

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



**НОВЫЕ МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ ЛАНДШАФТОВ В ЕВРОПЕ,
ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И СИБИРИ
ТОМ III: Мониторинг и моделирование
ландшафтов**

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФГБНУ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ АГРОХИМИИ ИМЕНИ Д.Н. ПРЯНИШНИКОВА»**

Главные редакторы: Виктор Г. Сычёв и Лотар Мюллер

**НОВЫЕ МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ ЛАНДШАФТОВ В ЕВРОПЕ,
ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ И СИБИРИ**

Монография в 5 томах

Том III Мониторинг и моделирование ландшафтов

**В содружестве с Академией почвенного плодородия
Митчерлиха (МИТАК), Паулиненуэ, Германия**

Москва 2018

**RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
FSBSI «ALL-RUSSIAN RESEARCH INSTITUTE OF AGROCHEMISTRY
NAMED AFTER D.N. PRYANISHNIKOV»**

Main editors: Viktor G. Sychev and Lothar Mueller

**NOVEL METHODS AND RESULTS OF
LANDSCAPE RESEARCH IN EUROPE, CENTRAL
ASIA AND SIBERIA**

Monograph in 5 Volumes

Vol. III Landscape Monitoring and Modelling

**With friendly support of the Mitscherlich Academy for Soil Fertility
(MITAK), Paulinenaue, Germany**

Moscow 2018

ББК 4035
УДК 504.54:631.42
Н 78

Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири (в пяти томах). Том 3. Мониторинг и моделирование ландшафтов /под редакцией академика РАН В.Г.Сычева, Л. Мюллера. – М.: изд-во ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», 2018. – 352 с.
ISBN 978-5-9238-0249-8 (Том 3)

Коллектив авторов и редакторов под руководством В.А. Романенкова (Москва), А.Х. Шеуджена (Краснодар), Л. Мюллера (Мюнхеберг).

Главные редакторы: Лотар Мюллер (Лейбниц центр агроландшафтных исследований, Мюнхеберг, Германия) и Виктор Г. Сычёв (Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, Москва, Россия)

Монография содержит информацию о самых современных методологиях и результатах в ландшафтных исследованиях. Она может быть использована в качестве руководства для исследователей, преподавателей, студентов и всех, кого интересует тема ландшафтной науки и смежных дисциплин. Монография является особо ценной информационной базой для лиц, принимающих решения на различных уровнях, от местных до международных органов по принятию решений. Приведенная в монографии информация представляет собой современный уровень ландшафтной науки в очень краткой форме.

Содержание глав дано в авторской редакции. Редакторы не несут ответственности в отношении опубликованных материалов.

Novel Methods and Results of Landscape Research in Europe, Central Asia and Siberia (in five volumes). Vol. 3. Landscape Monitoring and Modelling /main editors Viktor G. Sychev, Lothar Mueller. – М.: Publishing House FSBSI «Pryanishnikov Institute of Agrochemistry», 2018. – 352 p.

Team of authors and editors under the guidance of: Vladimir A. Romanenkov (Moscow), Askhad Kh. Sheudzhen (Krasnodar), Lothar Mueller (Muencheberg)

Main editors: Lothar Mueller (Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research, Muencheberg, Germany) and Viktor G. Sychev (All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov, Moscow, Russia)

This monograph shall inform you about up to date methodologies and recent results in landscape research. It is intended as a guide for researchers, teachers, students, decision makers, stakeholders interested in the topic of landscape science and related disciplines. It provides information basis for decision makers at various levels, from local up to international decision bodies, representing the top level of landscape science in a very short form.

Authors are responsible for the content of their chapters. Neither the authors nor the editors can accept any legal responsibility for any errors or omissions that may be made. The editors make no warranty, express or implied, with respect to the material contained herein.

