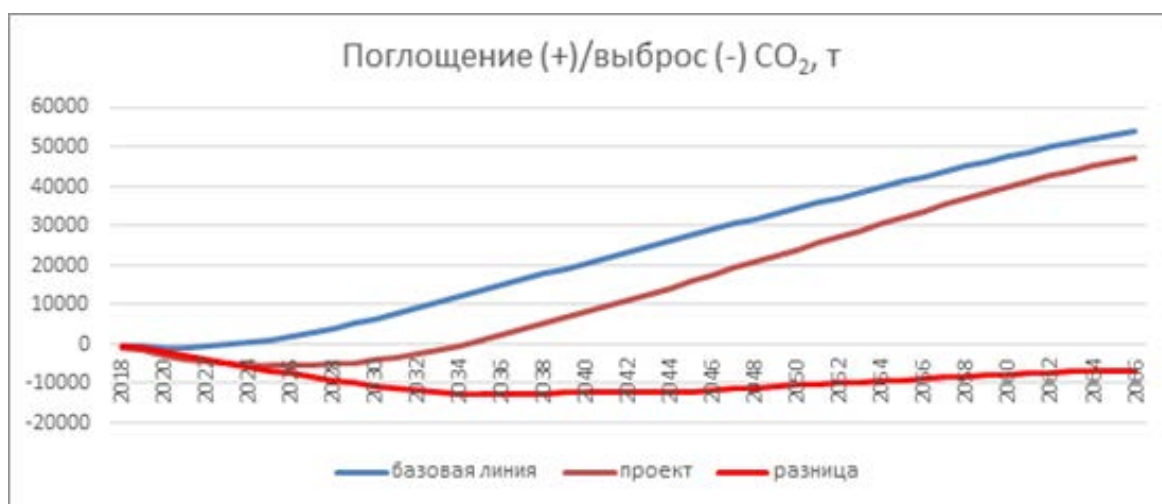


Рисунок – Прогноз суммарного нетто-поглощения диоксида углерода на территории проектов (суммарная площадь 273 га) по лесовосстановлению в Красноярском крае и Иркутской области в результате проектной деятельности, отсутствия проекта (базовая линия), величины антропогенного суммарного нетто-выброса CO_2 по разнице достигнутого уровня поглощения и базового уровня

Литература

- Быховец С.С., Комаров А.С. Простой статистический имитатор климата почвы с месячным шагом // Почвоведение. 2002. Т. 4. С. 443–452.
- Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). Издание 2-е, доп. М: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2008. 886 с.
- Chertov O., Komarov C. Shaw A., et al. Romul_Hum – A model of soil organic matter formation coupling with soil biota activity. II. Parameterisation of the soil food web biota activity // Ecological Modelling. 2017. Vol. 345. P. 125–139.
- Komarov A., Chertov O., Bykhovets S., et al. Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing // Ecological Modelling. 2017. Vol. 345. P. 113–124.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРНОГО СУСЛИКА *SPERMOPHILUS MUSICUS* И ЕГО ВЗАИМОСВЯЗЬ С ФАКТОРАМИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Котенев Е.С.¹, Сердюков В.В.¹, Кот Л.А.¹, Сердюкова Д.В.¹, Чишенюк Т.И.¹, Шкарлет Г.П.¹, Пшихачев Н.Х.²

¹ФКУЗ Ставропольский научно-исследовательский противочумный институт

Роспотребнадзора, Ставрополь, Россия

egor_kotenev@mail.ru

serdiukov.vl93@gmail.com

kotmil@yandex.ru

hikago123456@gmail.com

tatiana.chishenuk@mail.ru

gpshkarlet@mail.ru

²Кабардино-Балкарская противочумная станция, Нальчик, Россия

kbpchs07@mail.ru

Аннотация: горный суслик - *Spermophilus musicus*, является основным носителем чумы в Центрально-Кавказском высокогорном природном очаге. На основе моделирования экологической ниши, выполненного в программе MaxEnt, проведена оценка пространственного распространения вида и зона потенциального риска распространения чумы, в случае возникновения эпизоотии.

1. Введение

Ареал горного суслика *Spermophilus musicus* (Menetries, 1832) простирается от верховья р. Кубань до р. Черек-Безенгийский. При картографировании, проведенном в 1973–1976 гг., выявлено 234 поселения этого вида общей площадью около 97.5 тыс. га. Площадь ареала суслика по крайним поселениям составляет более 331.1 тыс. га, в пределах высот 1150–3200 м н.у.м. (Григорьев, 1998). Глобальные климатические изменения оказывают значительное влияние на наземные экосистемы. Изменение структуры растительных сообществ влияет на численность и пространственное распределение травоядных грызунов. Изменение продуктивности растительных сообществ, климатические изменения, а также антропогенная нагрузка могут оказывать влияние на пространственное распределение и численность горного суслика, являющегося основным носителем чумы в Центрально-Кавказском высокогорном природном очаге. В связи с этим мониторинг и моделирование изменения ареала данного вида, представляет собой актуальную задачу.

2. Материалы и методы

В качестве исходных данных для построения модели использовались результаты эпизоотологического мониторинга популяции горного суслика (точки присутствия вида), в период с 2016 по 2020 годы и данные об окружающей среде. В качестве климатических данных был использован набор из 19 биоклиматических переменных Worldclim с <http://www.worldclim.org>, с пространственным разрешением ~ 1 км². Анализ точечных данных и биоклиматических переменных был выполнен в программном обеспечении MaxEnt v 3.4.4. (Phillips et al., 2017). Вклад каждой переменной в модель распространения оценивался тремя способами – путем прямой оценки вклада в процентном отношении, оценки после пермутации, и с использованием метода jackknife. Для обучения модели использовались 75% случайно выбранных точек, а 25% данных использовались для ее тестирования. Сравнение и проверку результатов модели осуществляли с использованием статистических параметров ROC (AUC).

3. Результаты

Для создания модели пространственного распространения использовался исходный набор данных, состоявший из 204 точек присутствия. Полученные в результате данные, отражающие пригодность различных областей для обитания горного суслика, представлены на Рисунке. Области наиболее благоприятные для распространения вида располагаются в пределах трех высотных поясов, горно-степного, субальпийского и альпийского.

Прямая оценка вклада переменных среды в модель MaxEnt, в процентном отношении, показала, что наибольшее значение для модели предполагаемого распространения горного суслика имеют следующие значения: BIO18 (Осадки самого теплого квартала) – 46,3 %, BIO15 (Сезонность осадков (коэффициент вариации)) – 19,0 %, BIO1 (Среднегодовая температура) – 18,4%, BIO16 (Осадки в самом влажном квартале) – 3,9% и BIO7 (Годовой диапазон температур (BIO5-BIO6)) – 3,1%. Оценка переменных после пермутации, показала изменение роль переменных BIO16 – 9,4% и BIO7 – 5,5%, которые вышли на второе и третье место, соответственно. При оценке методом jackknife вклада переменных в окончательную модель, установлено, что переменная BIO5 (Максимальная температура самого теплого месяца), показывает наибольшее усиление модели при использовании изолировано, а BIO18 больше всего снижает качество модели при ее отсутствии.

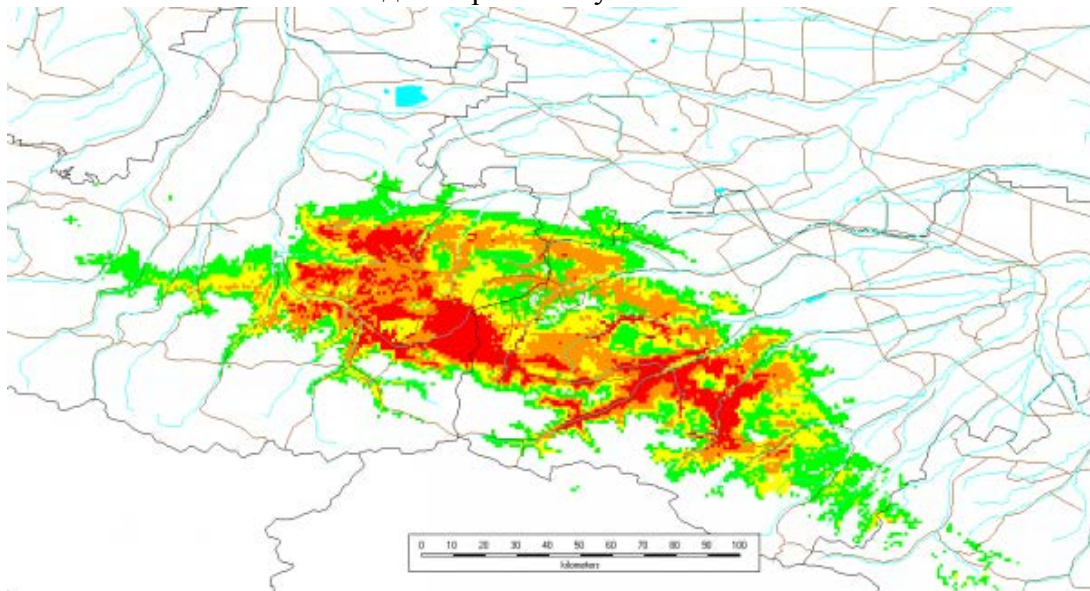


Рисунок - Пространственное распространение *S. musicus* на территории Центрально-Кавказского высокогорного природного очага чумы, смоделированное при помощи программы MaxEnt. Область красного цвета (0,709-1,000), представляет зону наиболее пригодную для обитания *S. musicus*, зеленого цвета (0,199-0,398) наименее пригодную.

4. Обсуждение

Для определения экологической ниши горного суслика одно из решающих значений имеют климатические факторы. Моделирование потенциального ареала вида с использованием программного обеспечения MaxEnt, позволило определить пространственную структуру его ареала и потенциальные зоны риска, связанные с возможностью распространения возбудителя чумы, основным носителем которого является горный суслик.

Литература

- Григорьев М.П. Анализ популяционной структуры носителей в Центрально-Кавказском природном очаге чумы: Дис. ... канд. биол. наук. Ставрополь: Ставропольский н.-и. противочумный институт, 1998. 124 с.
- Phillips S.J., Anderson R.P., Dudik M. Opening the black box: an open-source release of Maxent // *Ecography*. 2017. 40(7):887–893.

ВЫЯВЛЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ СОСТОЯНИЙ АГРОЛАНДШАФТОВ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ДИСТАНЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Кренке А.Н.¹

¹*Институт географии РАН, Москва, Россия*

krenke-igras@yandex.ru

Аннотация: Предлагаемая работа показывает возможности анализа временных рядов мультиспектральных космических снимков среднего разрешения для выявления инвариантных пространственных структур в условиях сильного антропогенного воздействия. На примере многолетних рядов данных LANDSAT показана процедура выделения пространственных инвариант. Процедура основана на применении метода иерархического факторного анализа многомерного пространства исходных переменных и сегментации полученного факторного пространства на дискретные состояния. Так как каждое мультиспектральное изображение – срез состояния ландшафтного покрова и его способности преобразовывать солнечную энергию, то у каждого такого среза должен быть собственный набор пространственных инвариант, описывающих большую часть информации о работе поверхности. В данной статье с помощью этого подхода исследуются агроландшафты Джизакской области Узбекистана. Демонстрируется высокая повторяемость дискретных пространственных инвариант в пространстве интегральных факторов для временных рядов, разделенных во времени на 20 лет. Независимо проведенные полевые исследования позволяют утверждать, что выделенные стационарные состояния могут быть соотнесены с типами почв.

Проблема организации сложных пространственно-временных географических динамических систем является одной из ключевых проблем современной географии. Выделению устойчивых соотношений между множеством наблюдаемых свойств с использованием дистанционной информации, в том числе и для агроландшафтов, посвящено множество работ (Yufeng et al., 2011; Stasyuk et al., 2017; Nawar et al., 2015; Пузаченко и др., 2003). Мультиспектральная дистанционная информация представляет собой уникальный для современной географии инструмент, позволяющий с использованием временных рядов проследить пространственно-временную динамику отражательной способности поверхности. Исходя из представления о географическом пространстве как открытой термодинамической диссипативной неравновесной системе (Jorgensen, Svirezhev, 2004; Пузаченко и др., 2019), можно рассматривать отражательную способность поверхности как проявление основных биофизических параметров, выраженных в преобразовании солнечной энергии. Возможность одновременно наблюдать изменение характеристик поверхности как во времени, так и в пространстве за счет использования дистанционной информации позволяет рассматривать ее как основу статистического моделирования широкого спектра биосферных процессов (Кренке и др., 2011; Пузаченко и др., 2006). Анализ длительных временных рядов мультиспектральных данных позволяет описать состояние и поведение экосистемы по времени. Интерпретация этих данных дает возможность определить строение экосистемы, оценить ее функциональные характеристики, в конечном счете – описать ее структуру и свойства.

В данной работе демонстрируется подход решения такой задачи для сельскохозяйственных земель, т. е. территорий, существенно преобразованных человеком. Основным условием решения такой задачи является разделение «динамических» и «стационарных» компонент организации ландшафтного покрова. К динамическим компонентам можно отнести человеческую деятельность, результаты погодной изменчивости и т. п., тогда как стационарные компоненты отражают генетические свойства ландшафта. Основным затруднением в выделении стационарных структур агроландшафтов, обладающих устойчивой во времени совокупностью свойств, с помощью данных дистанционного зондирования является высокая изменчивость их отражательной способности. Можно сказать, что временные серии данных дистанционного зондирования и

любых производных можно рассматривать как отображение динамической системы ландшафта. Множество зафиксированных состояний отражают преобразование свойств ландшафта как в пространстве, так и во времени. С другой стороны, на достаточно большом наборе наблюдений и интервале времени можно проследить часть неизменной информации – инвариантную ко времени составляющую, отражающую устойчивые пространственные структуры.

Задача выделения стационарных компонент в подобных наборах данных может быть решена поэтапным применением процедур сокращения размерности или иерархического факторного анализа. Суть такого подхода – в поэтапном обобщении факторного пространства: от факторов, описывающих отдельную сцену, к факторам, описывающим совокупность сцен за исследуемый период. Данная процедура позволяет в том числе осуществлять прямые сравнения различных видов спутниковых данных, например данных LANDSAT 5 и LANDSAT 8. Таким образом, открывается возможность детального анализа изменений ландшафтного покрова на всю глубину архивных данных мультиспектральной съемки. В результате проведенного таким образом факторного анализа исходный набор переменных заменяется другим, меньшим набором переменных, в максимальной степени описывающим (интегрирующим) исходные. В рамках факторного анализа на основе регрессионных (факторных) коэффициентов для каждой точки территории рассчитываются значения факторов, признанных интегральными для групп свойств. Далее проводится интеграция факторов, описывающих отдельные сроки съемки в обобщающие факторы, и повторяется процедура отбора наиболее значащих из них: из этих факторов отбираются те, которые имеют высокую степень связи с каждым сроком наблюдения. Как правило, первые два фактора для всех периодов показывают высокую степень связанности со всеми соответствующими сроками. Таким образом, получается набор переменных, описывающий стационарные характеристики земель за конкретный период (как правило, трех-четырёхлетний диапазон). Этот набор переменных рассматривается как инвариантный для данной территории. Другая группа значимых факторов – динамическая, это такие факторы, которые также содержат значительную информацию, но при этом имеют неравномерную систему коэффициентов, связывающих их с исходными данными. Такие факторы описывают изменчивость состояний рассматриваемой территории за взятый период наблюдений.

Согласно методике для территории Джизакской области Узбекистана, были рассчитаны интегральные факторы для двух периодов: современный (2018–2020 гг.) и ретроспективный (1990–2000 гг.). Агроэкологические разности были получены на основе классификации интегральных факторов «современного» периода для нескольких иерархических уровней дихотомической классификации к-средних. Полученная классификация была подвергнута процедуре дискриминантного анализа с использованием ретроспективного периода как реферативного. Дискриминантный анализ показывает хорошую воспроизводимость полученной классификации для состояния 10-летней давности: общее качество распознавания для 8 классов составило 72.3 % а для 16 классов – 64.9 %. Можно заключить, что полученные классы описывают стационарные ядра пространственных ландшафтных состояний, или в данном случае агроэкологических разностей, повторяющихся на большом отрезке времени.

Ключевым результатом представленного сообщения является выделение пространственных структур, надежно повторяющихся во времени и обладающих интерпретируемой семантикой. То, что классификация, полученная на основе интегральных факторов за трехлетний период 2017–2019 гг., с высокой точностью воспроизводится через интегральные факторы 1990–2000 гг., означает, что через ряды дистанционной информации достаточной длины можно выделить стационарные структуры даже для территорий с сильной спектральной изменчивостью во времени. Также это доказывает существование пространственных инвариант, комбинирующих антропогенные и естественные факторы дифференциации ландшафтов, отражение которых содержится в дистанционной

информации. Полученные инварианты могут использоваться как базовая структура, которую можно соотносить как с варьированием внутри породившего ее временного ряда, так и с варьированием относительно более широкого наблюдаемого диапазона. Таким образом решается важная задача разделения относительно стационарных и динамических компонент агроландшафтов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 20-016-00211.

Литература

- Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю., Пузаченко Ю.Г. Уточнение содержания тематических карт на основе данных дистанционного зондирования // Известия Российской академии наук. Сер. геогр. 2011. № 4. С. 86–96.
- Пузаченко М.Ю., Пузаченко Ю.Г., Козлов Д.Н., Федяева М.В. Картографирование мощности органогенного и гумусового горизонтов лесных почв и болот южнотоежного ландшафта (юго-запад Валдайской возвышенности) на основе трехмерной модели рельефа и дистанционной информации (LANDSAT 7) // Исследование Земли из космоса. 2006. № 4. С. 70–79.
- Пузаченко Ю.Г., Байбар А.С., Варлагин А.В. и др. Тепловое поле южно-таежного ландшафта Русской равнины // Известия Российской академии наук. Сер. геогр. 2019а. № 2. С. 51–68.
- Пузаченко Ю.Г., Кренке А.Н., Пузаченко М.Ю. и др. Оценка термодинамических параметров ландшафтного покрова по мультиспектральным измерениям отраженной солнечной радиации (landsat) на основе неэкстенсивной статистической механики // Доклады Академии наук. 2019 б. Т. 487. № 3. С. 310–316.
- Пузаченко Ю.Г., Хорошев А.В., Алещенко Г.М. Анализ организации ландшафта на основе космического снимка // Исследование Земли из космоса. 2003. № 3. С. 63–71.
- Jorgensen S.E., Svirezhev Yu.M. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Oxford: Elsever, 2004. 366 p.
- Nawar S., Buddenbaum H., Hill J. Digital Mapping of Soil Properties Using Multivariate Statistical Analysis and ASTER Data in an Arid Region // Remote Sensing. 2015. Vol. 7 (2). P. 1181–1205.
- Stasyuk N.V., Tseits M.A., Konyushkova M.V., Marechek M.S. Verification of predicted dynamics of soil degradation using satellite imagery // Moscow University Soil Science Bulletin. 2017. Vol. 72 (4). P. 161–164.
- Yufeng Ge, Thomasson J., Ruixiu Sui. Remote Sensing of Soil Properties in Precision Agriculture: A Review // Frontiers of Earth Science. 2011. Vol. 5. P. 229–238.

ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ СООБЩЕСТВА КОЛЛЕМБОЛ: МОДЕЛИ РАНГОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Кузнецова Н.А.¹, Суховольский В.Г.², Ковалев А.В.³, Бабенко А.Б.⁴

¹Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия
mpnk@yandex.ru

²Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия
soukhovolsky@yandex.ru

³Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
sunhi.prime@gmail.com

⁴Институт проблем экологии и эволюции РАН им. А.Н. Северцова, Москва, Россия
lsdc@mail.ru

Аннотация: многолетний мониторинг сообщества мелких членистоногих-коллембол проводили отдельно для различных слоев подстилки хвойного леса. Для каждого слоя приведены уравнения связи между рангом вида и его плотностью. Встречаемость вида зависит от его ранга в глобальном распределении. Связи между локальным и глобальным рангами вида могут быть использованы для оценки текущего состояния сообществ коллембол.

Членистоногие из класса коллембол(*Collembola*) населяют подстилку и верхние горизонты почв. Коллемболы способствуют разложению, превращению в гумус и минерализации растительных остатков и играют важную роль в почвообразовании (обзор Rotarov et al., 2020). Анализ динамики численности популяций коллембол потенциально может дать информацию о процессах, происходящих в почве. Однако оценка процессов в почве по численности коллембол затруднительна, так как необходимо отделить изменения плотности популяций коллембол вследствие изменений в ходе почвенных процессов, экзогенных внешних воздействий на них или нерегулярных поступлений в почву пищевого субстрата от собственной эндогенной динамики численности коллембол в стационарной среде.

В настоящей работе рассмотрена возможность оценки состояния сообщества коллембол по характеристикам рангового распределения видов.

Задача оценки характеристик сообществ коллембол рассматривалась с использованием данных многолетних учетов численности 70 видов коллембол на пробной площади липо-ельника зеленомошника волосистоосокового в Московской обл. с августа 1973 г. по февраль 1977 г., описанных ранее (Кузнецова, Бабенко, 1984). Всего за время исследований было произведено 399 учетов численности этих видов со средней периодичностью 7 раз в год (примерно через 49 дней).

Учеты коллембол проводили в отдельно взятых слоях лесной подстилки: L (опад), F (ферментативный), H (гумусный). Для анализа соотношения численностей разных видов в этих слоях были рассмотрены ранговые распределения, характеризующие связи между рангом (номером вида в ряде численностей, начиная с вида с максимальной встречаемостью, которому присваивается ранг 1, до вида с минимальной встречаемостью (ранг n)) и встречаемостью особей разных видов в пробе.

Рассматривались ранговые распределения видов коллембол в группе (L, F или H) в отдельном учете на дату t и суммарные ранговые распределения видов коллембол по данным многолетних учетов. Связь между величиной ранга i вида и долей $p(i)$ особей этого вида выразится следующим уравнением (Zipf, 1949; Яблонский, 1975; Суховольский, 2004; Суховольский, Иванова, 2013):

$$p(i) = \frac{A}{i^b} \quad (1).$$

где $A = p(1)$ – доля особей первого по рангу вида, b – коэффициент, характеризующий конкуренцию между видами.

В двойных логарифмических координатах относительное распределение Парето представляет собой прямую, и уравнение (1) можно записать в следующей форме:

$$\ln p(i) = a - b \cdot \ln i, \quad (2)$$

где i – ранг группы, $p(i)$ – относительная численность этой группы, $a = \ln A$ и b – константы.

Более точная модель рангового распределения была предложена Б.Мандельбротом (Мандельброт, 1973, 2004; Mandelbrot, 1963) в следующей форме:

$$p(i) = \frac{C}{(B + i)^\gamma} \quad (3)$$

где B – коэффициент рангового искажения. Если $B = 0$, то уравнение (3) переходит в уравнение (1).

Если коэффициент B не очень велик, то уравнения (3) можно разложить в ряд Тейлора (Суховольский, 1996) и тогда, ограничиваясь линейным членом, можно записать:

$$\ln p(i) = \alpha - bi \quad (4)$$

и ранговое распределение будет представлять собой прямую в полулогарифмических координатах $\{i, \ln M(i)\}$.

Для всех групп коллембол, учтенных в течение 1973 – 1977 гг., была написана программа для автоматического вычисления параметров ранговых распределений для каждого учета и ранговых распределений суммарных величин плотности видов в группах видов за все время учетов.

Встречаемость в пробах особей большинства видов коллембол низка и в отдельных учетах встречаются далеко не все виды из списка, составленного по результатам многолетних учетов. Тем не менее, соотношение между рангом вида и его плотностью статистически достоверно описывается уравнениями (2) или (4) как в ходе отдельного учета, так и при анализе данных глобальных многолетних учетов. Вероятность найти в определенной пробе особей того или иного вида зависит от того, каков ранг этого вида в глобальном ранговом распределении. При этом существуют связи между локальным и глобальным рангами вида. Эти связи и отклонения от них могут быть использованы для оценки текущего состояния сообществ коллембол.

Литература

- Кузнецова Н.А., Бабенко А.Б. Многолетняя динамика численности коллембол в ельнике зеленомошнике // Фауна и экология ногохвосток. М.: Наука, 1984. С. 57-67.
- Мандельброт Б. Теория информации и психолингвистика: теория частоты слов // Математические методы в социальных науках. М.: Прогресс. 1973. С. 316 – 337.
- Мандельброт Б. Фракталы, случай и финансы. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика. 2004. 256 с.
- Суховольский В.Г. Распределение фитомассы деревьев по фракциям и оценка биопродуктивности деревьев и насаждений // Лесоведение. 1996. № 1. С. 30 - 40.
- Суховольский В.Г. Экономика живого. Новосибирск: Наука. 2004. 140 с.
- Суховольский В.Г., Иванова Ю.Д. Оценка чистой первичной продукции лесных насаждений с использованием модели распределения фитомассы по фракциям // Лесоведение. 2013. № 5. С. 20–28.
- Яблонский А.И. Стохастические модели научной деятельности // Системные исследования: ежегодник. 1975. М.: Наука. 1976. С. 5 – 42.
- Mandelbrot B. New Methods in Statistical Economics // J. Political Economy. 1963. V. 71. P. 421 – 440.
- Potapov A. et al. Towards a global synthesis of Collembola knowledge – challenges and potential solutions // Soil Organisms. 2020. 92 (3). P. 161–188. DOI 10.25674/so92iss3pp161.
- Zipf G.K. Human behavior and the principle of least effort. Cambridge, Mass.: Addison-Wesley Press Inc. 1949. 585 p.

ИНДИКАТОРЫ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РОСТА ПОПУЛЯЦИЙ: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ

Логофет Д.О.¹, Разжевайкин В.Н.²

¹ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук,
Москва, Россия

danilal@posman.ru

²ФИЦ «Информатика и управление» Российской Академии Наук, Москва, Россия
razzh@mail.ru

Аннотация: В матричных моделях динамики популяций главную роль играет доминантное собственное число $\lambda_1(\mathbf{L})$ «проекционной» матрицы $(\mathbf{L})$ – объективная количественная мера приспособленности популяции, специфичная по пространству и времени и дающая прогноз жизнеспособности популяции. Положение $\lambda_1(\mathbf{L})$ относительно 1 позволяет выяснить *индикатор потенциально роста* – явная функция $R(\mathbf{L})$ матричных элементов, которая обеспечивает нужную индикацию своим количественным значением.

1. Введение

В теории и практике матричных моделей динамики популяций с дискретной структурой главную роль играет доминантное собственное число $\lambda_1(\mathbf{L})$ «проекционной» матрицы $\mathbf{L}$ – объективная количественная мера приспособленности популяции, специфичная по пространству и времени и дающая прогноз жизнеспособности популяции: рост, вымирание или стабилизация, когда соответственно $\lambda_1(\mathbf{L}) >$, $<$ или $= 1$. Поэтому возникают ситуации, когда нужно/важно выяснить (*индицировать*) положение $\lambda_1(\mathbf{L})$ относительно 1 прежде, чем (или вместо того, чтобы) вычислять/оценивать его значение. С такой задачей справляется *индикатор потенциально роста* – явная функция $R(\mathbf{L})$ матричных элементов, которая обеспечивает нужную индикацию своим количественным значением.

Исторически первый *индикатор потенциально роста* (ИПР) популяции с дискретной структурой появился вместе с моделью Лесли для простейшего случая такой структуры – структуры возрастной (Свирижев, Логофет, 1978), – хотя сам термин ИПР и формальное определение

$$R(\mathbf{L}) \left\{ \begin{matrix} < \\ = \\ > \end{matrix} \right\} 1 \Leftrightarrow \lambda_1(\mathbf{L}) \left\{ \begin{matrix} < \\ = \\ > \end{matrix} \right\} 1 \quad (1)$$

появились гораздо позднее (Логофет, Белова, 2007), как обобщение *индикаторного свойства* (1) двух известных функций. Первой из них была *чистая скорость воспроизводства* (*net reproduction rate*, Cushing, Yikang, 1994), популярная в современной экологической литературе (Caswell, 2001):

$$R_0(\mathbf{L}) = \rho([\mathbf{F}(\mathbf{I} - \mathbf{T})^{-1}]), \quad (2)$$

где $\mathbf{L} = \mathbf{T} + \mathbf{F}$ – представление в виде матрицы «старения» и плодовитости соответственно, $\mathbf{I}$ – матрица-единица, $\rho(\dots)$ – спектральный радиус матрицы. Второй функцией стал ИПР, предложенный автором (Логофет, Белова, 2007) в виде

$$R_1(\mathbf{L}) = 1 - \det(\mathbf{I} - \mathbf{L}), \quad (3)$$

вместе с доказательством его индикаторного свойства для матриц Логофета (Клочкова, 2004).

2. Простота вычисления $R_1(L)$ против общности строения L в $R_0(L)$

Вычисление определителя матрицы гораздо проще, чем спектрального радиуса, и сравнивая формулы (2) и (3), мы видим, что $R_1(L)$ весьма прост в вычислительном плане. К сожалению, $R_1(L)$ проигрывает в общности строения матрицы L , для которого справедливо его индикаторное свойство. Уровень этой общности, начавшись со строения матрицы Лесли (простейшего среди матричных моделей популяций) постепенно повышался, достигнув своего максимума на таком строении L , при котором ранг матрицы плодovitости F равен 1 (Protasov, Logofet, 2014), например, когда F имеет только одну ненулевую строку или один ненулевой столбец (т.е. в жизненном цикле особей есть несколько репродуктивных стадий, но их потомство регистрируется только в одной молодой стадии, либо потомство единственной репродуктивной стадии регистрируется в одной или нескольких стадийных группах). Но уровень общности $R_0(L)$ заметно выше: нужна лишь обратимость матрицы $(I - T)^{-1}$, для чего достаточно, например, субстохастичности матрицы переходов T .

Рисунок 1 схематически изображает историю того, как уровень общности $R_1(L)$ постепенно повышался до своего максимума. Настоящий прорыв в этой истории случился в 2020 г. с появлением понятия *индикатора стабильности* (Разжевайкин, Тыртышников, 2020), обобщающего ИПР $R_0(L)$ и $R_1(L)$. Индикатор Разжевайкина–Тыртышникова $R_{RT}(A)$ вычисляется по определенному алгоритму, который допускает любое строение неотрицательной матрицы A , в частности, модельной матрицы L , отвечающей любой структуре жизненного цикла организмов изучаемого вида. Например, для цикла вейника *Calamagrostis epigeios*, выходящего за рамки 1-ранговой коррекции T , $R_{RT}(L)$ принял вид полиномиальной функции от элементов L не выше 3-й степени (Logofet, Razzhevaikin, 2021).

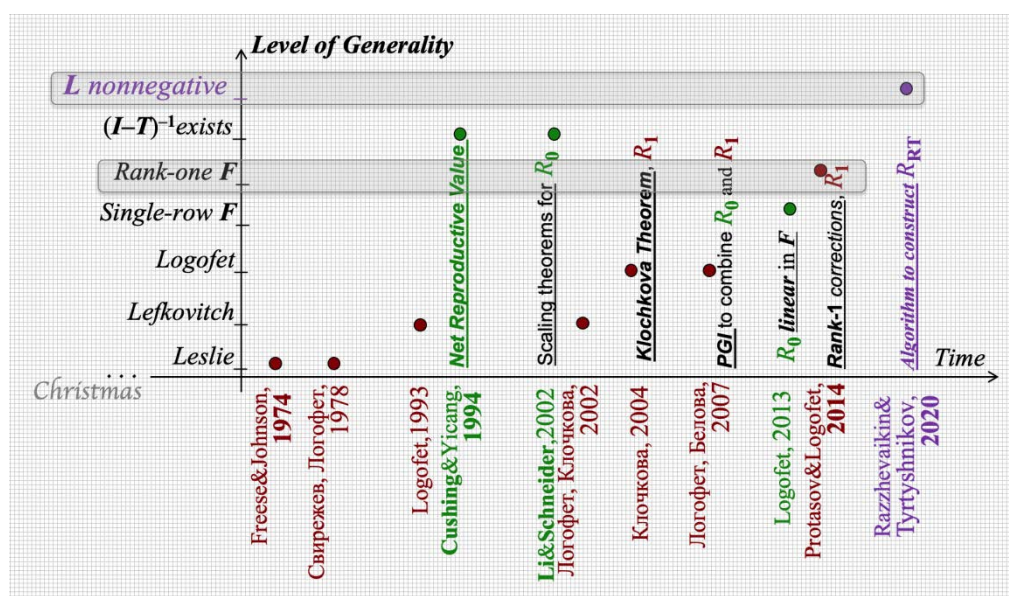


Рисунок 1 – История разработки теории ИПР

3. Заключение

С разработкой алгоритма Разжевайкина–Тыртышникова для построения индикатора $R_{RT}(A)$ по заданной неотрицательной матрице A теорию ИПР можно считать завершённой. Тем самым снимаются структурные ограничения с множества ситуаций, где нужно/важно индексировать положение λ_1 относительно 1, прежде чем вычислять/оценивать его значение.

Благодарности

Работа Логофета Д.О. поддержана РФФИ, грант № 19-04-01227

Литература

- Клочкова И.Н. Обобщение теоремы о репродуктивном потенциале для матриц Логофета // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1, Математика, механика. 2004. № 3. С. 45–48.
- Логофет, Д.О., Белова И.Н. Неотрицательные матрицы как инструмент моделирования динамики популяций: классические модели и современные обобщения// Фундам. и приклад. математика. 2007. Т. 13. № 4. С. 145–164.
- Разжевайкин В.Н., Тыртышников Е.Е. Об индикаторах устойчивости неотрицательных матриц // Доклады РАН. Математика, информатика, процессы управления. 2020. Т. 490. № 1. С. 51–54.
- Caswell H. Matrix Population Models: Construction, Analysis, and Interpretation, 2nd ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2001. 722 p.
- Logofet D.O., Razzhevaikin V.N. Potential-growth indicators revisited: higher generality and wider merit of indication // Mathematics. 2021. V. 9. 1649. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/9/14/1649> (accessed 10.10.2021)
- Protasov V.Yu., Logofet D.O. Rank-one corrections of nonnegative matrices, with an application to matrix population models // SIAM J. Matrix Anal. Appl. 2014. V. 35, P. 749–764.

ОЦЕНКА ПРОДУКЦИИ МЕТАНА В ОБРАЗЦАХ ТОРФА ИЗ ТИПИЧНЫХ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ УГЛЕРОДА В МЕТАНЕ И УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Локшина Л.Я.¹, Вавилин В.А.¹, Литти Ю.В.²

¹*Институт водных проблем РАН, Москва, Российская Федерация*

vavilin@iwp.ru

²*Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Российская Федерация*

litty-yuriy@mail.ru

Аннотация: С помощью математического моделирования сделана оценка вклада различных групп микроорганизмов в разложение органического вещества торфа в инкубационных экспериментах с образцами, отобранными летом и осенью 2017 и 2018 гг. с различных глубин из болот Западной Сибири. Предложен наиболее вероятный путь образования метана и объяснено наблюдавшееся соотношение углекислого газа и метана.

Динамическая модель, разработанная ранее (Lokshina et al., 2019; Vavilin et al., 2018) и включающая в себя стехиометрические реакции процессов, происходящих с участием микроорганизмов, дифференциальные уравнения, описывающие скорости роста биомассы и скорости изменения концентраций веществ, влияющих на динамику системы, учитывающие процессы газообмена и описывающие динамику изменения концентраций веществ, содержащих изотопы ¹³C, была применена для исследования анаэробного разложения в инкубационных экспериментах с образцами торфа, отобранными в 2017 и 2018 гг. с глубины 15-20 см и 40-50 см ниже уровня болотных вод из четырех участков болот Западной Сибири: двух олиготрофных, мезотрофного и эвтрофного (Glagolev et al., 2018). В модели считалось, что большая часть исходного субстрата представляет собой целлюлозу и использована схема метаногенеза, включающая гидролиз, кислотогенез, ацетогенез, гомоацетогенез и метаногенез.

Известно, что поток метана в атмосферу из болот Западной Сибири вносит существенный вклад в общий поток метана из естественных ландшафтов. Поток этот неоднородный и зависит от таких природных факторов, как температура окружающей среды и почвы, химический состав торфа, тип растительности и другие. В последние годы стали появляться работы, указывающие на то, что микробное сообщество, разлагающее вещество торфа в анаэробных условиях, также может оказывать существенное влияние на этот поток. Количество метана, выделяющегося в атмосферу, сильно зависит от пути, по которому происходит разложение торфа микроорганизмами, и важным индикатором этого пути считается наблюдающееся в экспериментах соотношение выделяющихся метана и углекислого газа. Общее стехиометрическое уравнение классического процесса метаногенеза, т.е. уравнение разложения целлюлозы микроорганизмами до метана и углекислого газа, предполагает, что должны выделяться равные количества этих веществ. В экспериментах же наблюдаются отклонения, как в большую, так и в меньшую сторону. В предыдущих исследованиях предлагались две основные причины этого явления – присутствие альтернативных акцепторов электронов и неполное разложение субстрата. В данной работе показывается, что в рассматриваемых системах причиной наблюдаемых явлений является неполное разложение исходного субстрата и промежуточных веществ.

На рисунке представлены результаты моделирования контрольных экспериментов с образцами, отобранными в 2017 г. Видимый выход метана превышал выход углекислого газа везде, кроме образцов из мезотрофного болота. Метан образовывался из водорода в мезотрофном и одном из олиготрофных болот, гомоацетогенные бактерии присутствовали везде, однако, метан образовывался преимущественно через гомоацетогенез и ацетат в эвтрофном болоте, водородотрофный метаногенез преобладал в одном из олиготрофных и в мезотрофном болоте, в другом олиготрофном болоте путь образования метана был традиционным, то есть 30% метана производилось из H_2/CO_2 и 70% - из ацетата. Кроме того, изменения в скорости образования метана в 2017 и 2018 гг. в инкубационных экспериментах и на местах отбора проб коррелировали, что может указывать на сильное влияние микробного сообщества на выход метана на местах отбора проб.

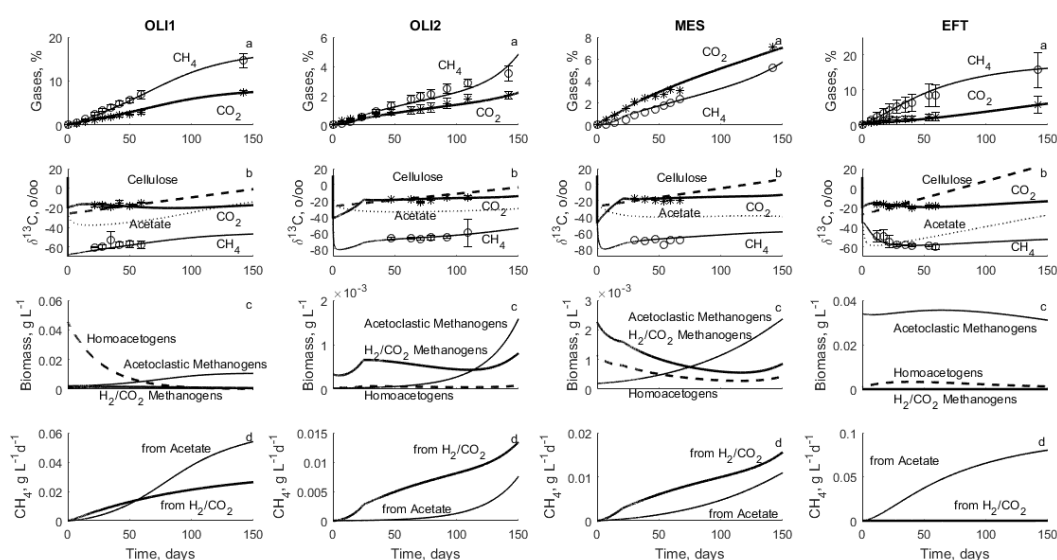


Рисунок – Динамика разложения торфа в образцах 2017 года. Обозначения: образцы торфа олиготрофного участка Бакчарского болота (60°53.4'с.ш., 68°40.8'в.д.) – OLI2; мезотрофного участка того же болота (56°51.277' с.ш., 82°50.858' в.д.) - MES; эвтрофного болота «Ближнее» (56°50.9' с.ш., 83°04.167' в.д.) – EFT; олиготрофного участка болота Мухрино (60°53.4'с.ш., 68°40.8'в.д.) – OLI1. Описание мест, процедуры отбора проб и инкубационных экспериментов представлены в работе Glagolev et al. (2018).

Учет изменения концентраций изотоп - содержащих компонентов позволил выяснить вклад различных групп микроорганизмов в процесс образования метана и предложить наиболее вероятный путь разложения торфа в каждом из исследованных типов болот.

Благодарности. Работа поддержана Российским Научным Фондом (проект № 17-17-01204).

Литература

- Glagolev, M. V., Ilyasov, D. V., Sabrekov, A.F., Litt, Y. V., Goncharov, V.M. Response of Methane Emission to Temperature Anomalies of Mires: Case Study of the Southern Taiga in Western Siberia// Water Resour. 2018. V. 45. S44–S52.
- Lokshina, L., Vavilin, V., Litt, Y., Glagolev, M., Sabrekov, A., Kotsyurbenko, O., Kozlova, M. Methane Production in a West Siberian Eutrophic Fen Is Much Higher than Carbon Dioxide Production: Incubation of Peat Samples, Stoichiometry, Stable Isotope Dynamics, Modeling// Water Resour. 2019. V. 46. S110–S125.

Vavilin, V.A., Rytov, S. V, Lokshina, L.Y. Modelling the specific pathway of CH₄ and CO₂ formation using carbon isotope fractionation: an example for a boreal mesotrophic fen// *Isotopes Environ. Health Stud.* 2018. V. 54. P. 475–493.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ЛЕСНОГО ПОЛОГА НА ВИДИМОСТЬ РАСПОЛОЖЕННОГО НА ЗЕМЛЕ ПЛАМЕНИ СКВОЗЬ КРОНЫ ДЕРЕВЬЕВ

Мателенок И.В.¹

¹ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", Санкт-Петербург, Россия
igor_matelenok@mail.ru

Аннотация: рассмотрены вопросы анализа видимости малых возгораний с воздуха через полог леса. На основе данных о свойствах лесного полога построены его трехмерные модели. Модели в составе виртуальных сцен использованы в вычислительных экспериментах для оценки пространственной изменчивости коэффициента пропускания излучения очага горения пологом и определения видимости пламени при разной геометрии визирования.

Раннее обнаружение возгораний в лесных массивах является важным условием для своевременного принятия мер по недопущению развития пожаров и способствует уменьшению затрат на ликвидацию неконтролируемого горения. Несмотря на имеющийся опыт применения для оперативного контроля предпожарной обстановки и мониторинга пожаров беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных съемочным оборудованием видимого и ИК диапазонов (Ambrosia, Zajkowski, 2015; Sudhakar et al., 2020), по-прежнему недостаточно изученным остается вопрос оценки видимости расположенного под кронами пламени небольшого размера с борта БПЛА при разных свойствах лесного полога. Настоящая работа нацелена на получение данных о влиянии характеристик полога на возможность обнаружения расположенного под ним очага горения с воздуха. Ввиду сложности организации полевых экспериментов видимость пламени исследуется посредством проведения компьютерного моделирования распространения излучения сквозь полог.

В качестве объектов-оригиналов выбраны деревья двух распространенных на территории Российской Федерации видов (лиственных пород) – березы повислой (*Betula pendula*) и осины обыкновенной (*Populus tremula*). Для построения пригодных для симуляции переноса излучения трехмерных моделей полога был выполнен сбор данных по характеристикам последнего, в наибольшей степени влияющим на распространение излучения в растительности: распределении листьев по углам наклона (Pisek et al., 2013), индексу листовой поверхности (ЛИ), форме и сомкнутости крон. Созданы модели полога трех типов: модели в виде блоков-параллелепипедов, в виде массива крон-эллипсоидов и модели, состоящие из каркаса, в роли которого выступает L-система, и облака ассоциированных с ней листьев (рисунок 1). Для генерации моделей использован программный код на языке R. Созданные с помощью него модели были внедрены в виртуальные сцены, содержащие также модели очага горения, модели естественного освещения и модели системы сенсоров (чувствительных поверхностей), регистрирующих поверхностную плотность потока излучения (Matelenok et al., 2021). Вычислительные эксперименты с использованием сформированных сцен и обработка их результатов были выполнены с помощью специализированного программного обеспечения для светотехнических расчетов от DIAL GmbH и языка программирования R. В ходе моделирования определялись значения коэффициента пропускания излучения пологом γ , и на основе этих оценок делались выводы о видимости пламени сквозь кроны.

Вычислительные эксперименты позволили зарегистрировать глубокие колебания поверхностной плотности потока излучения и γ , связанные с наличием на пути лучей от очага горения к чувствительным поверхностям преград – фитоэлементов. В ходе моделирования было показано, что имеющиеся различия в характере распределения листьев деревьев двух видов по углам наклона находят слабое отражение в вариабельности способности крон пропускать излучение. Наибольшая разность значений γ для *Betula pendula*

и *Populus tremula* фиксируется при визировании в надир и малых значениях ЛИ (на угловой высоте приемника излучения 85° при полностью сомкнутых кронах и ЛИ, равном 1,7, разность составляет 0,1). Более выраженное влияние на пропускание излучения пологом (особенно при наклонной съемке) оказывает ЛИ, форма и сомкнутость крон. Увеличение отношения высоты к диаметру кроны при сохранении междоусового расстояния, как и увеличение сомкнутости крон, приводит к уменьшению вероятности пересечения излучением разреженных областей полога и снижению усредненных по угловым интервалам значения γ , что затрудняет обнаружение пламени с воздуха. Как показано на рисунке 2, диапазоны углов визирования, которым соответствуют высокие значения γ , отличаются для систем крон разной формы. Положение максимумов γ и их выраженность также зависит от смещения m очага горения относительно центров проекций крон на поверхность земли.

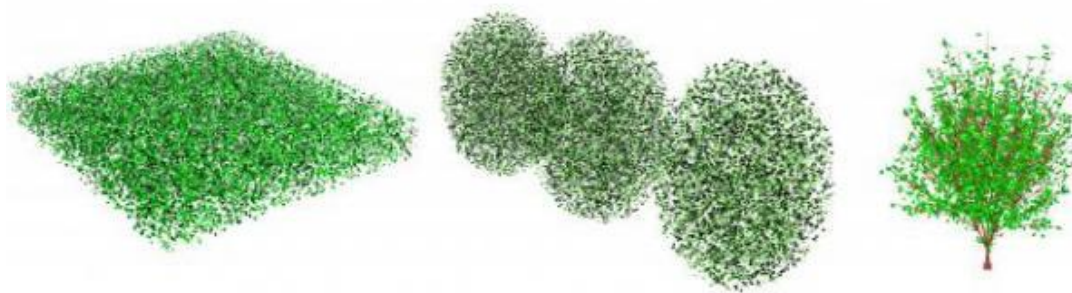


Рисунок 1 – Примеры сгенерированных моделей полога

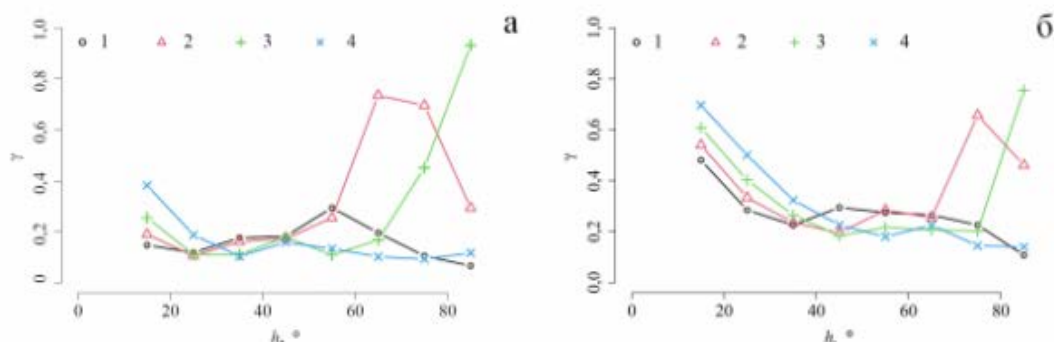


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента пропускания γ излучения пологом от угловой высоты приемника излучения h при разной величине смещения m очага горения относительно крон для случая прохождения излучения через массив из трех крон-эллипсоидов *Populus tremula* с диаметром 3 м и отношением длин полуосей 4:3:3 (а) и 8:3:3 (б) при ЛИ = 2,5; 1 – $m = 0$ м, 2 – $m = 1,0$ м, 3 – $m = 2,0$ м, 4 – $m = 3,0$ м

Отмеченные особенности экранирования излучения затрудняют применение наклонной съемки для поиска возгораний под густым пологом, сформированным зрелыми деревьями с вытянутыми по вертикали кронами. Результаты экспериментов позволяют предположить, что большую эффективность детектирования пламени при съемке через полог можно ожидать при использовании камер с широкоугольными объективами. Однако необходимо отметить, что возможность обнаружения возгораний будет зависеть не только от особенностей геометрии визирования и свойств полога, но и от условий освещения поверхностей, окружающих детектируемый объект.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по

государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (проект МК-1004.2020.5).

Литература

- Ambrosia V. G., Zajkowski T. Selection of appropriate class UAS/sensors to support fire monitoring: experiences in the United States // Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer, 2015. P. 2723-2754.
- Matelenok I. V., Alekseev F. A., Evdokimova E. A. Influence of the canopy structure of a birch forest on the visibility of the fires below // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 677. P. 52122 (1-8).
- Pisek J., Sonnentag O., Richardson A. D., Mottus M. Is the spherical leaf inclination angle distribution a valid assumption for temperate and boreal broadleaf tree species? // Agricultural and Forest Meteorology. 2013. V. 169. P. 186-194.
- Sudhakar S., Vijayakumar V., Kumar C. S., Priya V., Ravi L., Subramaniaswamy V. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based Forest Fire Detection and monitoring for reducing false alarms in forest-fires // Computer Communications. 2020. V. 149. P. 1-16.

ПОДСЧЕТ СЕВЕРНЫХ ОЛЕНЕЙ В СКОПЛЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ АРХИТЕКТУРЫ MASK R-CNN

Михайлов В.В.¹, Соболевский В.А.¹, Колпашиков Л.А.²

¹*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия*

mwwcari@gmail.com

arguzd@yandex.ru

²*ФГБУН «Объединенная дирекция заповедников Таймыра», Норильск, Россия*

ntnt69@yandex.ru

Аннотация: рассматривается автоматизированный программный комплекс, решающий задачу распознавания и подсчета северных оленей в стадах по аэрофотоснимкам с помощью свёрточной нейронной сети архитектуры Mask R-CNN.

Используемые в настоящее время методики учета численности диких северных оленей тундровых популяций основываются на экологической особенности видов, состоящей в том, что олени в жаркую погоду во время вылета кровососущих насекомых собираются в многотысячные скопления на ограниченной территории в северной части их летнего ареала (Зырянов и др., 1971; Колпашиков и др., 1999). Стада в скоплениях фотографируются и количество животных в них подсчитываются напрямую - «по головам». Такой подход обеспечивает более высокую точность оценки численности оленей по сравнению с аппроксимационными методами (Челинцев, 2000).

Специфика массива аэрофотоснимков состоит в том, что животные на них видны под разными углами, при различном удалении от камеры, на разных ландшафтах и при разном освещении, изображения оленей могут перекрывать друг друга. Ручная обработка снимков занимает до нескольких месяцев. В связи с этим была поставлена задача автоматизации процедуры обработки аэрофотоснимков для сокращения времени получения результатов авиаучетов.

Методика распознавания и подсчета оленей по аэрофотоснимкам основывается на использовании аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС). ИНС, используемая для распознавания и подсчета, принадлежит к классу свёрточных нейронных сетей (СНС). Данный класс архитектур подходит прежде всего для работы с изображениями и иными данными, которые возможно представить в матричном виде. Ключевой особенностью данного класса архитектур является наличие особых свёрточных слоёв в архитектуре ИНС. Организация этих слоёв позволяет при обработке данных матричного вида учитывать не только значения, поступающие от конкретных входных нейронов, но и связи между этими значениями. Таким образом, в отличие от прочих ИНС, СНС способны анализировать контекстно-зависимые данные. Это делает данный класс архитектур эффективными при анализе изображений, в которых ключевой информацией являются не столько значения конкретных пикселей изображения, сколько их расположение относительно друг друга.

Для решения поставленной задачи была выбрана архитектура Mask Regions with Convolution Neural Networks (MRCNN) (He et. al., 2017). В результате совмещения в MRCNN архитектуры Faster R-CNN с модулем Mask Head, данная архитектура наиболее успешно справляется с задачами семантической и объектной сегментации изображений (Ganesh et. al., 2019; Zhao et. al., 2020)

Основным массивом обучения для MRCNN стал массив изображений MS COCO dataset (Microsoft Common Objects in Context). Данный набор данных состоит из 328 тысяч изображений и используется для обучения СНС решению задач обнаружения и сегментации. Использование данного массива для базового обучения MRCNN позволяет задать для неё все основные концепции различных классов объектов, в том числе и животных. Однако,

изображения северных оленей не входят в MS COCO dataset и MRCNN по умолчанию не способна отличить их от ряда других животных (овец, газелей, коров, лошадей).

На втором этапе, MRCNN дообучалась на массиве аэрофотоснимков стад северных оленей. Для этой цели был подготовлен входной массив данных, содержащий обучающую выборку из 100 размеченных аэрофотоснимков стад и тестовую выборку из 30 исходных снимков стад, не включённых в обучающую выборку.

СНС была обучена на 20 эпохах, с 60 шагами обучения в эпохе, со скоростью обучения 0.0058 и с порогом пропуска обнаружения 0.7. На тестовом массиве данных обученная модель корректно распознавала в среднем 82% оленей.

Для разработанного программного комплекса создан веб-интерфейс (НТЦ ИКТ СПИИРАН, 2021), а сама программа введена в ограниченную эксплуатацию. Для верификации программного комплекса были использованы 10 аэрофотоснимков стад диких северных оленей, сделанных при различных условиях съёмки. В качестве примера на рисунке 1 приведена одна из верификационных фотографий. Снимок зашумлен фоновыми объектами – лужами, озёрками, бугорками, полигонами и т.п. Ошибка распознавания оленей составила около 17%. При этом система ни разу не приняла за оленя объект, который оленем не является.

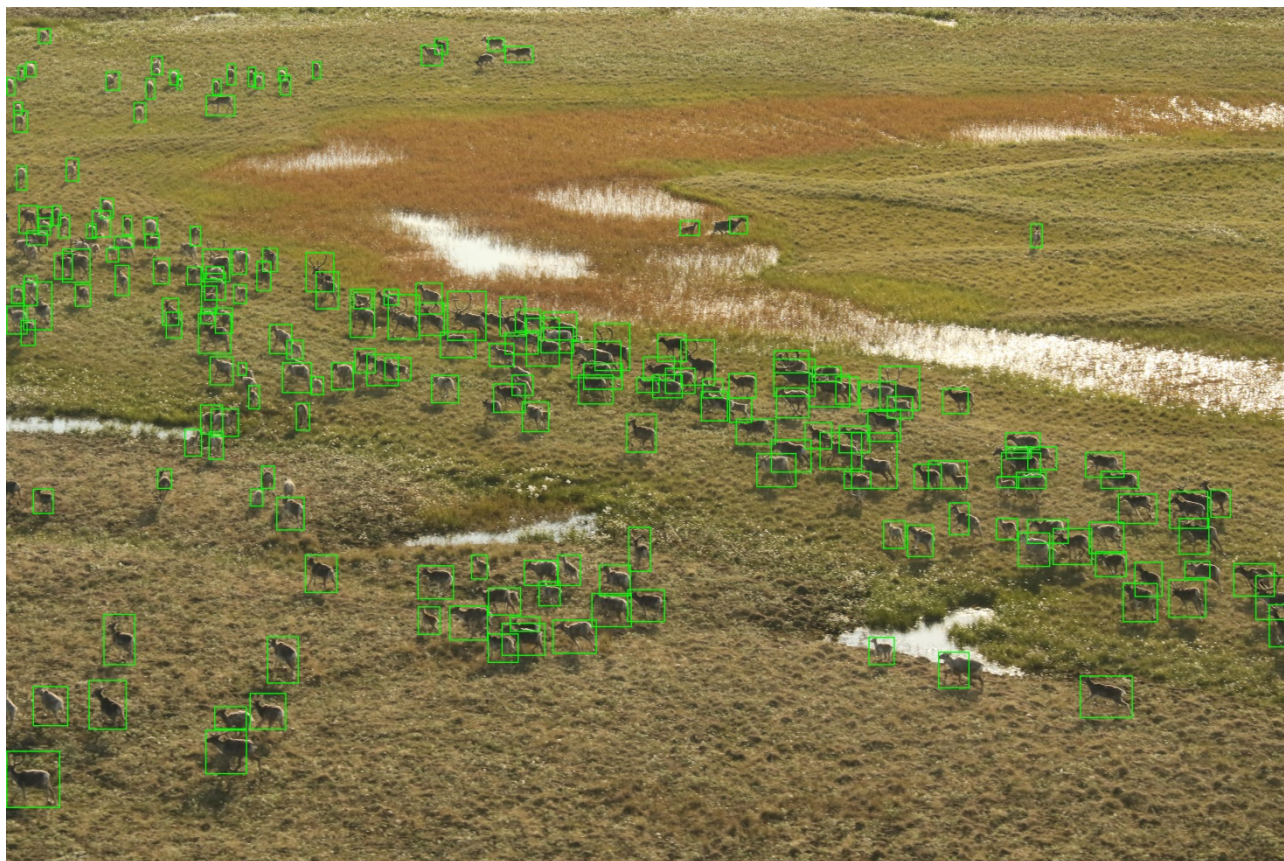


Рисунок 1 – Снимок стада, на котором помечены распознанные системой олени

Средняя величина ошибки оценки численности животных в стадах на верификационной выборке составила около 13%. Причина этого, на наш взгляд, состоит в недостаточном объеме обучающей выборки. Объем выборки должен быть увеличен не менее, чем в 2-3 раза (до 200-300 помеченных аэрофотоснимков стад).

Благодарности

Работа выполнена в рамках бюджетной темы №0073-2019-0004, гранта РФФИ №19-37-90112, при поддержке World-Wide Fund for Nature - Contract №BBF003107.