ISSN 978-5-9238-0246-7
ISBN 978-5-9238-0249-8 (Том 3)
DOI 10.25680/1490.2018.71.71.003

© ФГБНУ «ВНИИ агрохимии» 2018

Оглавление

Часть 8 Концепции и исследования ландшафтного мониторинга Part 8 Landscape Monitoring Concepts and Studies	11
Основная глава 8.1 Мониторинг городских и промышленных ландшафтов Main Chapter 8.1 Monitoring Urban and Industrial Landscapes.....	11
Глава III/1: ГЕТЕРОГЕННОСТЬ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ КАК ОСОБОЙ ЭКОСИСТЕМЫ Chapter III/1: Heterogeneity of the Environment as a Characteristic of an Urban Ecosystem Ильгизар И. Рахимов; Кадрия К. Ибрагимова; Айзат М. Басыйров	11
Глава III/2: МОНИТОРИНГ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ МОСКВЫ Chapter III/2: Monitoring Heavy Metals in Soils of Moscow Olga V. Plyaskina; Dmitry V. Ladonin	15
Глава III/3: РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ МАССОВОЙ ДОЛИ НЕФТЕПРОДУКТОВ В КВАРЦЕВОМ ПЕСКЕ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА Chapter III/3: Development of Reference Materials of Oil Products in Quartz Sand for the Metrological Support of Ecological Monitoring Галина А. Ступакова; Клара Г. Панкратова; Владимир И. Щелоков; Елена Э. Игнатъева; Татьяна И. Щиплецова; Дмитрий К. Митрофанов	20
Глава III/4: БИОИНДИКАЦИЯ ПОЧВ АГРОЛАНДШАФТОВ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ Chapter III/4: Bioindication of Agrolandscapes` Soils in the Area of a Copper-Nickel Deposit Лидия А. Яблонских; Татьяна А. Девятова; Антон В. Белик; Ирина В. Румянцева	23
Глава III/5: МИКРОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЧВ ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ СИБИРИ (РОССИЯ) Chapter III/5: Micromorphological Peculiarities of Soils in Technogene Landscapes of Coal-Mine Industries in Siberia (Russia) Евгения А. Гуркова; Денис А. Соколов; Сергей П. Кулижский; Сергей В. Лойко	27
Основная глава 8.2 Агроэкологический мониторинг Main Chapter 8.2 Agri-Environmental Monitoring	32
Глава III/6: МОНИТОРИНГ ПЕСТИЦИДОВ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ Chapter III/6: Monitoring of Pesticides in Agroecosystems Михаил И. Лунёв.....	32
Chapter III/7: URANIUM IN PHOSPHATE FERTILIZERS – CHALLENGES AND OUTLOOK Глава III/7: Уран в фосфатных удобрениях - вызовы и перспективы Judith Schick; Sylvia Kratz; Ewald Schnug	36
Глава III/8: ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ И ХИМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ ¹³⁷ CS В ЗЕРНЕ ОЗИМОЙ РЖИ В ОТДАЛЕННЫЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС Chapter III/8: Influence of Long-Term Application of Fertilizers and Plant Protection Chemicals on the Accumulation of ¹³⁷ CS in Grains of Winter Rye at Long Time after the Chernobyl Accident Людмила П. Харкевич; Игорь Н. Белоус; Виктор Ф. Шаповалов	41
Глава III/9: МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ, ФИЗИЧЕСКИЕ, ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ЗАПАДНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ Chapter III/9: Morphological, Physical, Water-Physical and Physical-Chemical Indicators of a Chernozem in the Western Caucasian Forelands Асхад Х. Шеуджен; Оксана А. Гуторова; Сергей В. Есипенко; Лотар Мюллер; Уве Шиндлер.....	45
Chapter III/10: MINERAL NITROGEN IN DIFFERENT SOILS OF CROPPING LAND IN LITHUANIA Глава III/10: Минеральный азот в почвах различных сельхозугодий Литвы Lina Zickiene; Jonas Mazvila; Gediminas Staugaitis; Zigmąs Vaisvila; Aistė Maseviciene	50
Основная глава 8.3 Мониторинг лесов Main Chapter 8.3 Forest Monitoring	55
Chapter III/11: MONITORING PROCESSES IN FOREST SOILS OF THE NORTHEAST GERMAN LOWLANDS Глава III/11: Мониторинг процессов в почвах под лесом в Северо-Восточной Низменности Германии Winfried Riek; Alexander Russ; Jens Hannemann	55