Литература

- Зырянов В.А., Павлов Б.М., Якушкин Г.Д. Экологические основы учета численности промысловых животных в тундровой зоне Таймыра. // Проблемы охотничьего хозяйства Красноярского края. Красноярск, 1971. С. 70-72.
- Колпашиков Л.А., Павлов Б.М., Михайлов В.В. Методика авиаучета и определения норм опромышления таймырской популяции диких северных оленей: методические рекомендации. СПб, 1999. 25 с.
- НТЦ ИКТ СПИИРАН. Регион-В. <https://regionview.ru/ai/> (accessed 29.09.20212).
- Челинцев Н.Г. Математические основы учета животных. М.: 2000. 431 с.
- Ganesh P., Volle K., Burks T.F., Mehta S.S. Deep Orange: Mask R-CNN-based Orange Detection and Segmentation / IFAC-PapersOnLine, 2019. - Vol. 52, issue 30. P. 70-75.
- He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. Mask R-CNN // Computer Vision and Patter Recognition. Cornell University, 2017.
- Zhao G., Hu J., Xiao W., Zou J. A mask R-CNN based method for inspecting cable brackets in aircraft // Chinese Journal of Aeronautics, 2020.

СООТНОШЕНИЯ ФОТОСИНТЕЗА И ТРАНСПИРАЦИИ У СОСНЫ И ЕЛИ В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Молчанов А.Г.¹

¹ФГБУН Институт лесоведения Российской академии наук, с. Успенское, Россия
a.georgievich@gmail.com

Аннотация: Целью исследований была оценка влияния окружающей среды на фотосинтетические и транспирационные показатели двух хвойных пород: светолюбивой (*Pinus sylvestris* L.) и теневыносливой (*Picea abies* L.). По данным эколого-физиологического мониторинга были оценены оптимальные показатели интенсивности фотосинтеза и транспирации этих пород. Результаты сравнения интенсивности фотосинтеза и транспирации в естественных условиях при оптимальной влажности почвы в начале вегетационного периода показали, что интенсивность фотосинтеза за малооблачный день была выше у сосны – на 88% выше, чем у ели. В облачный день различия были ниже – только на 20%. В малооблачный и в пасмурный дни различия в интенсивности транспирации у обоих пород были меньше на 18,5% и 20%, соответственно

В европейской части России за последнее время происходит усыхание ели на значительной территории. Многие лесоводы предлагают в местах усохших еловых древостоев разводить сосновые. В связи с этим необходимо проводить сравнительные исследования по изучению продуктивности сосны и ели.

В работе (Sharew et al., 1996) сравнивались фотосинтетические характеристики двух хвойных пород *Juniperus processra*, и *Afrocarpus gracilior*. *Juniperus processra* был классифицирован как не выносящий затенения, потому что он не восстанавливается в тени, а его саженцы не могут проникнуть через глубокий слой гумуса на поверхности почвы. *A. gracilior* считается теневыносливым, потому что он естественным образом восстанавливается в нетронутой части леса. Более вероятно, что их различное распределение отражает различия в условиях, которые им необходимы для прорастания семян или укоренения проростков

Целью наших исследований была оценка влияния окружающей среды на фотосинтетические и транспирационные показатели двух хвойных пород – светолюбивой сосны (*Pinus sylvestris* L.) и теневыносливой ели (*Picea abies* L.). На основе результатов эколого-физиологического мониторинга оценивали оптимальные показатели интенсивности фотосинтеза и транспирации этих пород деревьев.

Исследования проводили в Серебряноборском опытном лесничестве Института лесоведения РАН на участке находящемся в 1 км между Московской кольцевой дорогой (МКАД) и Рублевским шоссе. Измерения интенсивности фотосинтеза и транспирации проводили в мае в 140-летнем сосняке разнотравно-черничном I класса бонитета и в произрастающей рядом 60-летней куртине ели.

Интенсивность фотосинтеза и транспирации сосны измеряли на охвоенных побегах в световой части в середине кроны на высоте 22 м, у ели – в верхней части кроны на высоте 18 м. Измерение интенсивности фотосинтеза и транспирации проводили с помощью метода экспозиционных камер по открытой схеме на охвоенном побеге. Такую схему многие исследователи используют для оценки интенсивности газообмена (Edwards, 1973; Молчанов, 2007). В ходе эксперимента поддерживался постоянный проток окружающего наружного воздуха через камеры со средней скоростью 1,0 -1,5 л/мин. Газообмен охвоенных побегов рассчитывали как функцию разности концентраций CO₂ между выходящим из камеры и входящим в нее наружным воздухом, скорости воздушного потока и площади поверхности хвои (Молчанов, 2020; Молчанов, Ольчев, 2020).

Взаимосвязь среднесуточной интенсивности транспирации и фотосинтеза при оптимальной влажности почвы в мае месяце у сосны довольно хорошая $R^2=0.75$, тогда как у ели очень слабая $R^2=0.15$, коэффициент корреляции соответственно составил 0.85 и 0.29.

В естественных условиях, по отдельности зависимость фотосинтеза сосны и ели от температуры воздуха и солнечной радиации далеко от идеальной. По этой причине мы оценим как влияют эти параметры в совокупности.

На основе полученных экспериментальных данных были рассчитаны уравнения зависимости среднесуточной интенсивности фотосинтеза от среднесуточной солнечной радиации, среднесуточной температуры.

Зависимость интенсивности газообмена CO_2 (Ph) сосны и ели от солнечной радиации (I) и температуры воздуха (T_a) рассчитывали по формуле 1:

$$Ph = (a \cdot I / (1 + b \cdot I) - c) + (d \cdot T_a^2 + e \cdot T_a + f) \quad (1)$$

Зависимость интенсивности транспирации (Tr) сосны и ели от солнечной радиации (I) и температуры воздуха (T_a) проводили по формулам 2 (сосна) и 3 (ель):

$$Tr = (a \cdot T_a^2 + b \cdot T_a) + (c \cdot I + d \cdot I) \quad (2)$$

$$Tr = (d \cdot I^2 + e \cdot I + f) + (a \cdot I^2 + b \cdot I + c)_{aa} \quad (3)$$

Рассчитанные коэффициенты в уравнениях представлены в таблице 1. Анализ взаимосвязи расчетных данных газообмена CO_2 и транспирации, вычисленных по формулам и полученных по экспериментальным данным при разных внешних условиях, показывает, что расчетные данные газообмена CO_2 для сосны более близки к экспериментальным значениям, чем для ели; коэффициент дисперсии для сосны равен 0.70, а для ели – 0.66. Взаимосвязь расчетных и экспериментальных данных для транспирации у ели более тесная с экспериментальным значениям, чем у сосны; коэффициент дисперсии для ели равен 0.94, а для сосны – 0.79.

Таблица 1. Коэффициенты, использованные в уравнениях

Порода	Показатели	Коэффициенты				
		a	b	c	d	e
Сосна газообмен CO_2	795,1708	2,22957	178,677	-0,0638	1,49935	-179,29
Сосна транспирация	-0062	1.27754	-0.0005	0.11198		
Ель газообмен CO_2	26,195	0,65231	363897	-4,0539	-30,22	
Ель транспирация	9,1У-05	0,03069	-1,8945	-0,0405	1,2445	-1,8257

Трехмерные графики зависимости газообмена CO_2 и H_2O от солнечной радиации и температуры воздуха для сосны показывают, что с увеличением температуры воздуха до 12 °С интенсивность газообмена CO_2 увеличивается, а уже при 16 °С среднесуточной температуры воздуха начинает снижаться. Зависимость газообмена CO_2 от интенсивности солнечной радиации у сосны мало меняется при всех диапазонах температуры, только при температуре 0-4 °С увеличивается несколько слабее, чем при более высокой температуре воздуха. Для ели интенсивность газообмена CO_2 резко увеличивается с увеличением среднесуточной радиации однако температура воздуха на газообмен CO_2 практически не влияет. На транспирацию сосны при низких значениях солнечной радиации за световой день мало влияет, но при переменной облачности, при среднесуточной радиации свыше 150 Вт/м² резко увеличивается. С увеличением температуры воздуха транспирация стабильно увеличивается. Для ели интенсивность солнечной радиации и температуры действуют одинаково, с увеличением во всех диапазонах интенсивность транспирации увеличивается

Результаты сравнения интенсивности фотосинтеза и транспирации в естественных условиях при оптимальной влажности почвы в начале вегетационного периода показали, что интенсивность фотосинтеза за малооблачный день была выше у сосны более чем на 88% выше, чем у ели. В облачный день различия были значительно ниже, только на 20%. В

малооблачный и в пасмурный дни различия в интенсивности транспирации у обоих пород были меньше на 18,5% и 20% соответственно.

Литература

- Молчанов, А.Г. Баланс CO₂ в экосистемах сосняков и дубрав в разных лесорастительных зонах. Тула : Гриф и К, 2007. 284 с.
- Молчанов, А. Г. Сравнение экофизиологических показателей сосны и ели в Серебряноборском опытном лесничестве // Лесохоз. информ. электрон. сетевой журн. 2020. № 1. С. 115–124. URL: <http://lhi.vniilm.ru/>.
- Молчанов А.Г., Ольчев А. В. Эмиссия CO₂ с поверхности ствола сосны обыкновенной в разных условиях произрастания // Известия РАН. серия биологическая. 2020. № 4. С. 423–433.
- Edwards N.N., Sollins P. Continuous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest floor components // Ecology. 1973. V. 54. № 2. P. 406–412.
- Sharew H., Grace J., Legg C.J. Response of two Afromontane coniferous tree species to light and nutrient supply // Tree Physiology 1996.V. 16. P. 617-626.

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА МЕЖДУ ВЕРХОВЫМ БОЛОТОМ И АТМОСФЕРОЙ

Мухартова Ю.В.^{1,2}, Тарасов Д.Л.², Ольчев А.В.², Курбатова Ю.А.³

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Российская Федерация
muhartova@yandex.ru

²МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Российская Федерация
aoltche@gmail.com

³Институт Проблем Экологии и Эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Российская Федерация
kurbatova.j@gmail.com

Аннотация: Болота играют значительную роль в формировании локальных и региональных погодных и климатических условий, влияя на радиационный, тепловой, водный и углеродный баланс земной поверхности. В рамках данного исследования была разработана трехмерная модель переноса парниковых газов в приземном слое атмосферы между неоднородной подстилающей поверхностью и атмосферой. С помощью модели была определена пространственная неоднородность потоков диоксида углерода для выбранного в качестве объекта исследования верхового лесного болота Старосельский мох (Тверская область) и оценена репрезентативность проводимых на болоте измерений потоков парниковых газов методом турбулентных пульсаций.

Для мониторинга потоков CO₂ и описания его переноса в атмосфере в настоящее время используется широкий спектр экспериментальных методов (Aubinet et al 2012; Burba 2013; Иванов и др 2017; Norman et al 1997; Olchev et al 2013) и модельных подходов различной степени сложности и масштаба (Sogachev, Panferov 2006; Mukhartova et al 2019). В последнее время особый интерес у исследователей вызывает количественная оценка влияния горизонтальной неоднородности растительного покрова и рельефа на потоки парниковых газов в локальном и региональном масштабе. Это необходимо для более точной оценки вклада растительности в интегральные потоки парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью, а также и для интерпретации существующих данных измерений по потокам и оценки возможных погрешностей этих измерений.

Неоднородный растительный покров внутри и вокруг исследуемого верхового лесного болота Старосельский мох (Тверская область) делает невозможным простую интерполяцию данных точечных измерений в отдельных частях болота на всю площадь болотного массива, и требует применения многомерных процесс-ориентированных модельных подходов. При создании трехмерной модели переноса использовался компромисс между модельной сложностью (возможностью описания процессов переноса с помощью моделей высокого порядка замыкания), точностью проводимых оценок потоков, имеющихся экспериментальных данных о внутри- и межвидовом разнообразии параметров, характеризующих эмиссию CO₂ и его поглощение при фотосинтезе растительностью разных видов, возраста и состояния, а также требуемыми затратами машинного времени.

В основе разработанной 3D-модели лежит система усредненных уравнений Навье-Стокса и неразрывности (после разложения Рейнольдса) с использованием «полуторного» порядка замыкания (Mukhartova et al 2019):

$$\frac{\partial \bar{\vec{V}}}{\partial t} + (\bar{\vec{V}}, \nabla) \bar{\vec{V}} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla P - \left(\frac{\partial}{\partial x} \overline{u' \vec{V}'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{v' \vec{V}'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{w' \vec{V}'} \right) + \bar{\vec{F}}^{cor} + \bar{\vec{F}}^d + \bar{\vec{g}}, \quad \text{div } \bar{\vec{V}} = 0, \quad (1)$$

где $\bar{\vec{V}} = \{\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}\}$ — осредненная составляющая скорости, $\vec{V}' = \{u', v', w'\}$ — пульсации скорости, ρ_0 — средняя плотность воздуха, P — давление воздуха, $\bar{\vec{F}}^{cor}$ — сила Кориолиса, $\bar{\vec{g}}$ — ускорение свободного падения, $\bar{\vec{F}}^d$ — сила сопротивления растительности,

пропорциональная плотности фитомассы $PLAD(x,y,z)$, где $PLAI(x,y) = \int_0^{h(x,y)} PLAD(x,y,z) dz$, $PLAI$ — индекс фотосинтезирующей и нефотосинтезирующей фитомассы, $h(x,y)$ — высота растительности в точке (x,y) .

Для решения системы уравнений в работе использовано $E - \omega$ замыкание, при котором для турбулентной кинетической энергии E и функции $\omega = \varepsilon/E$ также формулируются уравнения типа “диффузия-реакция-адвекция”. В качестве входных данных использовалась информация о горизонтальной и вертикальной структуре растительного покрова, динамической скорости, средней скорости ветра над кронами деревьев и его преобладающем направлении, влажности и температуре воздуха, а также скорости эмиссии парниковых газов с поверхности почвы и элементов растительности.

Распределение концентрации диоксида углерода описывается уравнением 2:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\bar{V}, \nabla)C = \text{div}(K_c \nabla C) + F_b - F_{ph}, \quad (2)$$

где K_c — коэффициент турбулентной диффузии для C , F_b описывает источники CO_2 , обусловленные почвенным дыханием и автотрофным дыханием растений, а F_{ph} характеризует поглощение CO_2 растительностью при фотосинтезе. При известном пространственном распределении концентрации CO_2 турбулентный и адвективный потоки могут быть оценены следующим образом:

$$\bar{q}^{turb} = -K_c \nabla C, \quad q_x^{adv} = \bar{u} \text{sgn}(\bar{u}) \frac{\partial C}{\partial x}, \quad q_y^{adv} = \bar{v} \text{sgn}(\bar{v}) \frac{\partial C}{\partial y}, \quad q_z^{adv} = \bar{w} \text{sgn}(\bar{w}) \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (3)$$

где $\text{sgn}()$ равно 1, если выражение в скобках положительно, и минус 1, если отрицательно.

С помощью разработанной модели были вычислены горизонтальные и вертикальные потоки CO_2 на нескольких фиксированных высотах. Наибольшая неоднородность потоков отмечается вблизи границ различных растительных сообществ.

Сравнение смоделированных потоков с измерениями методом турбулентных пульсаций продемонстрировало достаточно хорошее согласование экспериментальных и модельных данных, причем отличие измеренных и вычисленных вертикальных потоков имеет порядок горизонтального потока, не учитываемого при измерениях методом турбулентных пульсаций.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 121051400081-7.

Литература

- Иванов Д.Г., Авилов В.К., Курбатова Ю.А. Потоки CO_2 на верховом болоте в южнотаежной зоне европейской части России в летний период // Сибирский экологический журнал. 2017. №2. С.109–118.
- Aubinet M., Vesala T., Papale D. Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. - Springer Atmospheric Sciences. Dordrecht, The Netherlands: Springer Verlag, 2012. 438 P.
- Bonan G.B., Pollard D., Thompson S.L. Effects of boreal forest vegetation on global climate // Nature. 1992. Vol. 359. P. 716–718.
- Burba G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. — Lincoln, Nebraska: LI-COR Biosciences. 2013.
- Norman J. M., Kucharik C. J., Gower S. T., Baldocchi D. D., Crill P. M., Rayment M., Savage K., Striegl R. G. A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102D, N. 28. P. 771–777.
- Mukhartova Yu. V., Dyachenko M.S., Mangura P.A., Mamkin V.V., Kurbatova J.A., Olchev A.V. Application of a three-dimensional model to assess the effect of clear-cutting on carbon dioxide exchange at the soil - vegetation - atmosphere interface // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 368. P. 1-9.
- Olchev A., Volkova E., Karataeva T., Novenko E. Growing season variability of net ecosystem CO_2 exchange and evapotranspiration of a sphagnum mire in the broad-leaved forest zone of European Russia // Environmental Research Letters. 2013. Vol. 8 (3). P.035051.
- Sogachev A. and Panferov O. Modification of two-equation models to account for plant drag // Bound. Layer Meteorol. 2006. Vol. 121 (2) P. 229-266.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ROMUL: АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ЛИТОЗЕМОВ СУБАНТАРКТИКИ

Надпорожская М.А.¹, Быховец С.С.², Абакумов Е.В.¹

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*
m.nadporozhskaya@spbu.ru

e.abakumov@spbu.ru

²*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения ФИЦ ПНЦБИ РАН, г. Пущино, Московская обл., Россия*
bykhovets@pbcras.ru

Аннотация: Результаты моделирования показали: а) адекватные натурным почвенную эмиссию CO₂, структуру органопрофилей литоземов с поверхностным и поверхностно-внутрипочвенным опадом зеленых мхов и щучки антарктической при разной орнитогенной нагрузке; б) стабилизацию запасов подстилки и органического вещества минерального профиля литозема за 200 и 500 лет, соответственно; в) дефицит полевых данных о качестве и запасах подстилки.

1. Введение

Почвы субантарктических береговых зон характеризуются значительными запасами органического вещества. Профильное распределение и качество органического вещества почв (ПОВ) – индикаторы среднесрочных (десятки лет) изменений факторов среды – в Антарктике изучены недостаточно. Математические модели являются общепризнанным инструментом для анализа экологического состояния почв. Модель ROMUL (Моделирование..., 2007) была применена в разных географических зонах, т.к. ее основные коэффициенты (минерализации и гумификации) определены в контролируемых лабораторных условиях. Проведенные (Надпорожская и др., 2017) вычислительные эксперименты с моделью ROMUL по анализу динамики ПОВ петрозема и литозема (Беллинсгаузен, п-ов Файлдс, о. Кинг-Джордж, архипелаг Южные Шетландские острова, Западная Антарктида) показали, что при росте среднегодовых температур на 1,6 °C за 40 лет запасы ПОВ и эмиссия CO₂ изменялись незначительно, структура органопрофиля литозема воспроизводилась корректнее, чем петрозема. Отмечен дефицит данных по качеству и количеству опада, водно-термическому режиму почвы. В целом первый опыт моделирования был признан удовлетворительным, работу продолжили с целью определения отклика ПОВ на варьирование природных факторов. Актуальна также ревизия экспериментальных материалов по почвам Субантарктики.

2. Объекты и методы

Вычислительные эксперименты проводили с литоземами о. Кинг-Джордж, формирующиеся на маломощных (до 30 см) рыхлых отложениях, подстилаемых массивной плитой, под зеленомошным или злаковым (щучка антарктическая) покровами, с учетом влияния орнитогенного фактора. Для климатических сценариев использованы данные по температуре почвы на глубине 10 см под моховым покровом и щучкой антарктической за период 25.03.2008 – 03.03.2009 (Абакумов, 2011) и данные наблюдений ст. Беллинсгаузен (температура воздуха) с сайта ААНИИ (Подпрограмма..., 2021) за то же время. Для имитации межгодовой изменчивости температуры почвы в 50-летних вычислительных экспериментах использовали средние месячные данные станции Беллинсгаузен по температуре воздуха за 1971–2020 гг. Чтобы проверить, влияет ли на результаты моделирования учет межсуточной изменчивости температур антарктического лета, были составлены сценарии с суточным шагом. Водный режим – без дефицита или избытка влаги. Исходные запасы в литоземе под зелеными мхами: подстилка 3,0 кг/м², C/N 30, ПОВ гумусового горизонта 1,5 кг/м², C/N 7,5 (Надпорожская и др., 2017). В качестве базового сценария опада использовали данные по опадку зеленого мха, полученные ранее методом

решения обратной задачи (spin-up) 55 г/(м² год). Количество опада щучки антарктической приняли равным массе опада зеленых мхов. Структура опада щучки: на почву 11 г/(м² год), опад корней по 22 г/(м² год) распределялся между подстилкой и органо-минеральным горизонтом поровну. Содержание N (%) в опаде зеленых мхов в базовом сценарии было 0,7%. При имитации орнитогенного влияния содержание N (%) в опаде брали по (Fabiszewski, Wojtuń, 2000): щучка стебли 1.40 и 2.61; щучка корни 0.90 и 2.28; зеленые мхи 1.00 и 1.65 – фон и 50 м от гнездовья пингвинов, соответственно.

3. Результаты и обсуждение

Вычислительные эксперименты по антарктическим литоземам под зелеными мхами и щучкой, при всей неопределенности исходных данных, показали реалистичную динамику запасов ПОВ, валовых C/N, почвенной эмиссии CO₂. Детальность учета температуры (использование среднесуточных или среднемесячных значений) слабо влияет на результаты расчетов. Показано, что разная локализация опада под зелеными мхами и щучкой антарктической формирует различные по структуре и качеству органо-профили. Обогащение азотом тканей растений за счет жизнедеятельности пингвинов, повышает интенсивность трансформации опада и усиливает гумификацию. Результаты среднесрочной (50-летней) имитации динамики запасов ПОВ литоземов с разной орнитогенной нагрузкой начинают существенно различаться при смене типа растительности и увеличении концентрации азота в опаде. Долгосрочные (при постоянных климате и опаде) вычислительные эксперименты показали, что стабилизация запасов подстилок и гумуса в условиях Субантарктики происходит через 200 и 500 лет соответственно. Рассчитанную почвенную эмиссию CO₂ в моделируемых диапазонах факторов почвообразования можно считать соответствующей результатам полевых измерений при условии, что большая часть валового дыхания обеспечена растительным покровом.

4. Заключение

Специфика неопределённости проведения вычислительных экспериментов для почв Субантарктики связана с ярко выраженным дефицитом полевых данных и пространственной неоднородностью почвенно-растительного покрова. Самым важным в настоящий момент является до-учет запасов и качества подстилок мощностью до 10 см. Также важно выбрать единую международную форму описания ключевых участков.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 19-54-18003 Болг_а.

Литература

- Абакумов Е.В. Почвы Западной Антарктики. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2011. 112 с.
- Карелин Д.В. Сравнение поверхностных потоков CO₂ в аналогичных экосистемах Арктики и Антарктики // География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов: К 100-летию проф. Н.И. Базилевич: Материалы конф. (Пущино, 19–22 апр. 2010 г.). М.: Ин-т географии РАН, 2010. С. 77–80.
- Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах / Отв. ред. В.Н. Кудяров. М.: Наука, 2007. 380 с.
- Надпорожская М.А., Абакумов Е.В., Хораськина Ю.С., Быховец С.С., Шанин В.Н., Комаров А.С. Оценка возможной динамики органического вещества почв Антарктиды при климатических изменениях с применением математической модели ROMUL // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 1. С. 57–65.
- Подпрограмма "Изучение и исследование Антарктики", Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ), <http://www.aari.aq>. Дата обращения 28.03.2021.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТОРЕГУЛИРУЮЩЕЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Немчинова А.В.

Автономная некоммерческая организация «Центр независимых социологических исследований» (ЦНСИ), г. Санкт-Петербург, Россия
nemanvic@rambler.ru

Аннотация: Проанализированы изменения метеорологических характеристик двух ландшафтов с различной сохранностью естественных лесов. Выявленные различия представлены в модели теории катастроф, демонстрирующей климаторегулирующую пластичность ландшафтов как способность переходить по состояниям равновесия в ответ на возмущения от вырубок и изменений климата без разрушения внутренних связей. Это обеспечивается структурной организацией лесов, компетентных поддерживать климатический режим.

1. Введение

Исследования связей биоты и климата характеризуются двумя альтернативными подходами с разным приоритетом их взаимозависимости. Климаторегулирующая роль биоты недооценивается (Горшков, Макарьева, 2006). Не решен вопрос различия механизмов климатического регулирования естественными лесами (ЕЛ) и восстанавливающимися после вырубок лесов (ВЛ). Цель исследования – изучение проявлений функциональной пластичности лесных экосистем на примере двух ландшафтов с разной сохранностью естественных таежных лесов в бассейне Северной Двины.

2. Методы

Анализ изменений метеорологических характеристик методами описательной статистики, дисперсионного и регрессионного анализа метеоданных (Global..., 2021; NOAA's..., 2019) в пакете программ Statistical10. Анализ облачности над ландшафтами на сценах Landsat (архив USGS EROS).

3. Результаты

Расчеты метеохарактеристик. Показаны примеры асинхронной динамики климатических показателей на сравниваемых ландшафтах (Немчинова и др., 2020). Общая картина результатов – проявление постепенных и скачкообразных их изменений, увеличение широт амплитуд и периодов колебаний, формирование новых областей притяжения. Получены свидетельства биотического регулирования теплового и ветрового режимов, влажности и облачности.

Описание применяемой модели. Выявленные различия поведения двух систем проанализированы применением модели теории катастроф, именуемой складкой (Jones, 1975). Особенности структурной организации естественных лесов (полночленность возрастной структуры, старовозрастность, полидоминантность и проч. (Немчинова, 2014), определяем параметрами модели, а выборки величин климатических переменных – оценками этих параметров. Удаление части лесного покрова в ландшафте стабилизируется отрицательной обратной связью через лесовосстановление и дальнейшую демутиацию (функциональный ответ). Дестабилизирующие эффекты – через положительную обратную связь динамики чистой продукции и изменения интенсивности испарения и температуры (Пузаченко, 2010), путем регулирования лесом альbedo, воздушных потоков и проч., в зависимости от параметров их структурной организации и колебаний в климатическом осцилляторе (численный ответ (Holling, 1973)). В визуализированном виде модель катастроф – график последовательного изменения состояний равновесия экосистемы вдоль осей переменных в виде кривой множества точек равновесия Mf , которые удовлетворяют условию $f(x; p) = 0$, (Jones, 1975). Траектория Mf эволюционирует в соответствии с уравнением:

$$dx/dt = f(x; p) \quad (1)$$

в некоторое состояние x^* , где $f(x^*; p) = 0$, где x – ключевая переменная или обобщенный (скалярный) климатический индекс, p – состояние параметров экосистемы во времени. При увеличении p система движется по многообразию и в точке сингулярности совершает катастрофический «прыжок» на верхнюю ветвь. Разрывность как свойство модели (Джефферс, 1981) показывается в нашей модели через комплекс климатических последствий нарушений. Гистерезис как реакция систем на возмущения – в виде динамики климатических переменных по разным путям возврата после реверсирования. Дивергенция проявляется как эволюционирование сходного начального состояния ландшафтов к состояниям, разделенным неустойчивым равновесием (Scheffer, 2001). Бимодальность выражаем как долю естественных лесов в ландшафтах (0 и 25%). Формула многочлена, который эквивалентен и обеспечивает складку катастрофы, (Jones, 1975):

$$f(x; p) = -(x^3 - x + p). \quad (2)$$

"Складки" возникают, когда $df/dx = 0$. Подбор формул многочленов и их графиков показал, что поведение модели варьирует в зависимости от значений p и угловых коэффициентов. Для описания ЕЛ подходят графики с кривой отклика, «складывающейся» под более крутым наклоном, что иллюстрирует высокую чувствительность к возмущениям (к нарушениям лесного покрова и/или к изменениям климата) и проявление упругой устойчивости (Свирижев, Логофет, 1978). Для ЕЛ подходят многочлены вида:

$$y = -(ax^3 - x + 1), a = 1.0, 2.0. \quad (3)$$

На ВЛ проявляется резистентная устойчивость, и подходят графики с более пологим расположением аттракторов, иллюстрирующие инертность экосистемы. Подходят многочлены:

$$y = -(x^3 - bx + c), (b, c) = (3.0, 1.0); (3.0, 2.0); (2.0, 1.0). \quad (4)$$

Крайний случай, когда реверсивная линия бассейна притяжения параллельна оси абсцисс, означает невозможность возврата на предыдущий уровень, как и в экосистеме с нарушенными внутренними связями теряется компетентность поддерживать климатический режим.

4. Заключение

Разная климаторегулирующая пластичность лесных экосистем может быть показана на графиках «складки» модели катастроф, отличающихся разным временем перехода к точке бифуркации, величиной разрыва при скачке, пологостью верхней ветви бассейна притяжения.

Работа выполняется в рамках проекта "Создание партнёрства между некоммерческими организациями, университетами и местными сообществами в целях информированности и поиска путей адаптации к изменению климата" (2019-2021гг.), при поддержке ЕК Евросоюза. Автор выражает благодарность коллегам: А.А. Кулясовой и др.