Chapter III/12: EVALUATION OF THE SOILS' HUMUS STATUS IN ESTONIAN FOREST LANDSCAPES Глава III/12: Оценка гумусного состояния почв лесных ландшафтов Эстонии Raimo Kõlli; Tõnu Tõnutare; Mait Lang; Lech W. Szajdak; Karin Kauer; Kaire Rannik	60
Глава III/13: ОЦЕНКА ИНДЕКСА ЛИСТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ РОССИИ ПО ДАННЫМ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЛЕСНОГО РЕЕСТРА Chapter III/13: Leaf Area Index Estimate for the Russian Forested Landscapes Based on the State Forest Inventory Data Михаил Д. Корзухин; Василий И. Грабовский	65
Глава III/14: МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ СПЕЦИФИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ПОЛОГА ПО ДАННЫМ LIDAR РАЗРЕШЕНИЯ 1 М И 1 КМ Chapter III/14: Methods to Reveal Specific Features of Canopy Height Distributions Using LiDAR Data of Resolutions 1 m and 1 km Петр А. Шарый; Сергей И. Чумаченко; Александр Ю. Агольцов; Лариса С. Шарая	71
Глава III/15: КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ПОДХОД В ЛАНДШАФТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРИ КАРТОГРАФИРОВАНИИ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЯ Chapter III/15: Quantitative Approach for Forest Mapping in Landscape Studies on the Base of Remote Sensing Data Владимир Н. Жердев; Денис А. Баранович; Наталья В. Полякова	76
Глава III/16: МОНИТОРИНГ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ, ВКЛЮЧЕННЫХ В КРАСНЫЙ СПИСОК МСОП, В ПРИМОРСКОМ КРАЕ Chapter III/16: Monitoring Tree Species of the IUCN Red List in the Primorsky Region Галина А. Гладкова; Лидия А. Сибирина; Юрий И. Манько	81
Глава III/17: ДОЛГОСРОЧНЫЙ МОНИТОРИНГ НЕПАРНОГО ШЕЛКОПРЯДА (<i>LYMANTRIA DISPAR</i>) В ОКРЕСТНОСТЯХ ХАБАРОВСКА Chapter III/17: Long-Term Monitoring of the Gypsy Moth (<i>Lymantria Dispar</i>) Population in the Vicinity of Khabarovsk, Russia Дмитрий К. Куренщиков	87
Глава III/18: МОНИТОРИНГ ГОРНЫХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА Chapter III/18: Monitoring of Mountain Forestry Ecosystems on Specially Protected Natural Territories in the Northwest Caucasus Николай А. Битюков	92
Глава III/19: ЛАНДШАФТНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ ЛЕСОУСТРОЙСТВА (НА ПРИМЕРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА «АЗАС») Chapter III/19: Landscape Mapping based on Materials of Forest Planning (on the Example of the Azas State Natural Reserve) Сергей К. Фарбер; Наталья С. Кузьмик; Игорь М. Данилин; Елена В. Горяева	97
Глава III/20: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОЗАИКИ ХАНСЕНА ДЛЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ Chapter III/20: The Use of Hansen Mosaics for Geoinformation Cartography of Forest Landscapes in Western Siberia Екатерина И. Кузьменко; Юрий М. Семенов; Антон В. Силаев; Александр А. Фролов	102
Часть 9 Функции и взаимодействия животных в ландшафтах Part 9 Functions and Interactions of Animals in Landscapes	106
Основная глава 9.1 Беспозвоночные и рыбы Main Chapter 9.1 Invertebrates and Fish	106
Глава III/21: ПОЧВЕННЫЕ ПАНЦИРНЫЕ КЛЕЩИ (ОРИБАТИДЫ) КАК БИОИНДИКАТОРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ЭКОСИСТЕМЫ (ОБЗОР) Chapter III/21: Soil Oribatid Mites as Bioindicators of Human Impacts on Ecosystems (Review) Владислав С. Андриевский; Павел А. Барсуков	106
Chapter III/22: ANALYSING DISTRIBUTION PATTERNS OF SPRING HABITATS OF INVERTEBRATE COMMUNITIES IN GERMANY Глава III/22: Анализ закономерностей распределения местообитаний беспозвоночных сообществ в ручьях Германии Martin Reiss	111
Chapter III/23: COMMUNITY ECOLOGY OF AQUATIC INSECTS: A LANDSCAPE PERSPECTIVE Глава III/23: Экология сообществ водных насекомых: ландшафтная перспектива Viktor Baranov; Gregor Kalinkat	115

Глава III/24: АНАЛИЗ РАЗНООБРАЗИЯ ИХТИОФАУНЫ В ГОРНЫХ ЛАНДШАФТАХ БАССЕЙНА АМУРА Chapter III/24: Analysis of the Ichthyofauna Diversity in Mountain Landscapes of the Amur Basin Александр Л. Антонов.....	119
Основная глава 9.2 Орнитологические исследования Main Chapter 9.2 Ornithological Studies ...	124
Chapter III/25: EFFECT OF HUMAN-INDUCED FOREST EDGES ON THE BIRD COMMUNITY IN HYRCANIAN FORESTS IN IRAN: IMPLICATION FOR CONSERVATION AND MANAGEMENT Глава III/25: Влияние антропогенно сформированных опушек леса на сообщества птиц в Гирканских лесах Ирана: значение для сохранения и управления Saleh Mahmoudi1, Sayyad Sheykhi Ilanloo; Aqil Keyvanloo Shahrestanaki; Negin Valizadegan; Masoud Yousefi.....	124
Глава III/26: ТРОФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ УШАСТОЙ (<i>ASIO OTUS</i>) И БОЛОТНОЙ (<i>A. FLAMMEUS</i>) СОВ В ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ Chapter III/26: Food Chain of the Long-Eared (<i>Asio otus</i>) and the Short-Eared Owls (<i>A. flammeus</i>) in the Forest-Steppe Zone of Western Siberia Тамара А. Дупал; Вячеслав М. Чернышов.....	128
Глава III/27: ОРНИТОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ БИОРАЗНООБРАЗИЯ В АРАЛО-КАСПИЙСКОМ РЕГИОНЕ МЕТОДОМ ЗООГЕОГРАФИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ Chapter III/27: Ornithological Monitoring for Biodiversity Conservation in the Aral-Caspian Region Using Zoo-Cartography Methods Эльдар А. Рустамов.....	133
Chapter III/28: CHARACTERISING THE ABUNDANCE DYNAMICS OF FARMLAND BIRDS BY THE MOVING WINDOW METHOD Глава III/28: Характеристика динамики численности птиц сельскохозяйственных земель методом скользящего окна Jörg Hoffmann; Udo Wittchen; Ulrich Stachow.....	138
Основная глава 9.3 Млекопитающие Main Chapter 9.3 Mammals	143
Глава III/29: ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАСЕЛЕНИЯ МЛЕКОПИТАЮЩИХ ЯКУТИИ Chapter III/29: Impact of Anthropogenic Factors on Mammal Populations in Yakutia Яков Л. Вольперт; Елена Г. Шадрина	143
Глава III/30: ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ГЕОЕУЕ-1 ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СРЕДООБРАЗУЮЩЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЕВРАЗИЙСКОГО БОБРА (<i>CASTOR FIBER L.</i>) НА ПРИБРЕЖНЫЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ Chapter III/30: Using Geoeue-1 Satellite Data to Study the Influence of Engineering Activity of Eurasian Beaver (<i>Castor Fiber L.</i>) on Riparian Forest Landscapes Зоя И. Горяйнова; Варос Г. Петросян; Николай А. Завьялов	148
Глава III/31: АНАЛИЗ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ БОБРОВ (<i>Castor fiber L.</i>) И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ЭКОСИСТЕМЫ МАЛЫХ РЕК В ЗАПОВЕДНИКАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ Chapter III/31: Analysing the Restoration of the Eurasian Beaver (<i>Castor Fiber L.</i>) Number's and their Impact on the Ecosystems of Small Rivers in the Reserves of the European Part Of Russia Using Field Observation Data and Modelling Варос Г. Петросян; Николай А. Завьялов; Зоя И. Горяйнова; Федор А Осипов.....	152
Глава III/32: ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ О БОЛЕЗНЯХ И ПАДЕЖАХ ЖИВОТНЫХ В СТЕПНЫХ И ПУСТЫННЫХ ЛАНДШАФТАХ Chapter III/32: Ecological Concept about Diseases and Epidemics of Animals in Steppe and Desert Landscapes Евгений В. Ротшильд.....	157
Chapter III/33: QUESTIONS OF PREDICTION MODELING OF ANTHRAX OCCURRENCE IN THE FAR NORTH Глава III/33: Вопросы прогностического моделирования возникновения сибирской язвы на Крайнем Севере Kasim A. Layshev; Aleksandr V. Prokudin; Vitaly V. Terleev; Aleksandr V. Spesivtsev; Mikhail V. Arkhipov	162
Chapter III/34: STABLE ISOTOPE ANALYSIS TO STUDY DIETARY BEHAVIOR OF SYMPATRIC EQUIDS IN THE DZUNGARIAN GOBI Глава III/34: Анализ стабильных изотопов для изучения пищевого поведения симпатрических лошадей Джунгарской Гоби Martina Burnik Sturm; Christian C. Voigt; Oyunsaikhan Ganbaatar; Mikhail Sablin; Natalia N. Spasskaya; Petra Kaczensky	167