Литература

- Горшков В.Г., Макарьева А.М. Биотический насос атмосферной влаги как движущая сила круговорота воды на суше. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3, 2006, 2621-2673.
- Джефферс Дж. Введение в системный анализ: применение в экологии: Пер. с англ. / Под ред. и с предисл. Ю. М. Свирижева. — М.: Мир, 1981. — 256 с.
- Немчинова А.В. Оценка структурной деградации лесных экосистем и их восстановительного потенциала с помощью марковской модели сукцессии // *Вестник КГУ им.Н.А. Некрасова*, 2014, №7 (20). — С.70-75.
- Немчинова А.В., Кулясова А.А., Тысячнюк М.С., Чигалейчик Е.В. Снижение климатической и социальной пластичности в результате трансформации лесного покрова в северных регионах // *Расш. тез. доклад. II Всерос. науч. конф. «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны»*, М., ИГКЭ им. акад. Ю.А. Израэля, ИГ РАН, 2020. — с.210.

- Пузаченко Ю.Г. Климатическое пространство биосферы / География продуктивности и биогеохимического круговорота наземных ландшафтов: к 100-летию профессора Н.И. Базилевич. Мат-лы конф., М.: ИГ РАН, 2010. В 2-х ч, 670 с. с.100-113.
- Свирижев Ю.М., Д.О.Логофет. Устойчивость биологических сообществ. М: Наука, 1978, 352 с.
- Global Forest Watch (GFW). URL: <https://www.globalforestwatch.org/> (accessed 1.02.2021).
- Holling C. S. Resilience and stability of ecological systems / Resilience and Stability of Ecological Systems, Annual Review of Ecology and Systematic, V. 4, Institute of Resource Ecology, University of British Columbia. Vancouver. Canada, 1973, pp. 1-23.
- Jones D. D. The application of catastrophe theory to ecological systems, IIASA Research Report RR-75-15 (1975).
- NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI). URL: <https://www.ncei.noaa.gov/> (accessed 1.04.2019).
- Scheffer M. et al. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems / Nature, vol. 413, pp. 591-596.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИИ НАКОПЛЕНИЯ ПОЧВЕННО-ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩИ

Остроумов В.Е.¹

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

v.ostroumov@rambler.ru

Аннотация: Рассматривается модель формирования почвенно-осадочных последовательностей, предназначенная для реконструкции истории седиментогенеза и эволюции биоклиматических условий накопления континентальных осадочных образований. Прототип модели описывает образование последовательности как результат осадконакопления и трансформации осадка при почвообразовании, скорости которых изменяются во времени. Данные, полученные с помощью прототипа, в целом соответствуют измеренным распределениям свойств материала по глубине последовательностей. Однако, его использование приводит к потере отдельных пиков на кривых распределения свойств. Вероятная причина таких потерь связана с тем, что в прототипе свойства осадка, поступающего на поверхность почвы, принимаются неизменными. Чтобы предотвратить потери модель дополнена модулем учета динамики свойств осадочного вещества, поступающего на поверхность на старте почвообразовательной стадии эволюции материала последовательности. Модель с добавленным модулем динамики свойства поступающего на поверхность осадка позволяет более точно, чем прототип, рассматривать задачу о накоплении и почвообразовательной трансформации континентального осадка при формировании почвенно-осадочных последовательностей.

1. Введение

Почвенно-осадочная последовательность – совокупность слоев континентального осадочного материала, в большей или меньшей степени трансформированного при почвообразовании. Толщи осадков, образующих почвенно-осадочные последовательности, часто сложены алевритовым материалом, а также могут иметь другой гранулометрический состав. Они накапливаются в субэразальных и субаквальных условиях и, развиваясь на почвообразовательной стадии своей эволюции в зоне действия факторов почвообразования, трансформируются вплоть до состояния зрелых почвенных дневных или погребенных профилей. Почвенно-осадочные последовательности содержат подробные палеоклиматические записи, а история их накопления отражает эволюцию седиментогенеза и динамики биоклиматических условий. Для реконструкции истории формирования почвенно-осадочных последовательностей на количественной основе требуются модели, которые позволяли бы интерпретировать многочисленные и разнородные данные о составе и свойствах их материала с учетом существенной нелинейности как распределения этих свойств по разрезу, так и динамики биоклиматических условий во времени.

2. Прототип модели формирования почвенно-осадочных последовательностей

Разрабатывается модель формирования почвенно-осадочных последовательностей в континентальных осадочных бассейнах. В прототипе модели (Остроумов, 2019) образование последовательности описывается как результат двух взаимодействующих процессов. Первый из них – поступление на поверхность почвы осадочного материала с непостоянной во времени интенсивностью потока. Второй процесс – трансформация осадочного вещества при почвообразовании, когда его состав и свойства изменяются под влиянием факторов почвообразования. Скорость почвообразовательной трансформации также непостоянна во времени.

3. Прямая и обратная задачи о накоплении и почвообразовательной трансформации континентальных осадков

Модель позволяет рассматривать как прямую, так и обратную задачи о накоплении почвообразовательной трансформации осадка. Прямая задача представляет собой нахождение распределения показателей свойств материала в профиле почвенно-осадочной последовательности по заданным параметрам динамики интенсивности потока осадка, поступающего на поверхность, и динамики скорости его почвообразовательной трансформации. В случае обратной задачи модель позволяет определять показатели динамики интенсивности потока осадка и динамики скорости его почвообразовательной трансформации по измеренному распределению показателей свойств в профиле почвенно-осадочной последовательности.

4. Систематическая потеря пиков в распределении показателей свойств материала почвенно-осадочной последовательности при использовании прототипа модели

Тестирование прототипа на разрезах последовательностей верхнеплейстоценового возраста показало, что модель позволяет описывать общий характер динамики интенсивности потока осадка и динамики скорости почвообразовательной трансформации. Распределения показателей свойств в профилях последовательностей, рассчитанные с помощью прототипа модели, в целом соответствуют измеренным распределениям и отражают общий характер режима осадконакопления и истории биоклиматических изменений в районах накопления последовательностей. Однако, при использовании прототипа, в расчетных кривых систематически теряется ряд важных особенностей измеренных распределений показателей свойств материала последовательностей. Вероятная причина потерь связана с тем, что в прототипе модели принимается, что поступающий на поверхность осадок имеет постоянные во времени состав и свойства.

5. Модуль учета динамики показателей свойств осадка

Для учета изменений во времени свойств осадка, поступающего на поверхность, прототип модели дополнен модулем, который описывает динамику показателей свойств осадка при его поступлении на поверхность. Входные данные модуля могут быть заданы в табличной форме или в виде функций, аппроксимирующих динамику изменения показателей свойств осадка. На выходе модуля формируется массив степеней трансформации осадка, данные из которого учитываются в модулях расчета степени трансформации в почвенном профиле. Модель с этим модулем описывает формирование почвенно-осадочной последовательности не только за счет поступления на поверхность осадочного материала и его почвообразовательной трансформации, как в прототипе, но и с учетом временной изменчивости свойств выпадающего осадка. Пример распределения степени трансформации осадка, вычисленной с помощью прототипа модели и с использованием добавочного модуля, показан на рисунке.

Учет непостоянства состава осадка на старте почвообразовательной стадии его развития позволяет воспроизводить пространственные неоднородности последовательности, которые теряются при использовании прототипа.

6. Реконструкция почвенно-осадочной последовательности с учетом непостоянства свойств осадка при его поступлении на поверхность

Работа модели рассмотрена на примере почвенно-осадочной последовательности толщи плейстоценовых осадков, вскрытых в обнажении «Володарка». «Володарка» - один из

наиболее полно и всесторонне изученных опорных разрезов плейстоцена юга Сибири (Архипов и др., 1973; Большаков, 2007; Головина, Волкова, 2011; Зыкина, Зыкин, 2012; Дергачева, Пономарев, 2014) с зафиксированной инверсией магнитного поля (Большаков, 2007, 2015) и другими подробными седиментологическими и палеоклиматическими записями. Толща сложена суглинком с серией погребенных почв и южным карбонатным среднemosным черноземом на дневной поверхности (Дергачева, Пономарев, 2014).

Распределения степени трансформации, вычисленные с помощью прототипа и с использованием добавленного модуля, сравнивали с величинами степени трансформации осадка, найденными по измеренным значениям оптической плотности. Учет непостоянства состава осадка на старте почвообразовательной стадии его развития позволяет воспроизводить на модельных кривых пики, которые теряются при расчетах с использованием прототипа модели.

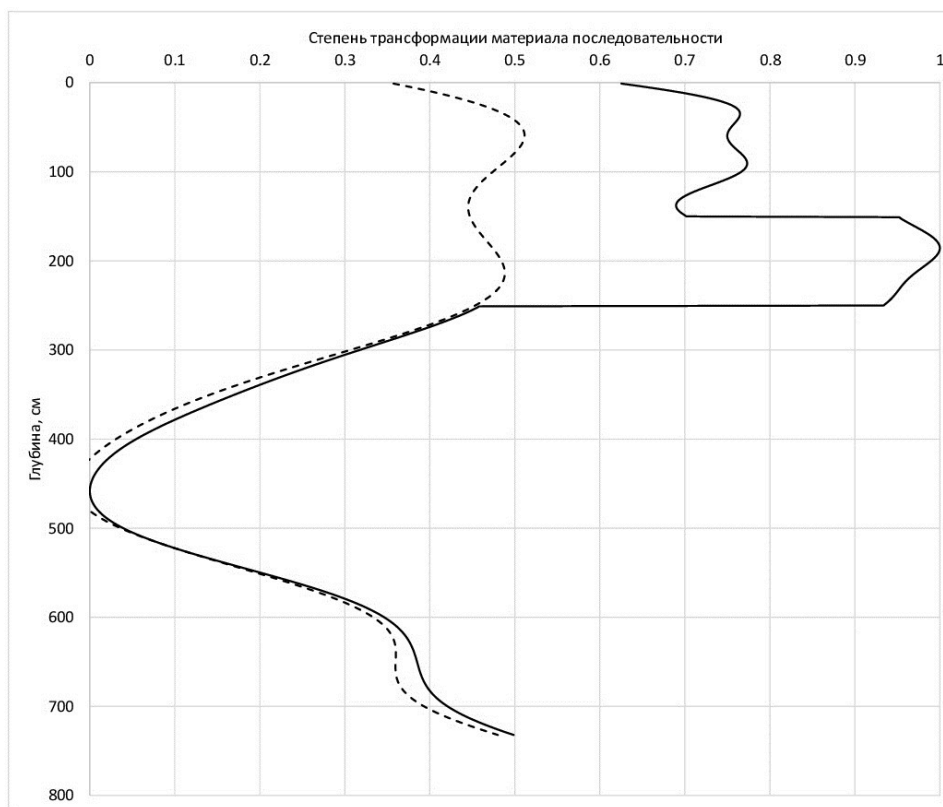


Рисунок – Распределение степени трансформации материала по глубине почвенно-осадочной последовательности, вычисленное с помощью прототипа модели (пунктир), и с учетом изменчивости состава осадочного вещества при его поступлении на поверхность почвы (сплошная кривая)

В качестве свойства материала последовательности, отражающего степень трансформации вещества за счет почвообразования, в примере использована оптическая плотность почвы. Значения оптической плотности измерялись как обратные величины яркости точек на фотографии толщи в обнажении. Найденные таким образом величины оптической плотности связаны с содержанием органического углерода в современных и погребенных почвах черноземного ряда, которые входят в последовательность. Данные по органическому углероду в разрезах, связанных с дневной и погребенными почвами последовательности, взяты в работе М. И. Дергачевой и С. Ю. Пономарева (2014). Связь между оптической плотностью и содержанием органического углерода в изучаемой толще хорошо аппроксимируется полиномом 2-й степени ($R^2=0.905$). Оптическая плотность,

измеренная по фотографии, имеет мало общего с физическими спектрами отражения или поглощения почвы или ее органических компонентов. Однако, тесная связь оптической плотности с содержанием органического углерода позволяет использовать оптическую плотность в качестве показателя степени трансформации осадка при почвообразовании в практических целях. В отличие от содержания органического вещества и многих других показателей свойств почвы, измерение оптической плотности не требует трудоемких лабораторных работ и легко выполняется по фотографии натурального объекта. Простота и хорошая воспроизводимость измерений в данном случае дает возможность получать многие сотни замеров для толщи, в пределах которой имеется не больше двух десятков точек определения содержания органического углерода. Использование оптической плотности, измеренной по фотографии, существенно увеличивает детальность распределения свойств материала почвенно-осадочной толщи и обеспечивает получение массива измеренных данных, достаточного для работы с моделью.

7. Заключение

Реконструкция механизма и условий образования почвенно-осадочных последовательностей требует учета временной изменчивости свойств осадка, поступающего на поверхность почвы в начале почвообразовательной стадии формирования осадочного материала.

Прототип модели образования континентального осадка и его почвообразовательной трансформации дополнен модулем, который описывает динамику свойства вещества, поступающего на поверхность почвы при осадконакоплении.

Модуль динамики свойства поступающего на поверхность осадка позволяет учитывать неоднородности распределения свойства материала в разрезе толщи, которые не связаны с трансформацией осадка при почвообразовании на месте образования последовательности, а определены составом и строением осадка при его поступлении на поверхность на старте почвообразовательной стадии.

Модель с добавленным в нее модулем динамики свойства поступающего на поверхность осадка позволяет более точно, чем прототип, рассматривать задачу о накоплении и почвообразовательной трансформации континентального осадка при формировании почвенно-осадочных последовательностей.

Благодарности. Работа выполнена по теме госзадания АААА-А18-118013190181-6 «Экосистемы вечной мерзлоты Арктики и Антарктиды в условиях изменяющегося климата»

Литература

- Архипов С. А., Галкина Л.И., Зудин А.Н., Липагина В. Я. Биостратиграфия и палеомагнетизм плиоцен-четвертичных толщ Приобского плато // Плейстоцен Сибири с смежных областей. М.: Наука, 1973, с. 95 -103.
- Большаков В. А. Новые данные магнитного и палеомагнитного изучения разреза Володарка на реке Обь // Физика Земли, 2007, №2, с.66-74.
- Большаков В. А. О соотношении количества ледниковых циклов хрона Брюнес, выделяемых в глубоководных и континентальных разрезах // Физика Земли, 2015, №5, с.20-41.
- Головина А. Г., Волкова В. С. Проблема объема эоплейстоцена юго-востока Западносибирской плиты в связи с понижением нижней границы квартера //Квартер во всем его многообразии: Материалы VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода. Апатиты, 2011, с. 137-140.
- Дергачева М. И., Пономарев С. Ю. Морфогенетические особенности почв с древними признаками почвообразования восточной части Приобского плато //Вестник Омского государственного университета, №6, 167, 2014, с. 207-212.
- Зыкина В. С., В.С. Зыкин В. С. Лессово-почвенная последовательность и эволюция природной среды и климата Западной Сибири в плейстоцене. Новосибирск: Гео, 2012, 477 с.
- Остроумов В. Е. Моделирование формирования почвенно-осадочных последовательностей//Математическое моделирование в экологии: Материалы VI Национальной конференции, Пущино, 2019, с.145-150.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЮЖНОЙ СИБИРИ ЗА ПЕРИОД НАБЛЮДЕНИЙ НА СТАНЦИЯХ СЕТИ WOUDC

Парфенова Е.И.¹, Чебакова Н.М.¹, Бажина Е.В.¹

¹*Институт леса им. В.Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия*

lana02611@rambler.ru

ncheby@ksc.krasn.ru

genetics@ksc.krasn.ru

Аннотация: Проанализирована динамика флуктуаций концентраций общего содержания озона (ОСО) над территорией юга Ангаро-Енисейского макрорегиона за период 1974-2017 г.г. в течение вегетационных периодов (май-август) для оценки уровня угроз воздействия УФ-В на биосистемы. Показания на станциях Красноярск и Иркутск, расположенных на расстоянии 850 км, изменяются синхронно ($r = 0.95$). Величина флуктуаций ОСО тесно связана с температурным режимом ($r = -0.78$).

1. Введение

Состояние растительного покрова крупных территорий является биоиндикатором процессов в окружающей среде. В последние десятилетия исследователями на всех континентах северного полушария отмечалось явление усыхания темнохвойных лесов (Манько, Гладкова, 2001). Какие процессы в окружающей среде индицирует усыхание темнохвойных лесов Южной Сибири? Наиболее популярными гипотезами о причинах этого явления можно считать иссушение климата, антропогенное промышленное загрязнение воздуха (кислотные дожди), инвазии насекомых и фитопатогенов.

Глобальный (циркумполярный) характер явления усыхания темнохвойных видов наводит на мысль о том, что и причина должна быть такого же, крупного континентального масштаба. С этой точки зрения следует обратить внимание на такие атмосферные факторы как стратосферный озон и жесткий ультрафиолет (UV-B). Известно, что стратосферный озон является фильтром, защищающим все живое (и неживое) от губительного воздействия жесткого ультрафиолетового излучения (Биоиндикация..., 2006; Кашкин и др., 2015). Жесткий ультрафиолет ($\lambda \sim 290-315$ нм) вызывает у человека и животных болезни глаз и кожи, а у растений повреждает фотосинтетический и генеративный аппарат (Solomon, 2008). Из этого следует, что вегетационный (теплый) период является наиболее опасным для воздействия ультрафиолетового излучения. В середине прошлого века создана система станций слежения за уровнем UV-B для оперативного предупреждения опасных ситуаций, т.к. падение величины ОСО, например, на 5% может вызвать увеличение интенсивности УФ-В на 20%. В работах (Зуев и др., 2009; Зуев и др., 2017) в качестве причины усыхания темнохвойных лесов в регионе гор Южной Сибири выдвигается истощение ОСО.

Целью нашей работы было проанализировать динамику флуктуаций концентраций ОСО на метеостанциях в регионе гор Южной Сибири для оценки уровня угроз воздействия УФ-В на биосистемы.

2. Объекты и методы

Существует мировая сеть регулярных наблюдений за концентрацией ОСО и УФ-В (WOUDC - World Ozone and Ultraviolet Data Center: <https://woudc.org/data/explore.php>) на локальных станциях, но на территории Сибири она очень редкая. Мы использовали данные двух станций, находящихся на юге региона имеющих ряды данных с 1974 по 2018 г.г.: Иркутск (52,26°с.ш.; 104,35°в.д.; 467 м) и Красноярск (56,00°с.ш.; 92,88°в.д.; 274 м). Для каждой станции из всего массива данных были выбраны среднемесячные данные за вегетационный период (май-август) и найдены их отклонения (в %) относительно средней за весь период наблюдений, в рамках вегетационного периода. На рис. 1. показаны величины и

знаки отклонений ОСО регистрируемого месяца и года. Также был проведен сопряженный анализ ОСО со среднемесячными величинами температур и осадков, наблюдаемыми на станциях.

3. Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показаны отклонения (% от средней) среднемесячных концентраций ОСО за период 1974-2017 г.г. (летние месяцы – май-август) по станциям Красноярск и Иркутск. Очевидно, что наибольшие отрицательные аномалии ОСО наблюдались на обеих станциях в 1974, 1977, 1978, 1980, 1991, 1996, 1998, 2004, 2006, 2010, 2014 и 2015 годах. Чтобы связать усыхание древостоев, например, на хр. Хамар-Дабан с фактами снижения ОСО, требуются массовые целенаправленные наблюдения, т.к. существуют сложности с точной датировкой поражения. Флуктуации на станциях Красноярск и Иркутск скоррелированы на (0.95). При этом за период наблюдений можно отметить слабый отрицательный тренд ОСО.

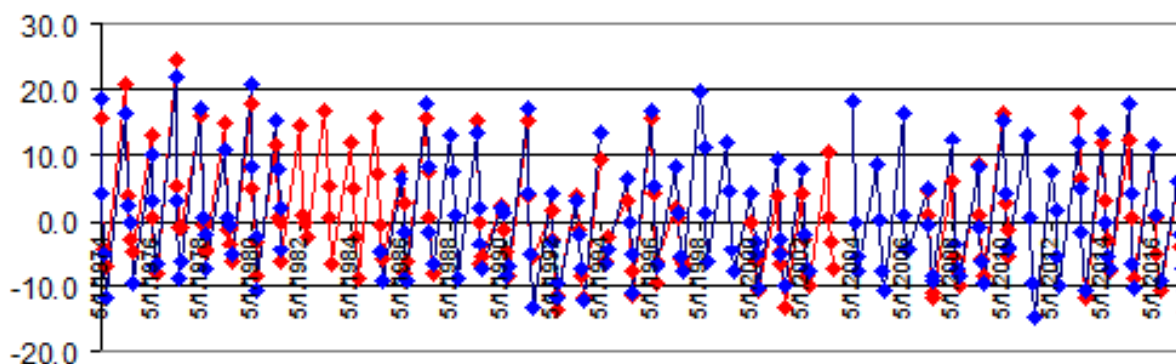


Рисунок 1 – Флуктуации ОСО (в % от средней) на станциях Красноярск (синий цвет) и Иркутск (красный цвет)

Флуктуации ОСО (рисунок 2) связаны отрицательной связью со среднемесячной температурой ($r = -0.78$) и с месячной суммой осадков ($r = -0.32$), что может привести к истощению ОСО, а, значит, усилению отрицательного влияния УФ-В на биосистемы при прогнозируемом потеплении климата к концу века.

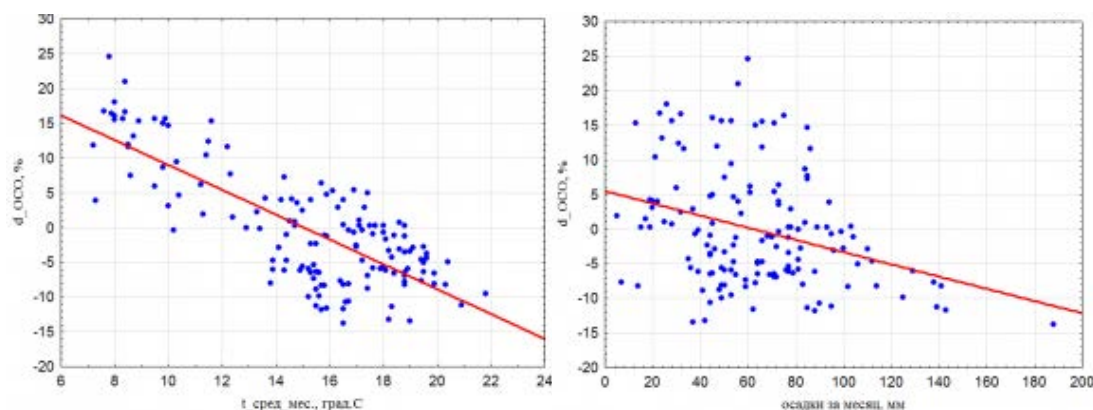


Рисунок 2 – Связь отклонений ОСО (в % от средней) со среднемесячными температурами (слева) и месячной суммой осадков (справа) для станции Красноярск

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта №19-45-240004p_a «Прогноз эколого-экономического потенциала возможных «климатических» миграций в Ангара-Енисейском макрорегионе в меняющемся климате 21-го века» и гранта РФФИ №20-05-00540.

Литература

- Биоиндикация стратосферного озона/ под общей. ред. В. В. Зуева ; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т оптики атмосферы [и др.]. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2006. — 228 с. — (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 10).
- Зуев В. В., Бондаренко С. Л., Савчук Д. А., Бочаров А. Ю. 2009. Зонирование территории для целей лесовосстановления по изменениям общего содержания озона в атмосфере (на примере Томской области)// География и природные ресурсы. 2009. №3, с. 42-47.
- Зуев В. В., Зуева Н. Е., Короткова Е. М., Павлинский А. В. Влияние истощения озонового слоя на процессы деградации хвойных лесов южных регионов Сибири// Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30, № 1. – С. 27–34. – DOI: 10.15372/AOO20170104.
- Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 184 с.
- Манько Ю.И., Гладкова Г.А. Усыхание ели в свете глобального ухудшения темнохвойных лесов. Владивосток. Дальнаука. 228 с.
- Solomon K.R. 2008. Effects of ozone depletion and UV-B radiation on humans and the environment, Atmosphere-Ocean, 46:1, 185-202, DOI: 10.3137/ao.460109

ПРИМЕНЕНИЕ АНСАМБЛЕВОГО ПОДХОДА ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ АРЕАЛОВ САМЫХ ОПАСНЫХ ИНВАЗИОННЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ РОССИИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Петросян В.Г.¹, Осипов Ф.А.¹, Кривошеина М.Г.¹, Дергунова Н.Н.¹, Хляп Л.А.¹

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

vgpetrosyan@gmail.com

osipov_feodor@mail.ru

kriv2260@rambler.ru

nndergunova@gmail.com

khlyap@mail.ru

Аннотация: представлены результаты оценок динамики ареалов самых опасных инвазивных видов растений России и сравнительного анализа экологических ниш в нативной и инвазионной частях их ареалов, полученные путем использования различных типов моделей и их ансамблей для условий современного климата, а также при различных сценариях его глобальных изменений в рамках международного протокола CIMP 6.

1. Введение

Изменение климата и воздействие инвазионных видов (ИВ) широко признаны во всем мире как угрозы биоразнообразию, экосистемам и благополучию людей. Совместное воздействие глобального изменения климата и ИВ существенно усиливает эти угрозы, что требует принятия неотложных мер для минимизации отрицательных последствий в экологических, социально-экономических и медицинских сферах. Это определяет особую важность прогноза биологических инвазий растений, которые наносят существенный ущерб природным и искусственным экосистемам, здоровью населения и экономике страны. В докладе представлены результаты моделирования ареалов 29 самых опасных ИВ сосудистых растений из списка ТОП-100 (Самые ..., 2018) при альтернативных сценариях изменения глобального климата на базе ансамбля моделей глобального климата новой генерации (CIMP 6). Цель работы – создание ансамблевых прогнозных моделей пространственного распределения видов (ESDM) и нишевых моделей (EENM) при альтернативных сценариях изменения климата и землепользования в 2021-2100 гг. с шагом 20 лет.

2. Материалы и методика исследований

На основе изучения музейных образцов, записей из базы данных международных центров коллективного пользования (GBIF, CABl, Early detection and distribution mapping system) по биоразнообразию и опубликованных с нашим участием данных (Самые ..., 2018) мы разработали векторно-растровую базу данных точек находок (ТН) растений в нативной и инвазионных частях ареалов (28576 и 12649 ТН соответственно) и 8 слоев предикторных переменных по климату, рельефу и землепользованию. Нативные части ареалов растений расположены в Северной и Центральной Америке, в Европе, на Кавказе и в Азии (Северо-восточной, Центральной, Восточной, в Гималаях и Японии). После анализа 40 моделей глобального изменения климата (CIMP 6) были выделены три группы моделей: высоко-, средне- и низко чувствительные. Для каждой группы моделей созданы растровые слои семи биоклиматических предикторов для четырех сценариев ssp-126, 245, 370, 585 с шагом 20 лет для периода 2020-2100 гг. Модели землепользования при различных сценариях изменения климата получены с помощью глобальной модели IMAGE3 (Integrated Assessment..., 2014). Ансамблевые модели ареалов (ESDM) созданы с использованием набора из 7 индивидуальных моделей (GLM, GAM, GBM; RF, FDA, ANN, MaxEnt). При создании ансамблевых моделей ESDM использовали 10 запусков индивидуальных моделей со случайным выбором тестовых (70%) и обучающих выборок (30%). Модели реализованных экологических ниш видов построены с использованием общей концепции, представленной в

работах (Petrosyan et al., 2019, 2020). Оценка перекрытия ниш проводилась на основе индексов Шонерса (Schoener's) (D). Чтобы охарактеризовать изменения экологических ниш в многомерном экологическом пространстве в условиях текущего климата, для каждого инвазионного вида рассчитывали три показателя: индекс стабильности (S) - это доля ниш, используемых видом в инвазионной части его ареала, которая в многомерном экологическом пространстве пересекается с присутствием вида в условиях текущего климата; индекс расширения (E) - это доля ниш, освоенных видом в инвазионной части ареала, но неиспользованных в условиях текущего климата; индекс незаполнения (U) - это доля ниш, незанятых видом в инвазионной части ареала вида, но которые освоены в условиях текущего климата. Поскольку эти индексы оцениваются в пространстве важнейших переменных, определяющих характер пространственного распределения видов, то индекс расширения характеризует сдвиги ниш в инвазионной части ареала. Точность пригодности индивидуальных моделей SDM и ансамблевых моделей ESDM приводили с помощью индекса Бойса (Petrosyan et al., 2020). Все оценки проводились в среде R v. 3.6.2 с использованием базовых, специальных R-пакетов (Biomod2, Raster, Ecospat, ENMTools) и дополнительных функций, созданных нами для оценки пригодности моделей.

3. Результаты и обсуждение

Для понимания процессов освоения новых территорий инвазионными видами мы провели количественную оценку перекрытия ниш в условиях текущего климата и далее во времени при различных сценариях изменения климата с использованием ансамблей моделей. Первая и вторая компоненты, которые объясняют 84% общей вариации предикторных переменных, это суточная амплитуда температуры ($R=0.32$) и сумма осадков сухого месяца года ($R=0.52$). Остальные переменные объясняют лишь незначительную долю общей вариации и не включены в сравнительный анализ. Наши результаты с использованием ESDM и EENM показали, что для растений индекс стабильности варьируется в среднем от 39% до 99% в зависимости от реализации типа модели и сценариев изменения климата. Для высокочувствительных моделей (Hsens) при реализации сценарии ssp585 к 2100 году индекс стабильности составит $S=68\%$, а индекс расширения $E=32\%$. Для средне- (Msens) и низко- (Lsens) чувствительных моделей при реализации сценарии ssp585 к 2100 году вышеуказанные индексы составят: Msens: $S=81\%$, $E=19\%$; Lsens: $S=92\%$; $E=8\%$. Рекордсменом по возможному расширению ареалов при потеплении климата является *Ambrosia trifida* (амброзия трехраздельная), для которой проценты расширения ареалов к 2100 году характеризуются следующими значениями: Hsens: $S=61\%$, $E=39\%$; Msens: $S=67\%$, $E=33\%$; Lsens: $S=80\%$, $E=20\%$. Несмотря на высокие показатели S, индексы сходства Шонерса низкие ($D=0.37\pm0.09$), и гипотеза сходства экологических ниш подтверждается для 25 видов. В итоге на основе анализа ESDM и EENM моделей показано, что расширение ареала изученных видов при реализации моделей изменения климата (Hsens, Msens, Lsens) сопровождается повышением плотности видов при сценарии ssp126, а при других сценариях (ssp245, ssp370 и ssp585): как повышением плотности, так и расширением ареалов в широтном (с юга на север) и долготном (с запада на восток) направлениях.

Исследования поддержаны грантом Российского научного Фонда № 21-14-00123.

Литература

- Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100). Отв. ред. Дгебуадзе Ю.Ю., Петросян В.Г., Хляп Л.А. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2018. 688 с.
- Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0. Eds. Stehfest E., van Vuuren D.P., Kram T., Bouwman L. Netherlands Environmental Assessment. The Hague, 2014, ISBN: 978-94-91506-71-0, 370 p.
- Petrosyan V.G., Osipov F.A., Bobrov V.V., Dergunova N.N., Danielyan F.D., Arakelyan M.S. Analysis of geographical distribution of the parthenogenetic rock lizard *Darevskia armeniaca* and its parental species (*D. mixta*, *D. valentini*) based on ecological modeling // Salamandra, 2019, 55(3), p.173–190

Petrosyan V, Osipov F, Bobrov V, Dergunova N, Omelchenko A, Varshavskiy A, Danielyan F, Arakelyan M (2020)
Species distribution models and niche partitioning among unisexual *Darevskia dahli* and its parental bisexual
(*D. portschinskii*, *D. mixta*) rock lizards in the Caucasus // Mathematics 8 (8).
<https://doi.org/10.3390/math8081329>.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ОКОН В ПОЛОГЕ СТАРОВОЗРАСТНОГО ШИРОКОЛИСТВЕННОГО ЛЕСА НАЗЕМНЫМИ И ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Портнов А.М.¹, Быховец С.С.¹, Дин Е.С.², Иванова Н.В.³, Фролов П.В.¹, Шанин В.Н.¹,
Шашков М.П.¹

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

alekseyportnow@gmail.com

s_bykhovets@rambler.ru

²*Российский университет дружбы народов, Москва, Россия*

zhenka.din@inbox.ru

³*Институт математических проблем биологии РАН – филиал Института прикладной
математики им. М.В. Келдыша РАН, Пущино, Россия*

Natalya.dryomys@gmail.com

ximikadze@gmail.com

shaninvn@gmail.com

max.carabus@gmail.com

Аннотация: в нашей работе мы сравнили результаты выделения ветровальных окон на постоянной пробной площади (ППП) в заповеднике "Калужские засеки" двумя разными методами (аэросъёмка и наземные измерения). Мы обнаружили, что аэрофотосъёмка раскрывает более сложную структуру окон, по сравнению с результатами, полученными с помощью наземных измерений, что это обуславливает определённые расхождения в форме и площади выделенных окон.

Введение

Ветровальными окнами называют разрывы лесного полога, вызванные вывалом деревьев первого яруса. Такие нарушения имеют существенное экологическое значение, поскольку в них, по сравнению с пологом, наблюдаются другие условия (в первую очередь освещённость), и может происходить возобновление светолюбивых видов, которые под пологом не возобновляются (Восточноевропейские..., 1994, с. 69).

Целью нашей работы было оценить расположение и площадь ветровальных окон на постоянной пробной площади в заповеднике "Калужские засеки", применяя как наземные, так и дистанционные методы, и сравнить полученные с их помощью результаты.

Объекты и методы

Пробная площадь заложена на участке старовозрастного полидоминантного широколиственного леса в 1986-88 годах под руководством О.В. Смирновой, в 2016-18 был проведен повторный переcчёт. Размер пробной площади 10.8 га (200 × 540 м). Древостой имеет ярусную структуру и состоит из дуба (*Quercus robur* L.), ясеня (*Fraxinus excelsior* L.), липы (*Tilia cordata* Mill.), клена остролистного (*Acer platanoides* L.) и полевого (*Acer campestre* L.), вяза (*Ulmus glabra* Huds.), березы (*Betula* L.) и осины (*Populus tremula* L.).

Для анализа использована серия разносезонных ортофотопланов, полученных в результате аэрофотосъёмки при помощи квадрокоптера. Определение формы и размеров ветровальных окон по данным аэрофотосъёмки мы осуществляли в несколько шагов. Сначала по фотографиям в программе Agisoft Metashape (Agisoft, LLC, 2021) строили цифровую модель поверхности – DEM (Digital elevation model). Далее обрабатывали ее в программе QGIS (QGIS development team, 2021) с помощью "Калькулятора растров". Нормировали высоты точек: из высоты каждой точки вычитали минимальную высоту, таким образом высоты переводили из системы отсчёта, связанной с уровнем моря, в локальную.

Далее для оценки пороговых значений для выделения окон в пологе леса с помощью языка R (R Core Team, 2021) строили гистограммы распределения высот древостоя (рис. 1)

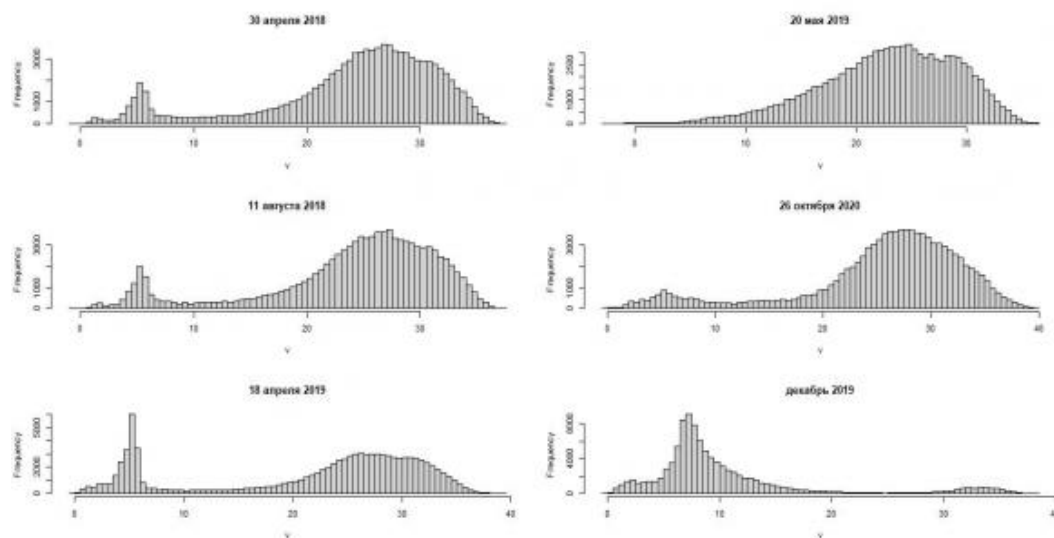


Рисунок 1. Гистограммы распределения высот древостоя на пробной площади, полученные в разные сезоны.

На основании наблюдаемых на гистограммах распределений, мы сформулировали гипотезу о существовании нескольких классов окон, с более высоким и более низким подростом, предположительно, различающихся возрастом. На заключительном этапе с помощью “Калькулятора растров” мы разбивали файл на три класса по высоте подроста: 0-10, 10-15 и 15-20 метров. На рисунке 2 эти классы обозначены красным, фиолетовым и синим цветами соответственно. Полученный результат векторизовали, все не интересующие нас (не относящиеся к окнам) точки из него удаляли. Таким образом, были получены векторные файлы с расположением окон для нескольких лет и сезонов, и рассчитана их площадь с помощью “Калькулятора полей” QGIS.

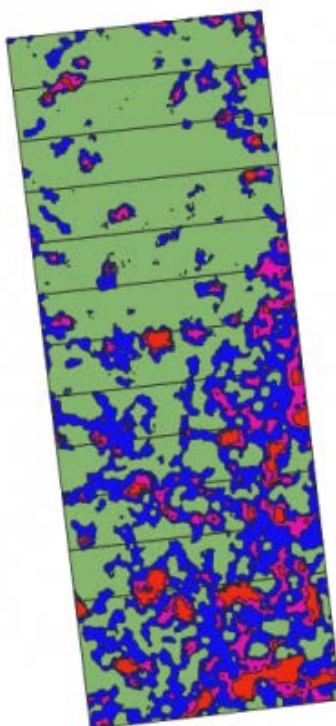


Рисунок 2. Схема расположения окон на постоянной пробной площади, выделенных по данным аэрофотосъёмки 04.06.2021. Красный цвет – высота древостоя меньше 10 метров, фиолетовый – 10-15, синий – 15-20, зелёный – больше 20.

Кроме того, на постоянной пробной площади проведено выборочное картографирование окон наземными методами. Определение формы и размера окна при помощи полевых измерений производили от опорной точки. В качестве этой точки внутри ветровального окна (максимально близко к его предполагаемому геометрическому центру) выбирали ориентир. Так как большая часть деревьев постоянной пробной площади пронумерованы и их координаты зафиксированы, обычно это было одно из таких известных деревьев. В случае отсутствия поблизости от геометрического центра окна стоящих деревьев, мог использоваться визуально различимый на ортофотоплане валёж с записанными координатами. Затем от данной опорной точки осуществляли измерение расстояний до границ окна по 8 магнитным азимутам (от 0 до 360 градусов, с шагом в 45). Границы окна определялись нами экспертно, по границам проекции крон деревьев первого яруса. После этого внутри окна измеряли высоты примечательных деревьев и записывали их номера, или, в случае отсутствия номеров, описывали расположение. Всего картографировано 11 окон разного размера, возраста и состава подроста (подлеска).

После этого выполняли сопоставление результатов полевых измерений и данных, полученных в результате обработки материалов аэрофотосъёмки, проведённой в ходе того же полевого выезда. Для этого в программе QGIS определялась площадь окон. В случае наземной съёмки каждое окно строилось как один полигон и площадь окна является площадью этого полигона, спроецированного на соответствующую систему координат (WGS84 UTM 36N). В случае аэрофотосъёмки площадь определялась как сумма площадей полигонов, расположенных в экспертно определённых границах окна.

Результаты и их обсуждение

Было выяснено, что аэрофотосъёмка позволяет выявить значительно более сложную структуру окон, чем наземная. На цифровой модели поверхности видно, что окна часто переходят одно в другое через узкие перешейки, имеют небольшие вкрапления окон другого уровня. Древостой высотой 15-20 метров (синий цвет на снимке) вообще образует огромную непрерывную лабиринтоподобную структуру, охватывающую практически всю южную половину постоянной пробной площади.

Учитывая это, понятие границ окна в контексте аэрофотосъёмки является более размытым, чем при наземной съёмке и затрудняет сопоставление. Несколько окон являются частью этого лабиринта без видимых границ и их отдельную площадь оценить не представляется возможным. В большинстве остальных случаев для этого из расчёта приходится исключить участки с древостоем высотой 15-20 метров. Полученные путём анализа полученной из результатов аэрофотосъёмки площади окон составляют в среднем 97% от площадей, полученных при наземной съёмке, но с очень большим разбросом (от 45% до 169%). Площади существенно менее 100% являются результатом исключения участков с высотой полога 15-20 м, в то время как площади более 100% – результатом неправильного определения формы окна при наземной съёмке.

Выводы

Таким образом, мы пришли к выводу, что для наземного определения границ окон необходимы более точные методы, чем применённый нами метод определения по проекции крон деревьев первого яруса.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 18-14-00362-П.

Литература

- Восточноевропейские широколиственные леса /Р.В.Попадюк, А.А.Чистякова, С.И.Чумаченко и др.; Под ред. О.В.Смирновой - М.: Наука, 1994 - 364 с.
- Agisoft LLC. Agisoft Metashape (Version 1.7.2) (2021), St. Petersburg, Russia. Available at: <https://www.agisoft.com> (дата обращения: 26.07.2021).
- QGIS development team. QGIS geographic information system. Open source geospatial foundation project. (Version 3.16.11) (2021). Available at: <http://qgis.osgeo.org> (accessed 17.01.2021)
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing (Version 4.0.5) (2021), Vienna, Austria. Available at: <https://www.R-project.org/> (accessed 17.01.2021)

АГРЕГАЦИИ КОЛЛЕМБОЛ НА ПОЛЯХ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ: СТРУКТУРЫ В «БЕССТРУКТУРНОЙ» СРЕДЕ

Потапов М.Б.¹, Бокова А.И.¹, Кузнецова Н.А.¹, Панина К.С.¹, Сараева А.К.²

¹Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

mpnk-abroad@yandex.ru

anbok.mpgu@gmail.com

mpnk@yandex.ru

paninaxeniya@yandex.ru

²Институт леса Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия

saraeva68@inbox.ru

Аннотация: распределение мелких малоподвижных членистоногих-коллембол в однородной пахотной почве изучали методом мультимасштабного учета. У отдельных видов обнаружены агрегации размером от нескольких дециметров до метров, не коррелирующие с абиотическими факторами среды. Предполагается ведущая роль случайности в процессах выживания, размножения и расселения, что вносит вклад в понимание пространственной организации популяций полезной фауны агроценозов.

1. Введение

Объект наших исследований - мелкие (около 1 мм) почвенные членистоногие-коллемболы, участвующие в процессах деструкции органического вещества как потребители грибов и пр. (Hopkin, 1997). Известно, что традиционные сельскохозяйственные практики обычно сокращают разнообразие и численность коллембол. Однако этой группе удается сохранять на полях достаточно высокие ценотические показатели (Bengtsson et al., 2005). В данной работе мы проверяли предположение, что относительная успешность коллембол в этих преобразованных местообитаниях основана на пространственном разделении ресурсов. Показателем такого разделения можно рассматривать наличие скоплений разных видов коллембол в разных локусах пространства.

2. Материал и методы

Нами использован мультимасштабный гнездовой дизайн учетов, близкий к фрактальному (Marsh, Ewers, 2013). Пробы и их группы располагали в вершинах равносторонних треугольников со стороной 10 см, 30 см и 10 м, что позволяло выявлять агрегации коллембол разного масштаба (Сараева и др., 2015). Всего в 2019 и 2020 гг. обследовано 12 полей в Калужской обл. с различными системами земледелия: традиционной (химические удобрения, гербициды, вспашка) и органической (без химикатов), последняя - в вариантах со вспашкой и дискованием. Одна учетная серия включала 81 пробу, каждая площадью 8 см² до глубины почвы 15 см. Всего взято 972 пробы, из которых эклекторным методом (Потапов, Кузнецова, 2011) было получено 9670 экз. коллембол. Для образцов почвы оценивали влажность, содержание углерода и азота, кислотность и гранулометрический состав.

Наличие агрегаций видов определяли по индексу Кейси, I_c (Cassie, 1963):

$$I_c = \frac{S^2 - M}{M^2}$$

где M – среднее число особей данного вида в пробе, S^2 – дисперсия. $I_c > 0$ показывает наличие агрегаций, 0 – распределение случайное, < 0 – равномерное. Средние значения I_c рассчитывали для участков разного размера: дециметровых (группы из трех проб), несколько дециметров (3 группы из троек проб) и метровых (3 группы из 9 проб). Для всей пробной площади 10х10 м расчет I_c проводили для 3 групп из 27 проб каждая.

3. Результаты и обсуждение

Распределение общей численности коллембол на полях было близко к случайному или слабоагрегированному на всех масштабах рассмотрения. Достаточно многочисленными для анализа оказались 13 видов. Мелкие агрегации, площадью несколько кв. см, не были характерны для изученных видов. Иногда отмечали средние агрегации, размером около 1 кв. дм. Мелкие и средние скопления обычно объясняют биологическими особенностями видов: совместные линьки, групповые кладки, кладки из многих яиц одной особью (Чернова, 1982). На изученных нами полях таких агрегаций мало, хотя размножение видов происходит постоянно.

У большинства видов обнаружили крупные (несколько дециметров) и очень крупные (метр и более) скопления хотя бы в одной из серий. Сильная агрегированность ($I_c > 5$) отмечена у двух видов, высокая ($I_c 3-5$) – у шести, средняя ($I_c 1-3$) – у трех и слабая ($I_c 0,5-1$) – у двух видов. Связь степени гетерогенности распределения видов с той или иной системой земледелия не прослеживалась. Агрегации крупного размера связывают со свойствами среды (Чернова, 1982). Однако нам не удалось обнаружить связи крупных скоплений со значимыми для коллембол физико-химическими свойствами почв или эдафическими факторами. Все изученные характеристики очень слабо варьировали в пределах пробных площадей. К сходным выводам пришли и другие авторы при изучении распределения коллембол в масштабе десятков метров на поле кукурузы (Liu et al., 2019).

Причины крупных скоплений видов, таким образом, следует искать среди биологических факторов. Влияния локального выедания коллембол хищниками (муравьи, жуки-щелкуны и пр.) (Hopkin, 1997) недостаточно, поскольку сходные по размерам агрегации образуют не только доступные хищникам поверхностно-обитающие, но и собственно почвенные формы. Конкуренцию можно предполагать лишь у видов одной жизненной формы, связанной с определенной глубиной обитания в почвенном профиле. В нашем материале был обнаружен лишь один случай одновременно многочисленных видов одной и той же жизненной формы с очень крупными агрегациями в разных локусах пространства.

4. Заключение

Впервые пространственное распределение коллембол в агроценозах изучено более чем для двух масштабов. Показано, что у разных видов встречаются скопления площадью несколько квадратных дециметров и метров. Эти агрегации не коррелируют с физико-химическими свойствами почв, отражая, по-видимому, случайные процессы локального выживания, размножения и последующего медленного расселения видов. Несовпадающие рисунки скоплений разных видов одной жизненной формы показывают возможную, но из-за редкости случаев второстепенную роль конкурентных отношений в распределении видов. Мультимасштабный учет показал, что для количественной оценки популяций и сообществ коллембол на полях желательно располагать отдельные пробы в серии на расстоянии нескольких метров друг от друга.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-516-60002.

Литература

- Потапов М. Б., Кузнецова Н. А. Методы исследования сообществ микроартропод: пособие для студентов и аспирантов. М.: Т-во научных изданий КМК. 2011. 77 с.
- Сараева А. К., Потапов М. Б., Кузнецова Н. А. Разномасштабное распределение коллембол (*Collembola*) в однородном напочвенном покрове: сфагновый мох // Зоологический журнал. 2015. Т. 94. N 5. С. 517–537.
- Чернова Н. М. Микроартроподы пахотных почв Подмосковья // Почвенные беспозвоночные Московской области. М.: Наука. 1982. С. 107-118.
- Bengtsson J., Anström J., Weibull A.-C. The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: a meta-analysis // J. of Applied Ecology. 2005. V. 42. P. 261–269.

- Cassie R. M. Microdistribution of plankton // *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 1963. N 1. P. 223-252.
- Liu J., Gao M., Ma Y., Sun X., Zhu X., Adl S., Wu D. Spatial and environmental factors are minor structuring forces in a soil Collembola metacommunity in a maize agroecosystem. *Pedobiologia*. 2019.V. 76. 150572.
- Hopkin S. P. *Biology of the springtails:(Insecta: Collembola)*. Oxford: Oxford Univ. Press, 1997. 330 p.
- Marsh C. J., Ewers R. M. A fractal-based sampling design for ecological surveys quantifying β -diversity // *Methods in Ecology and Evolution*. 2013. T. 4. N 1. P. 63-72.

ВКЛЮЧЕНИЕ РИЗОСФЕРНОГО ПРАЙМИНГ-ЭФФЕКТА В МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ ROMUL_NUM: ПОДХОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ

Припутина И.В.¹, Чертов О.Г.², Фролов П.В.¹, Шанин В.Н.^{1,3}, Грабарник П.Я.¹

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН – обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБП РАН, Пущино, Россия

priputina@pbcras.ru, frolov@pbcras.ru, shaninvn@gmail.com, pavel.grabarnik@gmail.com

² Бингенский технический университет, Бинген, Германия

ochertov@rambler.ru

³ Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия

Аннотация: В развитие почвенной модели Romul_Num разработан алгоритм оценки ризосферного прайминг-эффекта, связанного с поступлением в почву корневых эксудатов. Алгоритм позволяет выполнять оценки C-CO₂ (гетеротрофное дыхание) и доступного растениям азота с учетом количества и состава (C:N) корневых эксудатов, структуры микробного сообщества и почвенных условий. Тестовые эксперименты показали высокую зависимость результирующих оценок от количества поступающих в почву корневых эксудатов и соответствующих им величин C:N, что подтверждается экспериментальными данными.

1. Введение

В почвенных моделях динамики органического вещества (ОВ) в качестве фракций опада для лесных почв рассматриваются листья/хвоя, ветви, кора и отпад тонких корней. Но в процессе роста растений в почву поступает значительное количество прижизненных корневых выделений – ризодепозитов, в число которых входят корневые эксудаты. Доля эксудатов в общей экосистемной продукции (NPP) варьирует по разным оценкам от 1 до 12% в пересчете на углерод (Phillips et al., 2008; Jones et al., 2009). Поступление в почву легкодоступных соединений, входящих в состав корневых эксудатов и других ризодепозитов, ведет к росту активности почвенных микроорганизмов (МО), определяя комплекс биохимических процессов, объединяемых термином «прайминг-эффект» (ПЭ) (Blagodatskaya, Kuzyakov, 2008). В результате ПЭ происходит рост эмиссии CO₂ и минерализации ОВ почв и затрагиваются другие компоненты почвенных циклов C и N (Bengtson et al., 2012). Включение ПЭ в модели динамики ОВ почв предполагает использование иных подходов, чем те, что используются для описания процессов минерализации ОВ (Manzoni, Porporato, 2009; Blagodatsky et al., 2010).

2. Подходы и методы

В развитие модели Romul_Num (Komarov et al., 2017) предложен алгоритм совместного описания ризосферного прайминг-эффекта и процессов трансформации ОВ в почвенных пищевых сетях (*food webs*). Алгоритм позволяет выполнять оценки C-CO₂ (гетеротрофное дыхание) и доступного азота, образующихся в системе «ризосфера – микроорганизмы – почвенная фауна – ризосферная почва», с учетом количества и химического состава (характеризующегося отношением C:N) корневых эксудатов, структуры микробного сообщества (*Bacteria vs Fungi*) и почвенных условий (объем ризосферной почвы, запасы ОВ и азота, C:N и др.). В основу алгоритма положены принципы стехиометрии и теории доступности ресурсов, предполагающей, в том числе, учет требований разных функциональных групп биоты в элементах питания. Описание алгоритма (далее модели) можно найти в работе (Chertov et al., 2021).

Модель последовательно рассматривает комплекс сопряженных биохимических процессов, связанных с (1) ростом биомассы ризосферных МО за счет легкодоступных C и N

корневых эксудатов; (2) дополнительным ростом биомассы МО за счет не обеспеченного азотом «остаточного» С эксудатов и легкодоступного N, образующегося при минерализации ОВ почвы в результате процесса «добычи» азота (*nitrogen mining*); (3) потреблением биомассы МО почвенной фауной с последующим образованием в пищевых сетях продуктов их жизнедеятельности –экскрементов и мортмассы, а также доступного корням растений аммония жидких экскретов простейших и нематод.

Валидация модели выполнена по данным экспериментальных исследований (Qiao et al., 2016). Для анализа чувствительности модели к неопределенности в оценках ее параметров использован подход, предложенный в работе (Saltelli, Annoni, 2010).

Тестовые имитационные эксперименты выполнены на примере органоминерального горизонта дерново-подзолистой почвы (подзона южной тайги, Ленинградская обл.): запас ОВ – 6.91 кг [C] м⁻², в т.ч., в ризосферной почве – 90.1 г [C] м⁻²; C:N = 14. В тестовых запусках модели анализировалось влияние разных сочетаний набора входных параметров на показатели эмиссии CO₂ и образование доступного азота (в результате его «добычи» из почвенного ОВ). Количество эксудатов варьировало в диапазоне от 0.5 до 2.0 г [C] м⁻² в день, C:N эксудатов – от 10 до 80. Значения C:N биомассы МО в модели определяется почвенными условиями (а именно, C:N ризосферной почвы). Диапазон рассчитываемых величин C:N биомассы МО соответствует фактическим значениям для бактериальных и грибных сообществ (Cleveland, Liptzin, 2007). Оценки ПЭ и других показателей выполнены для середины вегетационного сезона, из расчета ежедневного поступления корневых эксудатов в течение 20 дней. Минерализация ОВ почв в отсутствии ПЭ принята равной 0.00018 день⁻¹ (Komarov et al., 2017).

3. Результаты

Тестовые оценки подтвердили высокую зависимость интенсивности ПЭ от количества поступающих в почву экссудатов, и особенно от величины C:N эксудатов, которая отражает их насыщенность азотом. В сравнении с минерализацией ОВ всего органоминерального горизонта, образование CO₂ в результате ПЭ составляло 5-20% при поступлении в ризосферную часть почвы корневых экссудатов с C:N=10 и достигало 30-65% при C:N=80 (Рисунок). То есть., ПЭ тем выше, чем меньше содержание N в корневых эксудатах, что соответствует высоким значениям C:N эксудатов (Qiao et al., 2016).

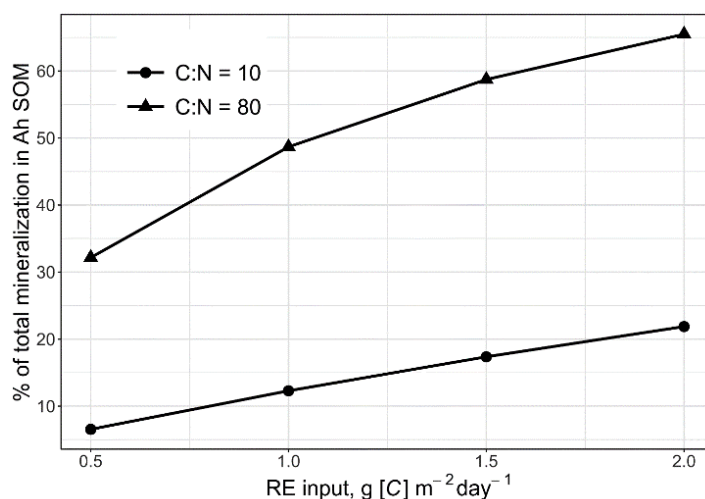


Рисунок 1 – Результаты оценок интенсивности ПЭ в сравнении с минерализацией ОВ во всем органоминеральном горизонте почвы в зависимости от количества и C:N корневых экссудатов

Одновременно с этим показано, что ПЭ и минерализация ОВ ризосферной почвы в результате «добычи» азота снижаются, если в микробном сообществе преобладают организмы с низкой потребностью в азоте, к которым относятся в основном грибы (характеризующиеся повышенными значениями C:N биомассы и преобладающие в почвах с высоким содержанием C:N). Напротив, микробное сообщество с низким C:N биомассы (в основном, это бактерии, преобладающие в почвах с низким отношением C:N) имеет высокую потребность в азоте, что приводит к большему ПЭ.

Также, модельные оценки показывают, что количество доступного растениям азота, выделяемого в пищевых сетях, сравнимо с пулом N в экссудатах и превышает количество азота, образующегося при минерализации ОВ в ризосферной почве в отсутствии прайминг-эффекта.

4. Заключение

Тестирование алгоритма показало адекватность воспроизведения в модельных оценках количественных показателей процессов, связанных с ризосферным прайминг-эффектом. Реализация алгоритма в виде модуля, совместимого с почвенной моделью Romul_Hum, позволит выполнять имитационные оценки ПЭ и его вклада в почвенную эмиссию CO₂ на экосистемном уровне для разных почвенно-климатических условий, что особенно актуально в связи с проблемой изменения климата.

Благодарности. Исследования выполняются при финансовой поддержке РНФ (проект № 18-14-00362-П).