Chapter III/35: POPULATION-ECOLOGICAL, MORPHOLOGICAL AND GENETIC CHARACTERISTICS OF WILD REINDEERS IN WEST TAIMYR Глава III/35: Популяционно-экологическая, морфологическая и генетическая характеристика диких северных оленей Западного Таймыра Kasim A. Layshev; Leonid A. Kolpashchikov; Vladimir V. Mikhailov; Vitaly V. Terleev; Veronika R. Kharzinova; Arsen V. Dotsev; Tatjana M. Romanenko; Natalia A. Zinovieva; Aleksandr V. Prokudin; Mikhail V. Arkhipov	171
Глава III/36: АНАЛИЗ ЭКОЛОГИИ РЫСИ (<i>Lynx lynx</i>) В ЯКУТИИ Chapter III/36: Analysis of the Ecology of the Lynx (<i>Lynx lynx</i>) in Yakutia Виктор Т. Седалищев; Валерий А. Однокурцев	176
Chapter III/37: QUANTIFYING PREY SELECTION OF NORTHERN AND SOUTHERN EUROPEAN WOLVES (<i>Canis lupus</i>) Глава III/37: Количественная оценка пищевых объектов волков (<i>Canis lupus</i>) в северной и южной Европе Sophie Ståhlberg; Elena Bassi; Viviani Viviani; Marco Apollonio	180
Часть 10 Сенсоры и технологии мониторинга Part 10 Sensors and Monitoring Technologies.....	184
Основная глава 10.1 Наземные датчики и технологии мониторинга Main Chapter 10.1 Terrestrial Sensors and Monitoring Technologies.....	184
Глава III/38: ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ЛАНДШАФТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ Chapter III/38: Application of Electrophysical Methods in Landscape Research Галина Ю. Рабинович; Антонина Д. Позднякова; Лев А. Поздняков	184
Chapter III/39: FAST RESPONSE ANEMOMETERS AND ITS APPLICATION FROM THE VOLGA STEPPE REGION TO EASTERN SIBERIA Глава III/39: Быстродействующие анемометры и их применение на территории от приволжских степей до Восточной Сибири Thomas Foken; Mikhail Strunin; Mathias Göckede	188
Chapter III/40: SOIL MAPPING WITH <i>GEOPHILUS ELECTRICUS</i> Глава III/40: Картирование почв с помощью <i>GEOPHILUS ELECTRICUS</i> Erika Lück; Julien Guillemoteau; Jens Tronicke; Jörg Rühlmann	192
Chapter III/41: HIGH RESOLUTION, ON-SITE MEASUREMENT OF SOIL SURFACE SHEAR STRENGTH AND ROUGHNESS WITH NEW 4S-DEVICE Глава III/41: Измерение прочности и шероховатости почвы с высоким разрешением в поле с новым 4s-устройством Raimund Schneider; Sören Thiele-Bruhn; Christian Schwab; Aaron Schardong; Kyra Nele Raugewitz; Mathias Jackel	197
Chapter III/42: CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR IDENTIFYING COMMON RAGWEED FROM DIGITAL IMAGES Глава III/42: Сверточная нейронная сеть для идентификации амброзии полыннолистной на цифровых изображениях Michael Schirrmann; Anton Ustyuzhanin; Antje Giebel; Karl-Heinz Dammer	201
Основная глава 10.2 Подходы и применения дистанционного зондирования Main Chapter 10.2 Remote Sensing Approaches and Applications	204
Chapter III/43: REMOTE SENSING BASED NET PRIMARY PRODUCTIVITY ESTIMATION – RESULTS FROM 16-YEARS GLOBAL MODELLING FOR EUROPE, CENTRAL ASIA AND WESTERN SIBERIA Глава III/43: Оценка чистой первичной продуктивности на основе дистанционного зондирования - Результаты 16-летнего глобального моделирования для Европы, Центральной Азии и Западной Сибири Christina Eisfelder; Ursula Gessner; Markus Tum; Julian Zeidler.....	204
Chapter III/44: METHODS OF ASSESSING VEGETATION DYNAMICS AND PASTURE POTENTIALS IN HIGH MOUNTAIN REGIONS Глава III/44: Методы оценки динамики растительности и пастбищных потенциалов в высокогорных регионах Kim André Vanselow; Harald Zandler; Cyrus Samimi	209
Глава III/45: АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ГОРНЫЕ ЛАНДШАФТЫ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА Chapter III/45: Analysing Climate Change Impacts on Mountain Landscapes of the Northern Caucasus Вера В. Виноградова; Татьяна Б. Титкова; Елена А. Белоновская; Раиса Г. Грачева.....	214