Литература

- Bengtson P., Barker J., Grayston S.J. (2012) Evidence of a strong coupling between root exudation, C and N availability, and stimulated SOM decomposition caused by rhizosphere priming effects // *Ecol Evol* 2(8):1843–1852. <https://doi.org/10.1002/ece3.311>
- Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. (2008) Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review // *Biol Fert Soils* 45(2):115–131. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0334-y>
- Blagodatsky S., Blagodatskaya E., Yuyukina T., Kuzyakov Y. (2010) Model of apparent and real priming effects: Linking microbial activity with soil organic matter decomposition // *Soil Biol Biochem* 42:1275–1283. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.005>
- Chertov O., Kuzyakov Y., Pripulina I., Frolov P., Shanin V., Grabarnik P. (2021) An Approach to Incorporate Rhizosphere Priming Effect into Soil Organic Matter Models (Preprint) / Research Square. doi: 10.21203/rs.3.rs-277431/v1
- Jones D.L., Nguyen C., Finlay R.D. (2009) Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil–root interface // *Plant Soil* 321:5–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9925-0>
- Komarov A., Chertov O., Bykhovets S., Shaw C., Nadporozhskaya M., Frolov P., Shashkov M., Shanin V., Grabarnik P., Pripulina I., Zubkova E. (2017) Romul_Hum model of soil organic matter formation coupled with soil biota activity. I. Problem formulation, model description, and testing // *Ecol Model* 345:113–124. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.08.007>
- Manzoni S., Porporato A. Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales // *Soil Biol. Biochem.* 2009. V. 41. P. 1355–1379. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.02.031>
- Qiao N., Xu X., Hu Y., Blagodatskaya E., Liu Y., Schaefer D., Kuzyakov Y. (2016) Carbon and nitrogen additions induce distinct priming effects along an organic-matter decay continuum // *Sci Rep* 6:19865. <https://doi.org/10.1038/srep19865>
- Saltelli A., Annoni P. (2010) How to avoid a perfunctory sensitivity analysis // *Environ Model Softw* 25(12):1508–1517. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.04.012>

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИНВАРИАНТНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОРЯДКА ЛАНДШАФТНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ LANDSAT 4-8

Пузаченко М.Ю.¹

¹*Институт географии РАН, Москва, Россия*
m.yu.puzachenko@igras.ru

Аннотация: Рассмотрено выделение параметров порядка по данным дистанционных съемочных систем Landsat 4-8 за период 1987-2019 годов для территории Центрально-лесного заповедника на основе метода главных компонент. С помощью последовательного сокращения размерности выделяются основные пространственно-временные закономерности отражения солнечной радиации и излучения в дальнем инфракрасном диапазоне спектра ландшафтным покровом, определяемые различиями в функционировании его частей и динамикой, определяемой изменениями в функционировании. В результате, выделено четыре инвариантных параметров порядка ландшафтного покрова, определяющих различия в функционировании его частей по биомассе, активности фотосинтеза, влагосодержанию и тепловом потоке, и их сезонном ходе, и два динамических, описывающих тренды их изменений за исследуемый период. В целом, интегральные инварианты и тренды содержат 60-70% исходного варьирования всех каналов съемки за всё время, что позволяет на их основе сегментировать ландшафтный покров как с выделением его инвариантной структуры, так и с учётом происходящих изменений его функционирования.

Для исследования использованы все безоблачные сцены имеющиеся за период съемки на территорию ЦЛГБЗ. В результате использовано 22 сцены с 1987 по 2019 годы. Полностью отсутствуют безоблачные сцены с октября по январь и за июль. Наибольшее число безоблачных сцен снято в апреле, июне и феврале, в остальные месяцы снято по 2 безоблачных сцены. Для части сцен тепловой канал содержит артефакты съемки, в результате чего, в анализе оставлены 19 сроков съемки для теплового канала. Таким образом, в анализе использованы 151 переменная.

Для каждого снимка проводится снижение размерности с помощью метода главных компонент (МГК) для всех каналов совместно за исключением теплового, который исследуется отдельно. Далее главные компоненты снимков (факторы), со сходными связями с каналами съемки, совместно обобщаются МГК с выделением частных инвариантных (ЧИ) и динамических (ЧД) параметров порядка (ПП). Под ЧИПП подразумеваются факторы, объединяющие все или значительную часть сцен, например, по сезонному признаку. Если фактор имеет различные знаки связи со сценами в начале и в конце периода съемки – он выделяется как ЧДПП.

На следующем этапе все полученные ЧИПП и ЧДПП обобщаются МГК с выделением интегральных инвариантных (ИИ) и интегральных динамических (ИД) ПП, соответственно. Тепловой канал анализируется сходным образом и обобщается МГК с результатами анализа для остальных каналов на финальном этапе анализа.

Таким образом, с помощью последовательного сокращения размерности выделяются основные пространственно-временные закономерности отражения солнечной радиации и излучения в дальнем инфракрасном диапазоне спектра ландшафтным покровом, определяемые различиями в функционировании его частей и динамикой, определяемой изменениями в функционировании, что соответствует концепции синергетики (Хакен, 2001).

Для каждой сцены съемки выделяется три первых фактора описывающих в каждом случае более 97% варьирования каналов. Получено что, первый фактор, определяющий общую яркость для всех каналов, остаётся ведущим на протяжении всего года при уменьшении его вклада в описание варьирования каналов в период вегетации и снижением уровня связи с ближним ИК каналом. Вторым фактором, в период вегетации, становится фактор, связанный с ближним ИК каналом. В зимний период этот фактор практически отсутствует, а на его место встает фактор связанный со средними ИК каналами, который

находится на третьем месте в период вегетации. Для всех рассматриваемых снимков выделены 22 фактора общей яркости и средних ИК каналов и 19 факторов ближнего ИК канала.

Для факторов, интегрирующих общую яркость для всех каналов съемки, выделяется три общих фактора описывающих 83 % от их исходного варьирования. Первый общий фактор яркости положительно связан со всеми сроками съемки и описывает около 68 % варьирования. Второй общий фактор наиболее связан с яркостью каналов в апреле-начале мая и описывает около 9 % варьирования. Третий отрицательно связан с периодом съемки с 1987 по 2002 годы и положительно с периодом с 2009 по 2019 годы описывая порядка 6% варьирования. Таким образом, выделяется ЧИПП яркостей всех каналов за все сроки съемки, ЧИПП яркостей всех каналов за апрель и ЧДПП яркостей всех каналов за все сроки съемки, отражающий увеличение яркости всех каналов за период наблюдений.

Факторы снимков, определяемые ближним ИК каналом, интегрируются в три общих фактора описывающих 68 % от исходного варьирования. Первый фактор интегрирует с противоположными знаками летние и весенне-осенние сроки съемки с вкладом в описание общего варьирования около 35%. Второй фактор интегрирует все сроки съемки и описывает около 21 % варьирования. Третий фактор отрицательно связан со сроками съемки с 1988 по 2007 год и положительно с 2015 года по 2017 год описывая около 12% от общего варьирования. Таким образом, выделяются два ЧИПП ближнего ИК канала - сезонный, отражающий различия в летних и весенне-осенних сроках съемки, общий и ЧДПП ближнего ИК канала, отражающий увеличение яркости ИК канала за период наблюдений.

Факторы снимков, определяемые средними ИК каналами, обобщаются в четыре фактора описывающих 62 % от их исходного варьирования. Первый фактор связан с большинством сроков съемки, кроме апреля, конца сентября 2007 года и середины августа 2010 года, описывая около 24% от общего варьирования. Второй фактор положительно связан с зимними месяцами и отрицательно с летними, описывая около 16% от общего варьирования. Третий фактор положительно связан с апрелем описывая около 15% от общего варьирования. Четвёртый фактор отрицательно связан со сроками съемки с 1988 по 2000 годы и положительно с большинством летних сроков съемки, в остальной период измерений, описывая около 7% от общего варьирования. Таким образом, выделяются три ЧИПП средних ИК каналов, общий, сезонный, описывающий различия в отражении зимой и летом, и апрельский и ЧДПП средних ИК каналов, отражающий увеличение яркости средних ИК каналов за период наблюдений.

Для дальнего ИК канала за все сроки съемки выделяется три обобщающих фактора описывающих около 78% общего варьирования. Первый фактор положительно связан со всеми сроками съемки кроме февраля 2007 года и марта 2001 года, с которыми связан отрицательно, описывая около 62% от общего варьирования. Второй фактор положительно связан с летними сроками и отрицательно с большинством весенне-осенних, описывая около 10% от общего варьирования. Третий фактор отрицательно связан со сроками с 1988 года по 2001 год и положительно с 2018 по 2019 годы, описывая около 6 % от общего варьирования. Таким образом, для дальнего ИК канала выделяется ЧИПП обобщающий большинство сроков съемки, сезонный ЧИПП, отражающий различия между летними и весенне-осенними сроками съемки и ЧДПП, отражающий увеличение яркости дальнего ИК канала за период наблюдений.

Девять выделенных ЧИПП обобщаются в четыре ИИПП описывающих 88% от их общего варьирования. Первый ИИПП, описывая около 33% общего варьирования, положительно связан с сезонным ЧИПП ближнего ИК канала, ЧИПП средних ИК каналов, ЧИПП общей яркости в апреле и отрицательно - с обоими ЧИПП дальнего ИК канала. Второй ИИПП положительно связан с ЧИПП общей яркости, ЧИПП дальнего ИК канала и ЧИПП средних ИК каналов в апреле, описывая около 30% общего варьирования. Третий ИИПП положительно связан с сезонным ЧИПП средних ИК каналов и ЧИПП ближнего ИК

канала, описывая около 16% варьирования. Четвёртый ИИПП положительно связан с ЧИПП общей яркости в апреле и отрицательно с ЧИПП средних ИК каналов в апреле, описывая около 9% от общего варьирования.

При обобщении ЧДПП выделено два ИДПП описывающих около 72 % от их общего варьирования. Первый ИДПП положительно связан с ЧДПП дальнего ИК канала, средних ИК каналов и общей яркости, описывая около 47% варьирования. Второй ИДПП положительно связан с ЧДПП ближнего ИК канала и общей яркости, описывая около 25% общего варьирования.

В результате, выделено четыре ИИПП ландшафтного покрова определяющих его дифференциацию, связанную с биомассой, активностью фотосинтеза, влагосодержанием и тепловым потоком, и два ИДПП, описывающих тренды их изменений за исследуемый период. В целом, ИИПП и ИДПП содержат 60-70 % исходного варьирования всех каналов съемки за всё время, что позволяет на их основе сегментировать ландшафтный покров как с выделением его инвариантной структуры, так и с учётом происходящих изменений его функционирования.

Благодарности. Исследования выполнены по теме Государственного задания ИГ РАН № 0148-2019-0007.

Литература

Хакен Г. Принципы работы головного мозга. Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: ПЕР СЭ, 2001. 352с.

КОРРЕЛЯЦИЯ И ФАЗОВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ - ДОПОЛНЯЮЩИЕ ДРУГ ДРУГА МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Русаков А.В.¹, Адамович Б.В.², Жукова А.А.², Медвинский А.Б.¹, Михеева Т.М.², Нуриева Н.И.¹

¹Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино, Россия
rusakov_a@rambler.ru

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
belaqalab@gmail.com
anna_eco@tut.by
alexander_medvinsky@yahoo.com
mikheyeva@tut.by
nailya.nurieva@mail.ru

Аннотация: предложено сочетанное использование метода ранговой корреляции Спирмена и метода оценки фазовой синхронизации для выявления взаимосвязей между гидроэкологическими характеристиками озерных экосистем. Корреляционный анализ – один из наиболее популярных статистических методов в экологии. Однако зачастую, при возможности хорошей оценки связи показателей в широком диапазоне значений (например, между разными озерами), он оказывается гораздо менее чувствителен при оценке связи показателей в одном озере во временном масштабе (Adamovich et al., 2019). В этом случае, может быть полезен метод оценки фазовой синхронизации. В данной работе мы сравнили разные по своему характеру методы, а именно - метод ранговой корреляции Спирмена и метод численной оценки фазовой синхронизации, с целью анализа взаимосвязей между характеристиками гидроэкологических процессов в Нарочанских озёрах (Белоруссия). Ранее с помощью метода ранговой корреляции Спирмена было показано, что инвазия моллюска

Dreissena polymorpha Pallas в экосистему Нарочанских озер вызвала дивергенцию динамики хлорофилла, что проявилось в резком уменьшении корреляции между колебаниями концентрации хлорофилла в каждом из озер (Адамович и др., 2015).

Расчет ранговой корреляции Спирмена применяется для анализа данных, не подчиняющихся закону нормального распределения, и заключается в расчете коэффициента корреляции для двух выборок $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$:

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n^3 - n}$$
, где M_i - ранг i -го элемента x_i , S_i - ранг i -го элемента y_i ;
статистическая значимость коэффициента r определяется при помощи t -критерия,

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

рассчитанного по следующей формуле: $t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$. Коэффициент r принимает значения из отрезка $[-1; 1]$. Равенство $r = 1$ указывает на строгую прямую линейную зависимость, $r = -1$ на обратную. Нулевое значение показывает, что выборки независимы. В данной работе нами предложено дополнить исследование взаимосвязей между гидроэкологическими характеристиками Нарочанской озерной экосистемы методом расчета фазовой синхронизации. Данный метод позволяет оценить синхронность изменений исследуемых характеристик во времени. Для этого вычисляется фаза колебаний амплитуды для каждой из исследуемых характеристик:

$$\phi(t) = 2\pi \left(n + \frac{t - t_n}{t_{n+1} - t_n} \right), t_n \leq t \leq t_{n+1}, \text{ где}$$

$t (k=n, n+1)_k$ положение соседних максимумов на временной шкале. Для оценки степени синхронизации двух процессов используется индекс захвата фазы (PLI):

$$PLI = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} e^{i\Delta\phi(j)}$$

, где

N - количество измерений, $\Delta\phi$ - разница между фазами колебаний двух исследуемых процессов. Значение индекса PLI находится в диапазоне $[0;1]$, где 1 полная синхронизация, 0 – ее отсутствие. Значения индекса PLI при анализе экспериментальных данных и данных, полученных в результате натурных наблюдений, редко достигают предельных значений и находятся между 0 и 1. Для того чтобы убедиться в том, что значение индекса

PLI отражает реальную взаимосвязь между исследуемыми процессами, используют метод суррогатных данных (Kantz, Schreiber, 1997), который заключается в сравнении индекса

PLI для исходных данных и данных, полученных путем случайного перемешивания местами значений в каждом из этих временных рядов. Анализ многолетних наблюдений (1978 – 2018 гг.) за изменениями концентраций гидроэкологических характеристик в Нарочанской экосистеме, состоящей из трех озер: Баторино, Мястро и Нарочь, изложенными выше методами, показал, что наблюдаются четыре возможных варианта: наличие или отсутствие как ранговой корреляции Спирмена, так и фазовой синхронизации между сравниваемыми временными рядами, а также либо наличие только корреляции, либо только синхронизации. В том случае, когда оба метода дают одинаковый результат, можно говорить о взаимосвязи (или ее отсутствии) двух изучаемых параметров. В случае, когда отсутствует корреляция, но есть синхронизация (например, сестон и температура, хлорофилл и общий углерод, хлорофилл и температура в озерах Мястро и Баторино) можно предположить, что существует опосредованная взаимосвязь между изучаемыми характеристиками через третью характеристику, которая сохраняет схожую динамику в плане положения максимумов на временной шкале. В случае, когда отсутствует синхронизация, но есть корреляция (например, хлорофилл и общий фосфор в озере Баторино), наличие корреляции может быть вызвано присутствием трендов во временных рядах на больших временных масштабах, а также влиянием большого количества факторов на внутригодовые концентрации хлорофилла. Численная оценка коэффициентов корреляции позволяет судить о линейных зависимостях между исследуемыми процессами (Феллер, 1967). Однако экологические процессы в подавляющем большинстве являются нелинейными (Медвинский и др, 2019). Учёт фазовых характеристик (Pikovsky, Rosenblum, Kurths, 2001) позволяет с помощью численных оценок индекса захвата фазы,

PLI (Kuramoto, 1984), судить о взаимосвязях между нелинейными колебаниями.

Представленные в данной работе методы анализа массивов данных, которые являются результатом многолетних полевых наблюдений, дают возможность получать информацию о различных сторонах исследуемых гидроэкологических процессов и таким образом эти методы взаимно дополняют друг друга.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-00381-21-00 и поддержана грантом РФФИ 20-54-00017 Бел_а и грантом Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Б20Р – 273).

Литература

- Адамович Б.В., Ковалевская Р.З., Радчикова Н.П. и др. Дивергенция динамики хлорофилла в нагорных озерах // Биофизика. 2015. Т. 60. вып. 4. С. 769–776
- Медвинский А.Б., Адамович Б.В., Русаков А.В. и др. Динамика популяций: математическое моделирование и реальность // Биофизика. 2019. Т. 64. С. 1169–1192
- Феллер В. Введение в теорию вероятностей и её приложения. М.: Мир, 1967
- Adamovich B.V., Medvinsky A.B., Nikitina L.V. Relations between variations in the lake bacterioplankton abundance and the lake trophic state: Evidence from the 20-year monitoring // Ecological Indicators. 2019. V. 97. P. 120–129
- Kantz, H., Schreiber, T. Nonlinear Time Series Analysis // Cambridge: Cambridge University, 1997
- Kuramoto Y. Chemical Oscillation, Waves and Turbulence. Berlin: Springer, 1984
- Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths Y. Synchronization. A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge: Cambridge University, 2001

РЕГУЛИРУЮЩИЕ ЭКОСИСТЕМНЫЕ УСЛУГИ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Сандлерский Р.Б.¹, Кренке А.Н.²

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

²*Институт географии РАН, Москва, Россия*
krenke-igras@yandex.ru

Аннотация: рассматривается климаторегулирующая услуга ландшафтного покрова по двум срокам мультиспектральной съемки MODIS с разницей в 16 лет. Количественно оценен вклад энергетических характеристик в пространственное варьирование основных многолетних характеристик климата. На основе дискриминантного и факторного анализов разработана методика количественной оценки влияния изменений в ландшафтном покрове на климат и способ их картографирования.

1. Введение

На современном уровне развития инструментария в региональном масштабе основным источником информации о состоянии экосистем и их услуг являются данные дистанционного зондирования. Они позволяют в широком диапазоне масштабов оценить основные параметры преобразования солнечной энергии ландшафтным покровом и, соответственно, оценить и пространственную неоднородность ландшафтной структуры, определяющую местную циркуляцию воздуха (климаторегулирующая услуга). Анализ цифровых моделей рельефа позволяет оценить вклад рельефа в формирование этих параметров. Расчет связи климатических параметров из специальных баз данных позволяет оценить вклад различных типов растительности и их сочетаний в формирование поля температур и осадков. Сравнение зависимостей между климатическими параметрами и параметрами преобразования энергии (поддерживающие экосистемные услуги) за различные сроки позволяет получить динамику отношений в системе «ландшафтный покров – климат». В настоящем сообщении предпринята попытка оценки поддерживающих и регулирующих услуг по мультиспектральным данным MODIS TERRA с разрешением 1x1 км для участка Русской равнины и их динамики в период с 2002 по 2017 г.

2. Материалы и методы

В первую очередь, в качестве поддерживающих и регулирующих услуг следует выделить оценку энергетического баланса территории и эксергии, которая отражает полезную работу экосистемы на уровне элементарной территориальной единицы (пикселя), в первую очередь, это затраты тепла на испарение. На основе соотношения дальнего красного и ближнего красного каналов рассчитывается нормализованный дифференциальный индекс растительности (NDVI), прямо связанный с биологической продуктивностью. Методика оценки энергетических переменных уже апробирована нами для данных MODIS TERRA (Puzachenko et al., 2016). Таким образом, на основе мультиспектральной съемки оцениваются основные параметры преобразования солнечной энергии ландшафтным покровом. В качестве источника данных о рельефе были использованы данные ЦМР SRTM с исходным разрешением 90 x 90 м. Строилась регрессионная модель, связывающая составляющие радиационного баланса и NDVI с морфометрическими характеристиками рельефа на различных иерархических уровнях. Если рельеф оказывает перераспределяющее влияние, то его масштаб и характер действия отражается в модели. В результате получаем возможность оценить состояния этих переменных вне связи с текущим состоянием растительности и дать фактически пространственную оценку поддерживающих услуг рельефа. Климатические данные были взяты нами из проекта Worldclim (<https://www.worldclim.org/>), в котором

представлены grids по температуре (средняя, минимальная, максимальная), осадкам, приходящей солнечной радиации, скорости ветра и давлению водяного пара с разрешением 1x1 км на местности (1970 – 2000 гг.).

Для оценки климаторегулирующей услуги ландшафтного покрова был осуществлен анализ зависимости климатических переменных от термодинамических характеристик ландшафтного покрова. Для составления картосхем состояний ландшафтного покрова были использованы метод главных компонент и дихотомическая классификация для каждого срока. Для факторов, обобщающих варьирование климатических переменных, а также для ключевых переменных (январь и июнь) были построены регрессионные модели от основных энергетических переменных. Оценка изменений в ландшафтном покрове за 16 лет была получена методом расчета прямых разностей между каналами съемки. Полученные разности были преобразованы методом главных компонент в три фактора, по которым были выполнены дихотомические классификации в метриках Евклида (масштаб изменений) и Буняковского (подобие изменений). Полученные компоненты были исследованы в зависимости от климатических переменных Worldclim и факторов, обобщающих их варьирование. Для каждого из факторов построены регрессионные модели от климатических переменных. Разности между факторами, обобщающими климатические переменные, предсказанные по термодинамическим переменным двух сроков, по сути являются отражением динамики климаторегулирующей услуги. Полученные разности были подвергнуты дихотомической классификации в метрике Евклида и Буняковского, соответственно были выделены классы с различным масштабом изменений климаторегулирующей услуги. По факторам, обобщающим климатические переменные, была осуществлена классификация территории, т.е. получена схема климатического районирования. Для двух уровней классификации было выполнено распознавание классов климата от термодинамических переменных для мая 2002 и 2017 годов. Способом оценки равновесности климата и ландшафтного покрова является процедура, обратная описанной выше – распознавание типов ландшафтного покрова, выделенных по термодинамическим переменным, климатическими переменными или факторами, обобщающими их варьирование.

3. Результаты

Оценка равновесности состояния ландшафтного покрова в различные сроки климату методом дискриминантного анализа позволили получить динамику климаторегулирующей функции ландшафтного покрова. Для количественной оценки вклада ландшафтного покрова в климатическую систему территории и анализа ее динамики предложено использование классификации территории по значениям дискриминирующих функций, отображающих связь между состоянием ландшафта и климатом. Такая, классификация выделяет различные устойчивые типы отношений между климатическими переменными и состояниями ландшафтного покрова, своего рода ландшафтно-климатические регионы. В свою очередь, неопределенность распознавания (вероятность правильного отнесения) класса состояния климатической системы дискриминантным анализом по термодинамическим переменным ландшафтного покрова является показателем неравновесных отношений между климатом и ландшафтом. Соответственно, осуществлена количественная оценка равновесности, а, следовательно, и устойчивости ландшафтно-климатической системы региона

Литература

Puzachenko Y.G., Sandlersky R.B., Krenke A.N., Olchev A. Assessing the thermodynamic variables of landscapes in the southwest part of East European plain in Russia using the MODIS multispectral band measurements // Ecological Modeling. 2016. V. 319. P. 255-274

ТЕХНОЛОГИЯ СБАЛАНСИРОВАННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ: ВЫБОР МОДЕЛЕЙ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА ЭПИДЕМИИ COVID-19 В Г. МОСКВЕ

Соколов А.В.¹, Соколова Л.А.²

¹*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия*
alexander.v.sokolov@gmail.com

²*Институт системного анализа Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия*
las.sokolova@gmail.com

Аннотация: любая математическая модель является отражением знаний о моделируемом реальном объекте. В работе показано, как накопление данных и знаний о пандемии Covid-19 приводит к уточнению математических моделей, к расширению области их использования. Приводятся результаты использования технологии сбалансированной идентификации для мониторинга и прогнозирования пандемии Covid-19 на примере данных по заболеваемости в Москве.

Введение

Динамика эпидемии определяется процессами взаимодействия вируса, человеческого организма, природы и общества. Различные процессы имеют различные характерные времена, причем, чем больше характерное время процесса, тем больше времени требуется для его проявления, и тем длиннее должны быть ряды наблюдений, необходимые для определения его характеристик.

Таким образом, по мере наблюдения за пандемией в доступных рядах данных проявлялись различные эффекты, что позволяло усложнять соответствующие математические модели. Такому усложнению способствовало и появление новых знаний об исследуемых процессах.

1. Материалы, методы и модели

При построении моделей использовались общедоступные данные: новые случаи заражения, количество проведенных тестов, процент носителей антител и количество вакцинированных.

Для выбора моделей, соответствующих количеству и качеству данных, использовался метод сбалансированной идентификации (Sokolov, Voloshinov, 2020) и соответствующая информационная технология, созданная в Центре распределенных вычислений Института Проблем Передачи Информации РАН. В настоящий момент доступна программная реализация технологии (GitHub, 2021).

В терминах принятых обозначений эпидемиологических моделей (см., например, Brauer et. al, 2019) используются различные модификации моделей SIR и SIRS, отличительной особенностью которых является разбиение инфицированных на 15 групп, в соответствии с длительностью заболевания (Age of Infection Model). В терминах моделей популяционной динамики и демографии используются (матричные) модели Лесли (Свирижев, Логофет, 1978) и модели Маккендрика–фон Фёрстера (McKendrick–Von Foerster, Эбелинг и др., 2001).

2. Результаты и прогнозы

На начальном этапе, когда объем знаний и статистических данных был невелик и ненадежен, мы ограничились целью поиска закономерностей взаимодействия вируса и человека (заразности и манифестации вируса как функций длительности заболевания) и описания некоторых социальных механизмов управления эпидемией: количества контактов

и изоляции зараженных (Sokolov, Sokolova, 2020). Затем, по мере накопления опыта (анализ траекторий модели и сравнение их с данными), знаний и статистической информации, был проведен ряд модификаций, позволивших учесть более медленные процессы (с большими характерными временами): эффективность изоляции зараженных в виде функции от количества проводимых тестов, естественный иммунитет переболевших, потерю иммунитета в виде функции, зависящей от времени, прошедшего с момента заражения и вакцинацию.

Построенная в результате модель использовалась для получения прогнозов. В частности, на рисунке приведены результаты прогноза третьей волны эпидемии в г. Москва. Модельная траектория новых случаев (красная кривая) была построена по данным, собранным до 15 апреля 2021г. (синие точки). Сравнение модели с полученными позже (не использованными при построении модели) данными (зеленые точки) показывает неплохое качественное согласование в течение нескольких месяцев.

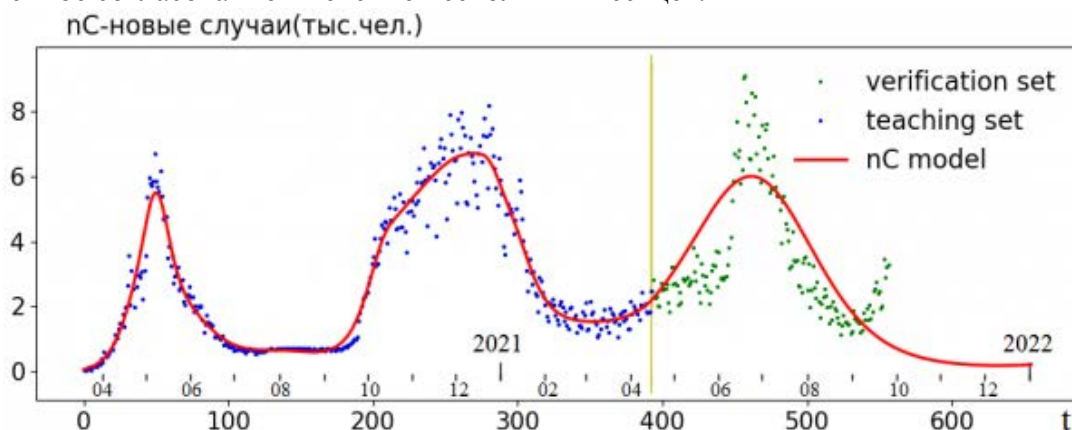


Рисунок. Пример прогноза «третьей волны» в Москве. Новые случаи заражения. Отсчет времени от начала пандемии – 19 марта 2020

3. Заключение

По мере наблюдения за пандемией в исследуемых рядах данных проявлялись различные эффекты. Их учет позволил последовательно (шаг за шагом) усложнять модель. В результате удалось построить модель, удовлетворительно описывающую весь годовой цикл эпидемии. Осталось подождать, когда во временных рядах (статистических данных) отразятся эффекты потери иммунитета от вакцинации – следующая существенная модификация модели вряд ли потребуется раньше осени 2021.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов 20-57-82004 и 20-07-00701

Литература

- Свирижев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. – Москва: Наука, 1978, 352с.
- Эбелинг Вернер, Энгель Андреас, Файстель Райнер. Физика процессов эволюции. Пер. с нем. Ю. А. Данилова. — М.: Эдиториал УРСС, 2001. - 328 с.
- Brauer F., Castillo-Chavez C., Feng Z., Mathematical Models in Epidemiology. Springer, 2019. 619 p.
- GitHub. SvF-technology. <https://github.com/distcomp/SvF> (accessed 01.10.2021).
- Sokolov A.V., Sokolova L.A., COVID-19 dynamic model: balanced identification of general biological and country specific features // 9th International Young Scientist Conference on Computational Science (YSC 2020), Procedia Computer Science, Volume 178, 2020, Pages 301–310
- Sokolov A.V., Voloshinov V.V. Model Selection by Balanced Identification: the Interplay of Optimization and Distributed Computing, Open Computer Science, 2020, 10, p. 283–295. DOI: 10.1515/comp-2020-0116.

РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ

Суховеева О.Э.¹, Курганова И.Н.², Лопес де Гереню В.О.², Карелин Д.В.^{1,3}

¹*Институт географии РАН, Москва, Россия*

olgasukhoveeva@gmail.com

²*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*

ikurg@mail.ru

vlopes@mail.ru

³*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия*

dkarelin7@gmail.com

Аннотация: Обратная задача позволяет настроить параметры модели в соответствии с характеристиками каждого типа экосистем. Модель T&P была параметризована по результатам измерений дыхания почвы из дерново-подзолов на Валдайском полигоне и типичных черноземов на Курской биосферной станции. В модели RothC по данным наблюдений на залежах на дерново-подзолах, серых и темно-серых почвах и литературным источникам были скорректированы константы скорости разложения и соотношение углеродных пулов.