Глава III/46: ЭКСПАНСИЯ АГРОЛАНДШАФТА И СОСТОЯНИЕ ОСНОВНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ТЕРРИТОРИИ СИНЬЦЗЯН-УЙГУРСКОГО АВТОНОМНОГО РАЙОНА КНР (БАССЕЙНЫ РЕКИ ИЛЕ И ОЗЕРА ЭБИ-НУР) ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СЪЁМКИ 1990-2017 гг. Chapter III/46: Expansion of Agro-Landscape and State of Main Water Objects in the Territory of the Xinjiang Uygur Autonomous Region of China (Basins of River Ile and Lake Ebi-Nur) during 1990-2017 on the Base of Satellite Data Алексей Терехов; Максат Калимолдаев; Иван Пак; Светлана Долгих	219
Глава III/47: РАЗВИТИЕ МЕТОДА ДИСТАНЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ И КЛАССИФИКАЦИИ АКВАЛАНДШАФТОВ Chapter III/47: Development of a Method of Remote Spectrometry for Assessing the State of Aquatic Ecosystems and Classification of Aquatic Landscapes Борис Л. Сухоруков; Николай В. Решетняк.....	224
Глава III/48: СПУТНИКОВЫЙ ИНДЕКС КЛИМАТИЧЕСКИХ ЭКСТРЕМУМОВ ЗАСУШЛИВЫХ ЛАНДШАФТОВ SCEI Chapter III/48: Satellite Index of Climatic Extremes of Arid Landscapes SCEI Александр Н. Золотокрылин; Татьяна Б. Титкова.....	229
Глава III/49: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ И КАРТОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ЗАСУШЛИВЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ Chapter III/49: Using Cosmic Data and Cartographic Methods for the Evaluation of Degraded Dry Agrolandscapes Шахислам Лайсханов; Азимбай Отаров; Игор Савин; Арсений Жоголев; Сакен Дуйсекоев	233
Глава III/50: ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И НАЗЕМНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПОЧВ ДЛЯ КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА Chapter III/50: Application of Remote Sensing Data and Ground Automated Monitoring of the Temperature Field of Soils for Cartographic Modeling of Soil Cover Светлана Кудряшова; Александр Чумбаев; Игорь Пестунов; Анна Безбородова; Светлана Курбатская; Сергей Рылов; Юрий Синявский.....	238
Глава III/51: РОЛЬ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ УЯЗВИМОСТИ ЛАНДШАФТОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА (НА ОСНОВЕ ГИС И ДЗ) Chapter III/51: The Role of Geomorphological Mapping for Investigation of Landscapes' Vulnerability during Climatic Changes (Based on GIS and Remote Sensing) Дарья А. Чупина; Иван Д. Зольников; Елена Н. Смоленцева.....	243
Часть 11 Моделирование ландшафтов и системы поддержки решений Part 11 Landscape Modelling and Decision Support.....	247
Основная глава 11.1 Моделирование агроэкосистем Main Chapter 11.1 Modelling of Agro-Ecosystems.....	247
Глава III/52: ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ ЛАНДШАФТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ Chapter III/52: Basic Approaches of Landscape Modelling Владислав В. Сысуев	247
Chapter III/53: DYNAMICALLY ADJUSTED FORECASTING OF AGRO-LANDSCAPE PRODUCTIVITY USING MASSIVE COMPUTATIONS OF CROP MODEL IN GIS ENVIRONMENT Глава III/53: Динамически уточняющийся прогноз продуктивности агроландшафтов с использованием массовых расчетов динамической модели агроэкосистемы в среде ГИС Alex Topaj; Vladimir Badenko; Sergey Medvedev; Vitaly Terleev.....	253
Chapter III/54: LandCaRe-DSS: A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR PROJECTION OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON AGRO-ECOSYSTEMS AND CROP PRODUCTION Глава III/54: LandCaRe-DSS: система поддержки принятия решений для учета влияния изменения климата на агроэкосистемы и производство сельскохозяйственных культур Wilfried Mirschel; Karl-Otto Wenkel; Michael Berg; Ralf Wieland; Claas Nendel; Vitaly V. Terleev; Alexandre G. Topaj; Vladimir L. Badenko; Barbara Köstner	258
Глава III/55: ПРОДУКТИВНОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В СТЕПНОЙ ЗОНЕ РОССИИ И КАЗАХСТАНА ПРИ СОВРЕМЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА Chapter III/55: Wheat	