1. Введение

В большинстве несложных, но широко применяемых имитационных моделей цикла углерода используется унифицированный подход к определению параметров почвенного покрова. Для получения точных результатов требуется их настройка для каждого отдельного типа экосистем. Задачи такого рода называются обратными, когда параметры модели (коэффициенты правой части уравнения) корректируются на основе экспериментальных данных.

2. Материалы и методы

Были выбраны две распространенные модели, позволяющие оценивать дыхание почвы: T&P и RothC. Для корректировки T&P использовались результаты полевых измерений дыхания почвы: из типичных черноземов на Курской биосферной станции Института географии РАН и из дерново-подзолов на полигоне «Лог таежный» Валдайского филиала Государственного гидрологического института. Для параметризации RothC использовались данные по содержанию органического углерода ($C_{орг}$) и углерода микробной биомассы ($C_{мик}$) в залежных хронорядях на дерново-подзолах, серых лесных и темно-серых лесных почвах. Поступление растительного материала в почву и его накопление определяли по информации литературных источников.

3. Результаты

Результаты решения обратной задачи моделирования для T&P представлены в таблице 1. Для всех экосистем значения коэффициента R_0 (дыхание почвы при 0°C) были немного выше исходного. Наибольшие изменения коснулись коэффициента Q (зависимость дыхания почвы от температуры): для Курской станции он получился выше в 2,3-2,6 раза, а для Валдайского полигона – в 1,5-2,1 раза. Разница между объектами может быть объяснена тем, что в северных широтах из-за пониженных температур процессы в почве идут менее интенсивно. В Курской области, как в зоне неустойчивого увлажнения, параметризованная константа K (зависимость дыхания почвы от количества осадков) ниже, чем в Новгородской области, где увлажнение избыточное.

Таблица 1 – Параметризация модели T&P

Константа	Исходная версия	Курская биосферная станция			Валдайский полигон		
		Лесостепь	Ясневый лес	Молодая залежь	Болото	Вывал	Еловый лес
R_0	1,250	1,25385	1,25528	1,25606	1,25176	1,25425	1,25328
Q	0,05452	0,12334	0,13338	0,14212	0,08025	0,11494	0,10249
K	4,259	4,25841	4,25832	4,25825	4,25883	4,25859	4,25867

Таблица 2 – Поток углерода в залежных экосистемах

Область и тип почв	Литературные данные		Полевые данные		Эмиссия CO_2	Разница (погрешность)
	Поступление растительного материала в почву	Накопление растительного материала в почве	Накопление $C_{мик}$	Накопление $C_{орг}$		
Костромская, дерново-подзолы	7,767	0,411	0,020	0,834	6,209	0,293
Московская, серые лесные	7,160	0,698	0,016	0,316	5,960	0,170
Белгородская, темно-серые лесные	7,875	0,570	0,009	0,255	6,844	0,178

Таблица 3 – Параметризация модели RothC

Параметры	Исходная версия	Область и тип почвы		
		Костромская, дерново-подзолы	Московская, серые лесные	Белгородская, темно-серые лесные
Температурный коэффициент (a)	-	0,804	0,938	1,125
Влажностной коэффициент (b)	-	0,759	0,804	0,746
Доля $C_{мик}$ в $C_{общ}$	0,46	0,023	0,048	0,034
Доля $C_{орг}$ в $C_{общ}$	0,54	0,977	0,952	0,966
Доля эмиссии CO_2	0,778	0,879	0,947	0,963
Доля углерода, накапливающегося в почве ($C_{мик}+C_{орг}$)	0,222	0,121	0,053	0,037
k для растительного материала	0,30	0,106	0,211	0,133
k для $C_{мик}$	0,66	0,106	0,029	0,008
k для $C_{орг}$	0,02	0,062	0,020	0,006

В соответствии с принципами модели RothC, углерод, поступающий в почву с растительными остатками, распределяется в ней между пулами растительного материала, $C_{мик}$ и $C_{орг}$, а также уходит в атмосферу в виде CO_2 . Уравнения баланса углерода в залежных почвах удалось восстановить по данным литературных источников и полевых измерений

(таблица 2). Также были рассчитаны средние многолетние коэффициенты: температурный a и влажностной b . В почвах залежей доля $C_{орг}$ по сравнению с $C_{мик}$ гораздо выше, а часть углерода, теряемого с дыханием, превышает исходный показатель для пахотных почв (таблица 3). Константы скорости разложения k для растительного материала и содержание $C_{мик}$ на залежах ниже, чем на пашнях, хотя значение k для $C_{орг}$ на дерново-подзолах Костромской области выше в 3 раза.

4. Выводы

По результатам многолетних измерений дыхания почвы в лесной и лесостепной зонах была параметризована модель T&P. По данным наблюдений на залежах разных возрастов были скорректированы константы разложения и соотношение углеродных пулов в модели RothC.

Благодарности.

Работа выполнена за счет гранта РНФ № 20-76-00023 (параметризация моделей), а также в рамках госзаданий ИГ РАН № 0148-2019-0006 (измерения на Курской биосферной станции) и № 0148-2019-0007 (измерения на Валдайском полигоне «Лог таежный»), а также ФИЦ ПНЦБИ РАН № АААА-А18-118013190177-9 (определение пулов углерода в залежах)."

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СЕВЕРНЫХ ОЛЕНЕЙ ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ДАННЫМ

Суховольский В.Г.¹, Савченко А.П.², Ковалев А.В.³, Савченко П.А.², Муравьев А.Н.²,
Дубинцов С.А.², Исаченко А.И.⁴

¹ФГБУН Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН, Красноярск, Россия

soukhovolsky@yandex.ru

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

zom2006@list.ru, 09petro@mail.ru, sasha-mu@yandex.ru, dubintsovsa@gmail.com

³Федеральный научный центр КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

sunhi.prime@gmail.com

⁴Арктический научный центр, Москва, Россия

sachenko.tema@gmail.com

Аннотация: рассмотрена возможность оценки перемещения и состояния северных оленей с использованием радиоошейников и дистанционных данных по состоянию биоты на маршруте движения.

Введение

Таймырская популяция диких северных оленей *Rangifer tarandus sibiricus* (Murrey, 1886) осваивает огромную территорию Севера Средней и частично Западной Сибири и Якутии площадью 1.5 млн. км² (Бондарь, Колпащиков, 2018). В пределах этого обширного региона животные распределены неравномерно и размещение их крайне изменчиво, что связано с сезонностью использования пастбищ и постоянными перемещениями. Два раза в году (весной и осенью) эти перемещения приобретают массовый и направленный характер. Протяженность миграционных путей оленей превышает 1500 км – от арктических тундр побережья Таймыра до северной тайги Эвенкии и Якутии. В последние годы большая часть популяции сосредотачивается на Центральном и Восточном Таймыре (около 70 %). Районы концентрации животных значительно изменяются в зависимости от погодных условий. В период максимальной концентрации (вторая половина июля) плотность популяции животных на непродолжительное время достигает 4-6 тыс. голов на 10 км².

Популяция диких северных оленей на Таймыре и в Эвенкии – одна из экологических «жемчужин» России и задача заключается в её поддержании в устойчивом состоянии в условиях изменяющегося климата и воздействия техногенных и антропогенных факторов.

Объекты и методы

Рассмотрена возможность использования в качестве сопряженных косвенных показателей состояния особи дистанционных данных о перемещении особей и характеристиках рельефа, погоды и состояния растительности по маршрутам движения оленей. Для определения перемещения оленей использованы радиоошейники, позволяющие определить изменения координат оленя в процессе движения. Зная динамику перемещения, возможно оценить направление движения, пройденное расстояние, скорость движения оленя. Рассматривая траекторию его движения, можно также определить по данным спутниковых измерений рельеф местности (высоту над уровнем моря), характеристики вегетативного индекса NDVI и температуры подстилающей поверхности LST отдельной точки на маршруте (Soukhovolsky et al., 2020).

Для мониторинга состояния среды выбор был сделан в пользу спутников Terra/Aqua, действующих в рамках программы NASA EOS (Earth Observing System). Оборудование этих двух спутников в достаточной степени дублируется, что позволяет восстанавливать получаемую информацию, убирая атмосферные помехи для одного из спутников. Исходные данные дистанционного зондирования Земли со спутников Terra/Aqua доступны для

свободного скачивания на сервере NASA. Основным прибором сбора необходимой информации на спутнике является спектрорадиометр среднего разрешения MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer). Для определения текущих высот по маршруту движения оленей использовался комплекс ASTER/GDEM. Сенсор ASTER (усовершенствованный спутниковый радиометр теплового излучения и отражения / Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) был запущен на борту спутника NASA Terra. GDEM – рассчитанная по полученным данным глобальная цифровая модель рельефа (Global Digital Elevation Model). Статистически ASTER/GDEM соответствует предварительной оценке точности в 20 метров (доверительный интервал 95%) по всему миру.

Результаты и обсуждение

Используя эти данные, мы показали:

- при миграции оленей с севера на юг особи выбирают достаточно узкий пространственный коридор, по которому они движутся. Знание этого коридора позволяет оценить риски техногенных и антропогенных воздействий на популяции;
- при миграции в пределах южной границы ареала движение большинства оленей можно охарактеризовать как близкое к случайному блужданию;
- при миграции с севера на юг средняя (крейсерская) скорость миграции субпопуляций оленей достаточно постоянна. При этом крейсерская скорость миграции восточной субпопуляции оленей примерно на 20 % меньше, чем крейсерская скорость миграции западной субпопуляции. На начальном этапе направленной миграции крейсерская скорость снижается, а затем повышается. Крейсерская скорость миграции оленей на южной границе ареала изменяется в ходе наблюдений и ближе к весне уменьшается;
- заметной зависимости скорости движения от температуры подстилающей поверхности не наблюдается. По всей видимости, олени эволюционно адаптированы к пониженным температурам и не следует ожидать влияния погоды на скорость движения оленей;
- использование данных дистанционного зондирования позволило изучить связи между скоростью, направлением движения оленей и рельефом местности по маршруту движения, температурой подстилающей поверхности LST, индексом фотосинтетической активности NDVI, оцениваемыми с использованием спутниковых наблюдений;
- изучена зависимость скорости движения от уклона местности, установлено, что максимальная скорость перемещения характерна для местности с минимальным уклоном. Можно предложить рассматривать скорости движения как при подъеме, так и при спуске, а также максимальную скорость при движении по ровной местности в качестве показателей физиологического состояния оленей;
- выявлена немонотонная связь скорости движения с сезонным максимумом NDVI на данном участке маршрута.

Выводы

Полученные расчетные данные в известной степени совпадают с натурными исследованиями, но необходимо дальнейшее увеличение базы данных для оценки связей скорости движения, размножения, питания и пр. с состоянием природной среды, а, в конечном счете, для понимания стратегии адаптаций оленей к меняющимся условиям.

Работа выполнена при финансовой поддержке Арктического научного центра (АНЦ) в рамках соглашения между РАО Роснефть и АНЦ.

Литература

- Бондарь М. Г., Колпащиков Л. А. Оценка численности и летнее размещение Таймырской популяции диких северных оленей в 2017 году // Научные труды ФГБУ «Объединенная дирекция заповедников Таймыра». Норильск: АПЕК. 2018. № 2. С. 29–45.
- Soukhovolsky V.G., Savchenko A. P., Muravyov A. N. On the modeling of wild reindeer Rangifer tarandus sibiricus Murrey, 1886, migration processes using the example of the Taimyr-Evenki population // ICMSIT 2020. Journal of Physics: Conference Series 2020. V. 1515, N. 032068. IOP Publishing URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1515/3/032068> (accessed 10.10.2021)

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПОПУЛЯЦИЙ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ

Суховольский В.Г.¹, Тарасова О.В.², Ковалев А.В.³

¹*ФГБУН Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН, Красноярск, Россия*

soukhovolsky@yandex.ru

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*

olvitarasova2010@yandex.ru

³*ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия*

sunhi.prime@gmail.com

Аннотация: рассмотрены подходы к моделированию динамики численности лесных насекомых. На основе предложенных показателей проводится сравнение различных видов лесных насекомых: сибирского шелкопряда, непарного шелкопряда, сосновой пяденицы, серой лиственничной листовертки, по их характеристикам. Рассматриваются различия между характеристиками видов, дающих вспышки массового размножения, и видов со стабильно разреженным типом динамики численности.

Лесные насекомые – один из наиболее перспективных для моделирования экологических объектов. Существует целый ряд видов, для которых известны более чем 80-летние временные ряды плотности популяции (Isaev et al., 2017). Однако сложность моделирования популяций лесных насекомых связана с отсутствием системных данных по насекомым: плотностей популяций паразитов и хищников, объема и качества корма, влияния таких модифицирующих факторов, как погода, распределения особей в пространстве.

Недостаток системной информации затрудняет построение классических точечных моделей популяций, подобных модели Лотки–Вольтерра (Базыкин, 1985, 2003). Достаточно сложными представляется использование моделей в частных производных для описания динамики расселения насекомых по территории в связи с развитием очагов вспышек массового размножения, подобных «классической» модели (Колмогоров и др., 1937).

В настоящей работе рассмотрены подходы к моделированию динамики численности лесных насекомых, связанные с использованием точечных моделей фазовых переходов первого рода, характеризующих критические плотности популяции, по достижению которых начинается вспышка (Суховольский и др., 2020), ADL (autoregressive distributed lag)-моделей (Isaev et al., 2017), моделей «вход – выход», позволяющих рассчитать передаточные функции популяции, моделей в переменных состояния. Рассмотренные подходы позволяют оценить свойства рядов численности популяций, определить запаздывание в системе. На основе рассмотренных моделей обсуждаются задачи оценки запаса устойчивости, структурной устойчивости и радиуса устойчивости популяций при наличии неопределенности в оценках популяционной плотности, а также задачи оценки импульсной переходной функции системы и определения реакции популяции на резкие изменения внешних условий, возможность оценки амплитудной и фазовой характеристик популяции.

На основе предложенных показателей проводится сравнение различных видов лесных насекомых – сибирского шелкопряда, непарного шелкопряда, сосновой пяденицы, серой лиственничной листовертки по их характеристикам, рассматриваются различия между характеристиками видов, дающих вспышки массового размножения и видов со стабильно-разреженным типом динамики численности.

При анализе пространственного распределения популяций насекомых рассматриваются модели микрораспределения особей в пределах пробной площади с использованием моделей фазовых переходов второго рода (Суховольский и др., 2020), и макропространственные модели развития очагов массового размножения с использованием данных дистанционного зондирования (Ковалев, 2021), моделей «вязких пальцев» (Суховольский и др., 2008), ФицХью–Нагумо (Анищенко и др., 2003) и моделей фрактальной

структуры очагов (Шредер, 2001) , что позволяет оценить риски развития очагов (Иванова, Ковалев, 2021).

Работа выполнена при совместной поддержке РФФИ и Красноярского краевого фонда науки (грант № 19-44-240003 p_a).

Список литературы

- Анищенко В. С., Астахов В. В., Вадивасова Т. Е., Нейман А. Б., Стрелкова Г. И., Шиманский-Гайер Л. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. М.-Ижевск: ИКИ, 2003. 544 с.
- Базыкин А. Д. Математическая биофизика взаимодействующих популяций. М.: Наука, 1985. 181 с.
- Базыкин А. Д. 2003. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований. 368 с.
- Иванова Ю.Д., Ковалев А.В. Размещение особей сибирского шелкопряда в границах очагов вспышки массового размножения //Сибирский лесной журнал, 2021, № 5 (в печати).
- Ковалев А.В. Анализ устойчивости лесных насаждений к нападению сибирского шелкопряда по данным дистанционного зондирования// Сибирский лесной журнал. 2021. №5 (в печати).
- Колмогоров А. Н., Петровский И. Г., Пискунов Н. С. Исследование уравнения диффузии, соединенной с возрастанием вещества и его применение к одной биологической проблеме // Бюлл. МГУ. Сер. А. Математика и механика. 1937. т.16. С.1–16.
- Суховольский В.Г., Исхаков Т.Р., Тарасова О.В. Оптимизационные модели межпопуляционных взаимодействий. Новосибирск: Наука. 2008. 162 с.
- Суховольский В.Г., Тарасова О.В., Ковалев А.В. // Журнал общей биологии. 2020. т. 81, № 5. С. 374–386.
- Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2001. 528 с.
- Isaev A.S., Soukhovolsky V.G., Tarasova O.V., Palnikova E.N., Kovalev A.V. Forest Insect Population Dynamics, Outbreaks and Global Warming Effects. N.Y.: Wiley. 2017. 298 p.

КАРТОГРАФИРОВАНИЯ МЕТАНОВЫХ СИПОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПРИ ПОМОЩИ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Терентьева И.Е.^{1, 2}, Филиппов И.В.², Сабреков А.Ф.^{1, 2}, Глаголев М.В.^{1, 2, 3}

¹*Институт проблем экологии и эволюции им. Северцова, Москва, Россия*

²*Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия*

lucifik@gmail.com

filip83pov@yandex.ru

sabrekovaf@gmail.com

³*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

m_glagolev@mail.ru

Аннотация: на основании спутниковых снимков Sentinel-2 с помощью сверточных нейронных сетей для региона общей площадью 6.07 Мга, расположенного в средней тайге Западной Сибири, создана карта распространения полей сипов - активных естественных источников СН₄. Эти поля представляют собой плоские не покрытые растительностью участки насыщенного водой грунта с многочисленными отверстиями, воронками, кратерами, из которых выходят вода, осадочный материал и пузырьки газа.

1. Введение

Пойменные экосистемы Западной Сибири являются активным естественным источником метана, важного парникового газа (Terentieva et al., 2019). Недавние исследования пойм рек Оби и Иртыша привели к обнаружению нового интенсивного источника метана — сипов (Glagolev et al. 2011). Они специфичны для данного региона и представляют собой «горячие точки» эмиссии с потоками, достигающими сотен мгСН₄ в час (Sabrekov et al., 2020).

Чтобы оценить вклад метановых сипов в региональную эмиссию, необходима информация о площадях их распространения. Размеры групп (полей) сипов сопоставим с разрешением снимков Sentinel-2 (10 м), что затрудняет их картографирование с помощью обычных попиксельных методов. Напротив, наиболее современные методы, такие как сверточные нейронные сети, имеют высокий потенциал применения за счет учета текстуры и формы объектов, а также высокой точности.

Таким образом, целью данной работы стало создание карты полей сипов региона их распространения с помощью сверточных нейронных сетей на основании спутниковых снимков Sentinel-2.

2. Объекты и методы исследования

Поля метановых сипов представляют собой плоские не покрытые растительностью участки насыщенного водой грунта с многочисленными отверстиями, воронками, кратерами, из которых выходят грунтовые воды, осадочный материал и пузырьки газа. Обычно «поля сипов» формируют длинные и узкие участки вдоль русел площадью до десяти тысяч м² каждое.

Регион исследований ограничен с юга поселком Демьянка, с востока — г. Нижневартовск и с северо-запада — г. Приобье. В целом, площадь региона исследований составляет 6.07 Мга.

Для оценки площадей полей сипов использовалась полносвязная сверточная нейронная сеть U-Net (Stoian et al., 2019). Обучающая выборка строилась на основании данных полевых исследований 2014-2020 годов для трех классов: 1) поля сипов, 2) открытая вода, 3) прочие объекты. Суммарно было выделено более 800 полигонов и линий с сипами.

Входными данными для нейронной сети являлись квадраты 64 на 64 пикселя, где первые 4 канала представляют собой медианный композит Sentinel-2 за летне-осенний

период после половодья (с 205 по 275 день, разрешение 10 метров). Для обучения использовалось 2500 квадратов с полями сипов, 3000 квадратов с открытой водой, 5000 квадратов без целевых объектов.

Обучение длилось до выхода кривой обучения на плато (около 10 эпох по 500 шагов). Скорость обучения начиналась с 0.0015 и останавливалась при достижении 0.00001. Был использован алгоритм оптимизации Адама и «sparse_categorical_crossentropy» в качестве функции потерь. Оценка точности итоговой карты производилась с помощью матрицы ошибок на основании 6000 случайных точек.

3. Результаты и обсуждение

В результате картографирования полей сипов с помощью сверточных нейронных сетей было определено, что данные объекты в исследуемом регионе занимают 0.048 Мга, что составляет 0.8% от общей его площади (рис. 1). При этом площади открытой воды (включающей реки, пойменные и водораздельные озера) в позднелетний период составляют 0.518 Мга или 8.5% от общей площади региона.

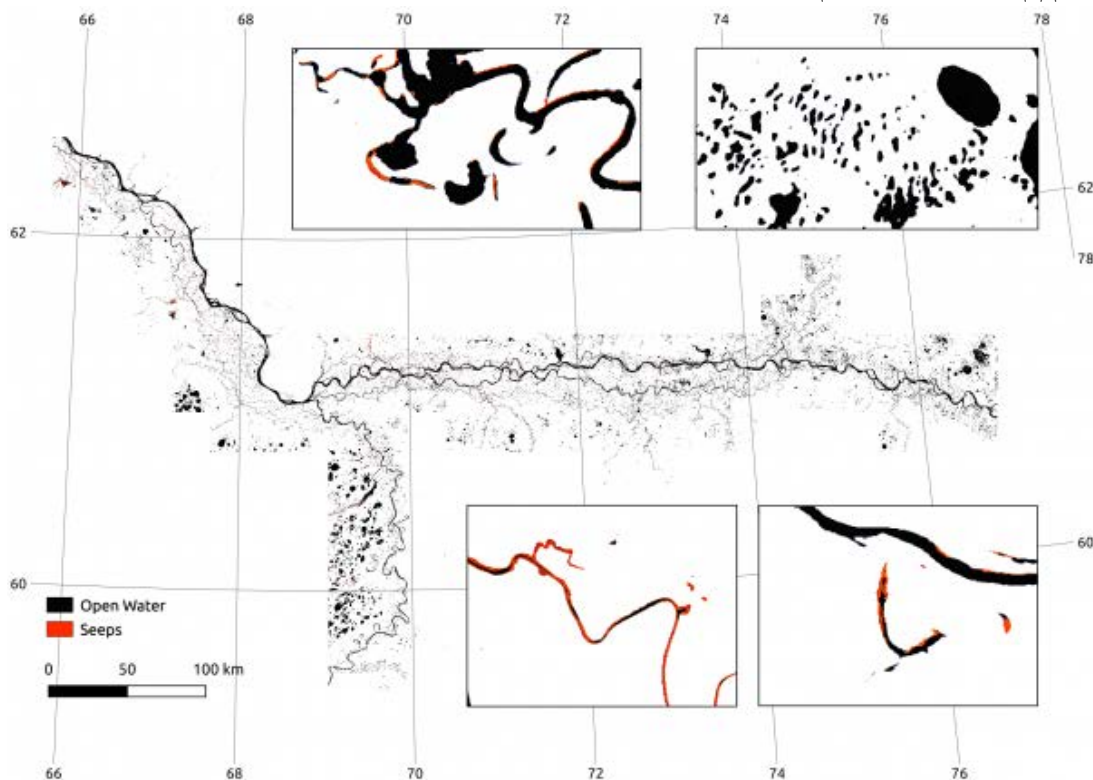


Рисунок 1. Карта распространения полей сипов

Таким образом, площадь распространения метановых сипов в регионе исследований оказалась в 10 раз меньше площади открытых водных объектов. Поскольку данный объект является «горячей точкой» эмиссии метана – от 15 до 2727 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ с медианным значением в 340 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ (Sabrekov et al., 2020), то даже при относительно малых площадях может наблюдаться высокая общая эмиссия за счет активного и возможно всесезонного выделения метана. Помимо прочего, нам неизвестна реальная площадь распространения данного феномена на территории ЗС. Также недоучтены поймы малых рек и ручьев с размерами полей сипов меньше разрешения снимков Sentinel-2.

Для оценки успешности использования сверточной нейронной сети, было проведено сравнение результатов картографирования полей сипов с ее помощью и с помощью одного из лучших попиксельных методов классификации Random Forest. Общая оценка точности карты сипов составила 82.6% и 71.9%, а коэффициент каппа — 73.8% и 57.9% для

сверточной нейронной сети и метода Random Forest, соответственно. Что касается целевых классов, то при использовании нейронной сети 71% точек реальных сипов были определены верно. Данный показатель достигал лишь 42% при классификации с помощью Random Forest. Таким образом, несмотря на высокую общую точность обоих методов, Random Forest уступает сверточной нейронной сети при оценке площадей целевого класса сипов.

Финансовая поддержка. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 19-77-10074).

Литература

- Oshkin I.Y., Wegner C.E., Lüke C., Glagolev M.V., Filippov I.V., Pimenov N.V., Liesack W., Dedysh S.N. 2014. Gammaproteobacterial methanotrophs dominate cold methane seeps in floodplains of West Siberian rivers // *Applied and environmental microbiology*. V. 80. pp. 5944-54.
- Sabrekov A.F., Terentieva I.E., Glagolev M.V., Litt Y.V., Maksyutov S.S. 2020. Methane Seeps in West Siberian Middle Taiga River Floodplains: Origin and Fluxes // *AGU Fall Meeting 2020*.
- Stoian A., Poulain V., Inglada J., Poughon V., Derksen D. 2019. Land cover maps production with high resolution satellite image time series and convolutional neural networks: Adaptations and limits for operational systems // *Remote Sensing*. V. 11. P.1986.
- Terentieva I.E., Sabrekov A.F., Ilyasov D., Ebrahimi A., Glagolev M.V., Maksyutov S. 2019. Highly Dynamic Methane Emission from the West Siberian Boreal Floodplains // *Wetlands*. V. 39. P. 217–226.

ПРОДУКТИВНОСТЬ ТРАВЯНЫХ ЭКОСИСТЕМ ТУВЫ — ВРЕМЯ И ПРОСТРАНСТВО

Титлянова А.А.¹, Шибарева С.В.¹

¹ФБГУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия
atitlyanova@mail.ru

Аннотация: На основании изучения продуктивности десяти пастбищ в сухих степях Тувы, лежащих в разных котловинах, и многолетних наблюдений четырех пастбищ в Убсунурской котловине была оценена вариабельность показателей биотического круговорота. Показано, что пространственная и временная изменчивость запасов растительного вещества и величин чистой первичной продукции в пространстве и во времени практически одинаковы.

Все показатели продукционного процесса изменяются в пространстве и во времени. Экосистемы одного типа, например сухая степь, могут находиться в разных точках пространства: на разных широтах и долготах, на разных элементах рельефа (равнинный, увалистый и горный ландшафты) и на различных позициях катены. На оси времени показатели продукционного процесса в одной и той же экосистеме изменяются также в зависимости от метеоусловий текущего сезона. Какая изменчивость больше — пространственная или временная?

Для анализа пространственной изменчивости рассмотрим показатели продукционного процесса для четырех пастбищ. Все пастбища относятся к типу сухих степей и характерны для Убсунурской котловины, но лежат на разных элементах рельефа, отличаются видовым составом фитоценозов, находятся под различной пастбищной нагрузкой (таблица 1).

Таблица 2 – Средние величины запасов надземной и подземной фитомассы (т/га) и продукции (т/га в год) четырех пастбищ Убсунурской котловины

Пастбища	Интенсивность нагрузки	G_{max}	$D+L$	B	V	ANP	BNP	NPP
Ончаалан	Пониженная	1,1	2,5	10,9	17,8	2,2	12	14,2
Ямаалыг	Пониженная	0,8	2,6	13,2	19,5	1,6	12,6	14,2
Чоогей	Оптимальная	1,1	2	11,1	18,2	1,4	12	13,4
Эрзин	Высокая	0,5	0,8	7,8	11,4	0,6	6,3	6,9

Обозначения: G_{max} - максимальный запас зеленой фитомассы; $(D+L)$ – ветошь + подстилка; B и V — запасы живых и мертвых подземных органов растений; NPP – общая, ANP – надземная и BNP – подземная чистая первичная продукция

Несмотря на разную нагрузку выделяются общие черты биотического круговорота, характерные для сухих степей с пастбищной нагрузкой. Запас B больше G_{max} в 10-15 раз, запас B меньше V в 1,5 раза, BNP превосходит ANP в 7-10 раз. В то же время абсолютные значения для разных пастбищ отличаются: G_{max} — в 2, $(D+L)$ – в 3, B – в 1.5, V – в 2, ANP – в 3, BNP – в 2 раза.

Как видим, близкие по климатическим условиям и принадлежащие к одному типу степей (сухие) пастбища отличаются по показателям биотического круговорота в 1.5-3 раза. Следовательно, пространственная изменчивость характеристик продукционного процесса велика.

Для сравнения пространственной и временной изменчивости рассмотрим показатели продукционного процесса на пастбищах, расположенных в зоне сухих степей Тувы. В качестве объектов возьмём средние величины по десяти сухим степям, лежащих в разных котловинах и на разной высоте над уровнем моря, а также изменения показателей биотического круговорота в течение шести лет на пастбище Ончалаан. Изменчивость будет характеризоваться средними величинами показателей и коэффициентом изменчивости, равным $X_{\max} - X_{\min} / X_{\text{среднее}}$, где $X_{\max}$, $X_{\min}$ и $X_{\text{среднее}}$ – максимальная, минимальная и средняя величина показателя (таблица 2). Сравним средние величины показателей, а также коэффициент изменчивости. Чем меньше коэффициент изменчивости и разница между абсолютными величинами показателей, тем ближе эти два типа изменчивости.

Таблица 2 – Средние показатели продуктивности и коэффициент их изменчивости

Показатели	Запасы, т/га	Продукция, т/га в год					
	$G_{\max}$	$D+L$	B	V	ANP	BNP	NPP
Сухие степи	1,2	2,2	10,5	10,4	2,1	17,1	19,2
Пастбище Ончалаан	1,1	2,5	11,0	18,2	2,2	12,0	14,2
Изменчивость, $(X_{\max} - X_{\min} / X_{\text{среднее}})$							
Сухие степи	1,0	0,8	1,1	1,2	1,5	1,1	0,9
Пастбище Ончалаан	0,5	0,7	1,1	0,8	1,3	1,2	0,8

Анализ средних величин запасов, продукции и коэффициентов их изменчивости показывает, что наименее вариабельными величинами в пространстве и во времени являются ($D+L$), B , ANP , при этом средние величины запасов в сухих степях в момент максимального развития травостоя одинаковы (выделены зелёным цветом). Красный — запасы одинаковы, но коэффициенты различаются; синий — запасы различаются, но коэффициенты близки; черный — и запасы, и коэффициенты значительно различаются.

Самый низкий коэффициент изменчивости характерен для $G_{\max}$ во временном ряду (0,5). Самый высокий коэффициент изменчивости найден для величины ANP в обоих рядах (1,3-1,5). Малая изменчивость величины $G_{\max}$ отмечалась неоднократно рядом исследователей [Базилевич и др., 1988; Титлянова, Самбуу, 2016; Фартушина, 1986], но до сих пор не находит соответствующего объяснения. Самая высокая вариабельность величины надземной продукции связана с тем, что в разные годы в одной и той же экосистеме или в разных экосистемах в одном и том же году число периодов прироста зеленой фитомассы может меняться от 1 до 3-х.

Рассматривая весь приведенный материал в целом, можно сказать, что пространственная и временная изменчивость показателей продуктивности фитоценоза

практически одинаковы. Приведенный материал имеет не только теоретическое, но и практическое значение. Изучая продукционный процесс в пространстве за период июнь-июль (максимум развития фитоценоза) можно получить данные о пяти-шести фитоценозах. Изучая продукционный процесс во времени понадобится не менее пяти полных сезонов (апрель-октябрь) для трех-четырех фитоценозов. Для изучения продукционного процесса одновременно и во времени и в пространстве не хватит ни рабочих рук, ни денег.

Литература

- Базилевич Н.И., Шмакова Е.И., Тишков А.А., Тран Т. Травяные экосистемы Русской равнины //Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. С. 58-66.
- Титлянова А.А., Самбуу А.Д. Сукцессии в травяных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 191 с.
- Фартушина М.М. Динамика продуктивности ассоциаций пустынно-степного комплекса Северного Прикаспия //Продуктивность сенокосов и пастбищ. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986.

ЭКОЛОГИЯ, ЭКОНОМИКА И ЭТИКА СООБЩЕСТВ ПРОСТЕЙШИХ СОЦИАЛЬНЫХ ОРГАНИЗМОВ

Топаж А.Г.¹

¹ООО "Бюро Гиперборея", Санкт-Петербург, Россия
alex.topaj@gmail.com

Аннотация: в докладе последовательно рассматривается несколько аспектов базовой модели, предложенной для описания эволюционно-стабильной стратегии гетерогенной колонии социальных одноклеточных организмов, формирующих общее плодовое тело в жизненном цикле размножения. Ставятся и решаются вопросы, касающиеся «этических» и «экономических» аналогий анализируемой модели коэволюции сообщества простейших организмов

1. Введение

Традиционно, в качестве субъектов кооперативного поведения организмов в живой природе принято рассматривать или высших млекопитающих или эусоциальных насекомых. Для высших животных господствующей теорией, объясняющей устойчивость паттернов согласованного взаимовыгодного сотрудничества, выступает теория реципрокного альтруизма в играх с ненулевой суммой. Необходимым условием реализации и закрепления данных стратегий под прессом естественного отбора является высокий уровень развития нервной системы – наличие способностей к запоминанию прошлого поведения конкретных индивидуумов и выработыванию механизмов формирования своеобразной «общественной репутации». Пожалуй, наиболее содержательным примером и впечатляющей моделью в данной области может служить организованное Робертом Аксельродом соревнование компьютерных программ по последовательной игре в «дилемму заключённого» (Axelrod, Hamilton, 1984). Для общественных насекомых, где каждую отдельную колонию можно рассматривать как единый суперорганизм, главной гипотезой, объясняющей согласованное и альтруистичное поведение каждой особи в интересах общего блага, служит базовое правило родственного отбора Гамильтона (Hamilton, 1964).

Однако в литературе встречается большое количество удивительных примеров проявления согласованного кооперативного поведения простейшими, в том числе, одноклеточными организмами. То есть в условиях, где трудно проследить влияние родственного отбора (во взаимодействующей группе могут одновременно присутствовать различные клоны и даже различные виды микроорганизмов) и, тем более, наличие высшей нервной деятельности. Примерами такого поведения может служить жизненный цикл паразита ланцетовидной двуустки (Dawkins, 1982), ризобий в процессе симбиотической азотфиксации (Абрамова, Топаж, 2018) или колонии социальных амёб – слизевиков. Несмотря на ряд специфических черт, все эти примеры могут быть сведены к одному специальному классу математических моделей, схожему с игрой в «общественное благо», который исследуется в настоящем докладе.

2. Материалы и методы

В классической статье (Matsuda, Harada, 1990) предложена и исследована базовая модель колонии социальных амёб, и получена эволюционно-стабильная стратегия в виде вклада каждого генетического клона, присутствующего в популяции, в пул неразмножающихся организмов («ножки» общего плодового тела), повышающего суммарную приспособленность всех остальных организмов. Она сводится к задаче одновременной максимизации системы функций, описывающих число потомков каждого клона в следующем поколении:

$$\varphi_i(n_i, n, N_i) = (N_i - n_i) \cdot f(N, n)$$

где N_i – общее число клеток генотипа i , n_i – число клеток генотипа i , «делегируемое» в ножку плодового тела, то есть исключаемое из размножения, N и n – общее число клеток в ножке и шляпке плодового тела, f – общая для всех клеток функция индивидуальной приспособленности, зависящая от размера и структуры плодового тела.

Прозрачной аналогией предложенной модели служит проблема определения рационального уровня налогообложения в экономике, направляемого на развитие общей инфраструктуры. Удивительным результатом, полученным авторами в ходе анализа их простой модели, является то, что эволюционно-стабильной стратегией, то есть наиболее рациональной политикой в смысле максимизации индивидуальной репродукции оказывается не пропорциональная или даже прогрессивная шкала налогообложения, а принудительное выравнивание личного «дохода» каждого клона, то есть изъятие в пользу общественного блага всех «излишков» свыше определённого предела. Этот вывод, который естественно интерпретировать как довод в пользу экономики «военного коммунизма», вызывает интуитивное отторжение, особенно с точки зрения идеологии либертарианства. Поэтому в докладе последовательно рассматривается несколько аспектов базовой модели, то есть ставятся и решаются следующие вопросы, касающиеся «этических» и «экономических» аналогий анализируемой модели коэволюции сообщества простейших организмов:

- Интерпретация внутренней сущности рассмотренной постановки и правомерность её дословного переноса на социально-экономические реалии. В частности, можно показать, что в условиях прямого пропорционального влияния развитости общей инфраструктуры на инвестиционный климат концепция непропорционального большего относительного вклада в неё «богатых» субъектов не противоречит логике индивидуальной выгоды.
- Отдельным вопросом, требующим подробного исследования, является то, каким образом сложная программа формально оптимального социального поведения может быть реализована в виде наследуемых генетических инструкций каждого отдельного организма. В качестве возможных подходов построены и исследованы модели последовательного динамического формирования плодового тела на основе «переговоров» и сигнальной регуляции, предложенные в (Uchinomiya, Iwasa, 2013).
- Построение и исследование имитационной модели соответствующей эволюционной игры показывает, что даже в рамках предложенной формализации существенное влияние на качественный вид решения (финального равновесного распределения стратегий внутри популяции через много поколений) влияют такие факторы как начальное распределение численностей клонов, вид функции f (наличие или отсутствие у неё точки перегиба), возможность обратного потока (дифференциации клеток) в динамическом процессе «переговоров» клонов в ходе формирования структуры плодового тела в каждом поколении и т.д.
- Отдельно исследована постановка, когда генетическая инструкция поведения каждого организма может быть представлена в виде наследуемой предопределённой доли клеток клона или вероятности каждой единичной клетки клона оказаться в «ножке» плодового тела, то есть пожертвовать собой ради общего блага. Задача решалась как прямым интегрированием репликаторного уравнения, так и в рамках специально построенной агентной имитационной модели. При этом было показано, что для конкретного вида функции f финальное устойчивое распределение может представлять собой смесь клонов с различными частными стратегиями поведения, то есть *EvolutionaryStableSet*, что согласуется с теоретическими результатами, изложенными в (Gorban, 2007).

3. Результаты и выводы

Кратко резюмируя результаты, полученные в ходе исследования перечисленных выше моделей и постановок, можно сделать основной вывод о том, что к математическим результатам, полученным в статье (Matsuda, Harada, 1990), посвящённой исследованию целого класса моделей «общественного» блага для простейших организмов, не может быть высказано формальных претензий. Однако их интерпретация может быть неоднозначной, а возможность их переноса на социально-экономические приложения вызывает сомнения. Кроме того, отдельного углублённого исследования заслуживает биологическая сущность и обоснованность положений, положенных в основу исследуемой математической модели.

Литература

- Axelrod R. M., Hamilton W. D. The evolution of cooperation. 1984. New York: Basic Books.
- Dawkins R. The Extended Phenotype: The Gene As the Unit of Selection. 1982. Oxford: Freeman.
- Gorban A.N. Selection Theorem for Systems With Inheritance // Mathematical Models of Natural Phenomena, 2007 2(4): 1-45
- Hamilton W. D. The Genetical Evolution of Social Behaviour // Journal of Theoretical Biology, 1964, 7(1): 1–16.
- Matsuda H, Harada Y. Evolutionarily stable stalk to spore ratio in cellular slime molds and the law of equalization in net incomes // Journal of Theoretical Biology, 1990, 147(3):329-44.
- Uchinomiya K, Iwasa Y. Evolution of stalk/spore ratio in a social amoeba: Cell-to-cell interaction via a signaling chemical shaped by cheating risk // Journal of Theoretical Biology, 2013, 336(8): 110–118
- Абрамова А.В., Топаж А.Г. Исследование модели растительно-микробного симбиотического взаимодействия методами теории эволюционных игр // Математическая биология и биоинформатика, 2018, Т. 13. № 1. С. 130-158.

МЕЖВИДОВАЯ КОНКУРЕНЦИЯ МНОГОЛЕТНИХ ОСЕДЛЫХ ОРГАНИЗМОВ

Ухманьски Я.¹, Невольски М.¹, Янишевски Ю.^{1, 1}

¹*Университет Кардинала Стефана Вышинского, Варшава, Польша*
j.uchmanski@uksw.edu.pl

niewol111@gmail.com
janiszewski.jna@gmail.com

Аннотация: ключевые слова: оседлые организмы, межвидовая конкуренция, конкурентное исключение, сосуществование видов, индивидуальные модели.

В данном исследовании анализируется динамика математической модели экологической системы, состоящей из двух конкурирующих многолетних видов, каждый из которых ведет оседлый образ жизни. Это индивидуальная модель, в которой описывается рост каждой особи. Скорость этого роста ослабляется конкуренцией со стороны соседних особей. Сила влияния конкурентов зависит от их размера и расстояния до них. Предусмотрены условия, при которых имеет место конкурентное исключение одного из конкурентов или одновременное сосуществование обоих конкурентов. Проанализировано влияние параметров, определяющих силу конкуренции, степень ее асимметрии, а также учет значимости отдельных элементов пространственной структуры данной экологической системы на результатах конкуренции.

АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИИ ФИТОПЛАНКТОНА В УСЛОВИЯХ СТРАТИФИКАЦИИ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ

Фурсова П.В.¹, Ризниченко Г.Ю.¹, Погосян С.И.¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

fursova@biophys.msu.ru

riznich@biophys.msu.ru

pogosyan@biophys.msu.ru

Аннотация: в среде NetLogo разработана агентная модель динамики численности популяции фитопланктона, обитающего в условиях разделения толщи воды на два слоя. В верхнем слое возможно только поглощение света, в нижнем – только минеральных веществ. Продемонстрирована возможность присутствия в верхнем слое клеток, адаптированных к темноте, а в нижнем – клеток, адаптированных к свету

Моделирование динамики природного фитопланктона является обширной и постоянно развивающейся областью математической биологии. Применяется широкий спектр математических методов, моделируются как динамика отдельных видов или таксономических групп, так и целых фитопланктонных сообществ. При этом большое внимание уделяют характеристикам водной среды. В настоящей работе представлена предварительная агентная модель популяции фитопланктона, учитывающая особенности некоторых северных морей, в частности, южной и восточной части Карского моря. В этом регионе распределение солёности и плотности воды обусловлены большим стоком речных вод и таянием льдов (ААНИИ, 2021). Летом солёность от низких значений на поверхности (10-20‰) резко повышается с глубиной (до 29-30‰) на горизонтах 10-15м. Далее происходит плавное увеличение до значений у дна 34-35‰. Распределение солёности определяет распределение плотности воды. Летом плотность верхнего слоя (5-10м) понижена, её увеличение по глубине происходит очень резким скачком, происходит «разделение» толщи воды на два слоя. Таким образом, складываются специфические условия обитания фитопланктона: в верхнем слое для микроорганизмов доступен солнечный свет, а в нижнем – необходимые элементы минерального питания. По данным мониторинга на части станций были зафиксированы распределения хлорофилла с двумя максимумами. При этом исследование проб флуоресцентными методами показало, что среди клеток фитопланктона из верхнего слоя присутствуют организмы, адаптированные к темноте. И наоборот, часть клеток, поднятых с глубины, демонстрировали адаптированность к свету. Ранее некоторыми исследователями (Стунжас, Сапожников, 2000) высказывалась гипотеза о том, что перемещение колоний фитопланктона из нижних слоев в верхние возможно за счет газовых пузырьков. Однако, полного объяснения наблюдаемым явлениям пока не дано.

Для изучения и анализа возможных механизмов существования описанного фитопланктонного сообщества начата разработка агентной модели в среде NetLogo (NetLogo, 2021). Модельная компьютерная популяция состоит из совокупности клеток-агентов. Среда обитания представляет собой двумерную целочисленную решетку, разделенную на 2 слоя. Каждая ячейка решетки характеризуется двумя величинами: интенсивностью света и содержанием питательных веществ. В верхнем слое содержание питательных веществ принимается равным нулю, интенсивность света падает по вертикали в соответствии с экспоненциальным законом. В нижнем слое освещенность отсутствует, питательные вещества распределены равномерно. Принято, что все «ресурсы» находятся в избытке, их содержание в ячейке не изменяется при потреблении клетками-агентами. Популяция клеток водоросли разбита на 2 субпопуляции – клетки, находящиеся в верхнем слое среды (*ups*) и нижнем (*downs*). Состояние каждого агента описывается двумя характеристиками, ограниченными сверху: удельной плотностью и внутриклеточным содержанием минеральных веществ. Кроме того, агенту присваивается особая характеристика «адаптация к свету/темноте», определяющая эффективность работы

фотосинтетического аппарата клетки. Прототипом агентов модели являются клетки диатомовых микроводорослей, имеющих твердый клеточный «панцирь», состоящий из диоксида кремния, поэтому объем клетки в нашей начальной модели полагаем постоянным. Для каждой клетки возможны следующие действия: увеличение/уменьшение удельной плотности; запасание/расходование минеральных веществ; деление; смерть; переход из одной субпопуляции в другую; перемещение; смена «адаптации» через некоторое время после смены субпопуляции (рисунок 1). Клетки *ups* поглощают свет, фотосинтезируют (создают органические вещества) увеличивая удельную плотность, при этом расходуют внутриклеточные минеральные вещества. Клетки *downs* пополняют за счет среды внутриклеточное содержание минеральных веществ и осуществляют основной обмен веществ, расходуя свою биомассу. При этом уменьшается их удельная плотность. Клетки *ups* переходят в субпопуляцию *downs*, когда удельная плотность достигает верхнего порогового значения. При этом их положение в нижнем слое по вертикали определяется случайным образом. Клетки *downs* переходят в субпопуляцию *ups*, когда удельная плотность снижается до нижнего порогового значения. В результате перехода клетка оказывается в самой верхней ячейке решетки. В пределах своего слоя клетки перемещаются в случайном направлении.

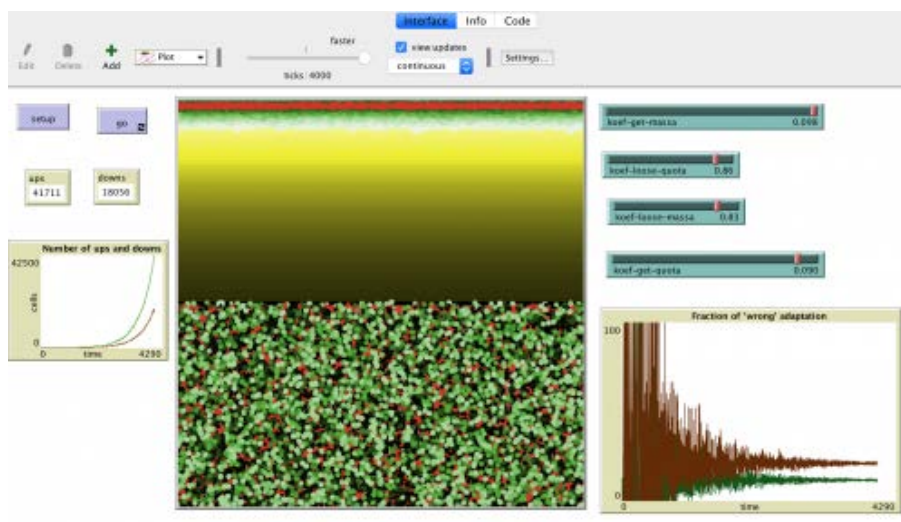


Рисунок 1. Интерфейс агентной модели. Размер клеток указывает на текущую удельную плотность, цвет – на уровень внутриклеточного содержания минеральных веществ. Красным цветом выделены клетки, у которых «адаптация» не соответствует субпопуляции

Модельные расчеты показывают, что со временем в каждой субпопуляции устанавливается некоторый уровень доли «иначе» адаптированных клеток. Этот уровень тем выше, чем больше времени необходимо каждой клетке для адаптации к новым условиям. В дальнейшем будет проведено уточнение зависимостей для каждого учитываемого в модели процесса, а также их параметризация на основе данных мониторинга и физиологических характеристик клеток микроводорослей.

Исследование выполнено в рамках научного проекта государственного задания МГУ №121032500060-0.

Литература

- ААНИИ. URL: http://www.aari.ru/resources/a0013_17/kara/Atlas_Kara_Sea_Winter/text/rejim.htm (дата обращения: 13.07.2021)
- Стунжас П.А., Сапожников Ф.В. Эти удивительные диатомеи // Природа. 2000. №5. С. 377-385.
- NetLogo. URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (дата обращения: 13.07.2021)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА ПРИРОДНЫХ ВОДОЁМОВ

Хрущев С.С.¹, Плюснина Т.Ю.¹, Червицов Р.Н.¹, Киселева Д.Г.¹, Дрозденко Т.В.², Антал Т.К.¹, Ризниченко Г.Ю.^{1,1}

¹*Биологический факультет Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия*

styx@biophys.msu.ru

plusn@yandex.ru

roman123qwe123@gmail.com

trueit1292@gmail.com

²*Лаборатория комплексных экологических исследований Псковского государственного университета, Псков, Россия*

tboichuk@mail.ru

taras_an@mail.ru

riznich@biophys.msu.ru

Аннотация: на примере водоёмов Псковской области рассматривается возможность применения методов машинного обучения для автоматического экологического мониторинга водных объектов. Показано, что искусственные нейронные сети и классификатор типа «случайный лес» эффективны для выявления токсического действия тяжёлых металлов по параметрам ЛР-теста. Для определения наличия цианобактерий более информативным оказался ниспадающий участок кривой индукции флуоресценции.

1. Введение

Современные технологии позволяют в непрерывном режиме контролировать большое число показателей фитопланктонного сообщества и накопить большой массив данных, характеризующих динамику физиологических показателей и ответ на различные воздействия. Для автоматизации обработки и анализа данных целесообразно использовать методы машинного обучения. Применение такого подхода в задаче биоиндикации позволит в непрерывном режиме контролировать благополучие экологической ситуации в водоёмах с использованием распределенной сети автоматизированных измерительных станций.

В качестве основных элементов загрязнения нами рассмотрены два типа загрязнений. В первую очередь, это тяжёлые металлы, попадающие в водоёмы со сточными водами. Одной из основных мишеней действия тяжёлых металлов в клетках является фотосинтетический аппарат (ФСА). Второй тип загрязнения – высокая концентрация в фитопланктонном сообществе цианобактерий (сине-зеленых водорослей). Токсичность цианобактерий вызывает всё большую озабоченность ученых и общественности во всем мире (Plaas and Paerl, 2021; Wang et al., 2021).

В качестве основного средства оценки функционального состояния фитопланктона предполагается использовать автоматический комплекс, в автоматическом режиме осуществляющий отбор пробы из водоёма, адаптацию её к темноте и регистрацию кривых индукции и затухания флуоресценции хлорофилла *a*. Метод индукции флуоресценции широко применяется для оценки функционального состояния ФСА (Strasser et al., 2004). В основе метода лежит анализ динамики изменения интенсивности флуоресценции хлорофилла при действии сильного света на адаптированные к темноте образцы. Сложная форма индукционной кривой позволяет количественно охарактеризовать отдельные стадии переноса электрона в фотосинтетической электрон-транспортной цепи.

2. Объекты и методы

Исследовали действие солей тяжёлых металлов на пробы фитопланктона из нескольких разнотипных водоёмов Псковской области. Методика проведения экспериментов подробно описана в (Хрущев и др., 2021). Кинетику световой индукции флуоресценции хлорофилла (ОЛР-кривые) регистрировали с помощью флуориметра AquaPen-C AP-C 100 (Photon System Instruments, Чехия) при освещении красным светом (630 нм, 1000 мкмоль фотонов/(м²·с) в течение 2 с. Для расчёта параметров ЛР-теста (Strasser et al., 2004) использовали встроенное во флуориметр программное обеспечение. Идентификацию микроводорослей производили с помощью микроскопа «Carl Zeiss Axio Lab A1 (Германия) и камеры Нажотта после фиксации пробы 40% раствором формалина.

3. Результаты и обсуждение

Основной набор данных состоял из 13 параметров ЛР-теста, рассчитанных для 369 индукционных кривых. Были удалены «выбросы» (12 кривых). Анализ методом главных компонент показал, что первая компонента (40% наблюдаемой дисперсии) коррелирует с дозой K₂Cr₂O₇; ни одна из компонент не показала значительной корреляции с дозой CdSO₄ или массовой долей цианобактерий. Кластеризация по алгоритму HDBSCAN (McInnes et al., 2017) не выявила какой-либо структуры в данных, то есть изменение функционального состояния ФСА при токсическом действии тяжёлых металлов происходит непрерывным образом. Тем не менее, применение нейросетевой модели позволило определить наличие или отсутствие токсического действия K₂Cr₂O₇ или CdSO₄ по параметрам ЛР-теста с точностью до 90% (Хрущев и др., 2021). Аналогичные результаты получены и с помощью классификатора типа «случайный лес» (Breiman, 2001). Применение этих методов в системе автоматического экологического мониторинга представляется весьма перспективным.

Среди рассмотренных водных объектов только в двух доля цианобактерий по биомассе превышала 5%, в связи с чем результаты анализа по этому параметру следует рассматривать как предварительные. В водоёмах с большой массовой долей цианобактерий наблюдались сравнительно большая величина флуоресценции в фазе I ОЛР-кривой и более быстрое уменьшение интенсивности флуоресценции после достижения пика Р. Наибольшая корреляция (R=−0.6) между нормированной на максимум интенсивностью флуоресценции и массовой долей цианобактерий в пробе выявлена на спадающем участке кривой (через 2 с после начала освещения), на нарастающем участке корреляция максимальна в фазе IP (R =0.4).

Исследование выполнено в рамках научного проекта государственного задания МГУ №121032500060-0 при частичной поддержке гранта РФФИ № 20-64-46018 (Псковский государственный университет).

Литература

- Хрущев С.С., Дрозденко Т.В., Плюснина Т.Ю., Тимофеев И.В., Тодоренко Д.А., Тихомирова Е.И., Антал Т.К. Выявление токсического воздействия тяжёлых металлов на фитопланктон с помощью нейросетевого анализа индукционных кривых флуоресценции хлорофилла // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 134-141. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-2-134-141
- Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. V. 45. P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324
- McInnes L., Healy J., Astels S. hdbscan: Hierarchical density based clustering // Journal of Open Source Software. 2017. V. 2. № 11. P. 205–206. DOI: 10.21105/joss.00205
- Plaas H. E., Paerl H. W. Toxic Cyanobacteria: A Growing Threat to Water and Air Quality // Environ. Sci. Technol. 2021. V. 55. № 1. P. 44–64. DOI: 10.1021/acs.est.0c06653
- Strasser R.J., Tsimilli-Michael M., Srivastava A. Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient // Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis. Advances in Photosynthesis and Respiration Series / Eds. Papageorgiou G.C., Govindjee. Rotterdam: Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 321–362.
- Wang Y., Feng M., Wang J., Chen X., Chen X., Du X., Xun F., Ngwenya B.T. Algal blooms modulate organic matter remineralization in freshwater sediments: A new insight on priming effect // Science of The Total Environment. 2021. V. 784. Article 147087. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147087

СТЕПЕНЬ ГИДРОМОРФИЗМА И ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПОЧВ. СКВОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Юрова А.Ю.¹, Козлов Д.Н.¹, Смирнова М.А.²

¹*Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия*

alla.yurova@gmail.com

²*Географический факультет, МГУ им Ломоносова, Москва, Россия*

Аннотация: Два водосбора в лесостепи имеют участки с высоким уровнем грунтовых вод (УГВ). Мы применили уравнение неразрывности для катен в расчете УГВ. Первое приближение было основано на экспертной карте степени гидроморфизма почвы. Для корректировки параметров и уменьшения неопределенности проведено усвоение. Связь между морфологическими признаками гидроморфизма и УГВ является регионально устойчивой.

Исторические почвенные карты, основанные на морфологическом описании профиля, имеют очевидную полезность для эколого-гидрологического моделирования. Это особенно актуально в районах с близким залеганием грунтовых вод, где водосборы имеют как сухие, так и влажные части, с дополнительным поступлением влаги на верхней или нижней части склона. Однако не существует удобного метода преобразования карт в переменные состояния гидрологической модели. Здесь мы предлагаем параметризовать уравнение неразрывности в форме кинематической волны, используя экспертные знания о типичном уровне грунтовых вод (УГВ) для почв с различной степенью гидроморфизма на основе морфологических признаков, связанных с окислительно-восстановительным потенциалом. Для тестирования подхода путем автоматизации дискретизации и типизации водосборов было получено шесть вычислительных единиц расчета (катен) на основе склонов ручьев Самовец и Избердей в Тамбовской области (Россия). Пять из шести катен начинались на плохо дренированных плоских междуречных участках с различной степенью насыщения почв близко расположенными грунтовыми водами, а одна начиналась на хорошо дренированном участке водосбора. Мы руководствовались параметризацией модели кинематической волны по критическому диапазону УГВ, который, соответствует каждой группе почв на исторической почвенной карте степени гидроморфизма. Применение только экспертных знаний дало широкий диапазон возможных значений УГВ (например, 1,5-5 м для полугидроморфной почвы) для каждого объекта почвы, но связывание катены фундаментальным физическим условием неразрывности позволило сузить диапазон до 0,2-1 м, тем самым уменьшая его приблизительно на 80%. Мы дополнительно протестировали описание влияния грунтовых вод на почвенный профиль и латеральные потоки в эколого-гидрологической двумерной (катенарной) модели WASA-SED. Результаты показывают, что этот подход может существенно улучшить точность расчетов для управления урожаем и водопользованием. Также даются первые результаты моделирования углеродного баланса лесостепных катен с учетом степени гидроморфизма, и их верификация на основе эмпирического коэффициента степени гидроморфизма

Литература

- Yurova A. Y. et al. Using soil hydromorphy degree for adjusting steady-state water table simulations along catenas in semiarid Russia //CATENA. – 2021. – Т. 199. – С. 105109.
Pilz T., Francke T., Bronstert A. lumpR: An R package facilitating landscape discretisation for hillslope-based hydrological models // Geoscientific Model Development Discussions. 2017. № June. С. 1–34.

Troch P., Loon E. Van, Hilberts A. Analytical solutions to a hillslope-storage kinematic wave equation for subsurface flow // *Advances in Water Resources*. 2002. № 6 (25). С. 637–649.