Productivity in the Steppe Zone of Russia and Kazakhstan under Climate Change Вера Н. Павлова; Pierluigi Calanca; Анна А. Караченкова	263
Глава III/56: ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ И УРОЖАЙНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В УКРАИНЕ Chapter III/56: Estimation of Influence of Climate Changes on Agroclimatic Resources and Productivity of Grain Crops in Ukraine Анатолий Н. Полевой.....	268
Chapter III/57: UNCERTAINTY ANALYSIS OF MODEL BASED WATER FOOTPRINT ESTIMATIONS FOR WINTER WHEAT Глава III/57: Анализ неопределённости оценок водопотребления озимой пшеницы, полученных с использованием имитационных моделей Kurt Christian Kersebaum; Wilfried Mirschel.....	273
Chapter III/58: MULTI-MODEL UNCERTAINTY ANALYSIS IN PREDICTING THE YIELD OF NITROGEN IN CEREAL GRAINS FOR CROP ROTATIONS IN EUROPE Глава III/58: Мультимодельный анализ неопределенности при оценке количества азота в зерне злаковых культур, возделываемых в севооборотах Европы Xiaogang Yin; Kurt Christian Kersebaum; Chris Kollas; Kiril Manevski; Sanmohan Baby; Nicolas Beaudoin; Isik Öztürk; Thomas Gaiser; Lianhai Wu; Munir Hoffmann; Monia Charfeddine; Tobias Conradt; Julie Constantin; Frank Ewert; Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri; Luisa Giglio; Petr Hlavinka; Holger Hoffmann; Marie Launay; Gaëtan Louarn; Remy Manderscheid; Bruno Mary; Wilfried Mirschel; Claas Nendel; Andreas Pacholski; Taru Palosuo; Dominique Ripoche-Wachter; Reimund P. Rötter; Françoise Ruget; Behzad Sharif; Mirek Trnka; Domenico Ventrella; Hans-Joachim Weigel; Jørgen E. Olesen	278
Основная глава 11.2 Гидрологическое моделирование Main Chapter 11.2 Hydrological Modelling	283
Chapter III/59: MODELLING FRESHWATER RESOURCES AND THEIR USE AT THE GLOBAL SCALE: MOTIVATION, CHALLENGES AND PROSPECTS Глава III/59: Моделирование ресурсов пресной воды и их использование в глобальном масштабе: мотивация, проблемы и перспективы Petra Döll; Hannes Müller Schmied	283
Глава III/60: ОЦЕНКА БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДОЕМЫ С ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ Chapter III/60: Assessment of Nutrient Load on Water Bodies from Natural and Anthropogenic Landscapes Сергей А. Кондратьев; Александр Ю. Брюханов	287
Глава III/61: МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СТОКА ГОРНЫХ РЕК Chapter III/61: Modeling the Hydro-Chemical Discharge of Mountain Rivers Юрий Б. Кирста; Александр В. Пузанов.....	292
Chapter III/62: MODELLING THE IMPACT OF FOREST CONVERSION ON GROUNDWATER RECHARGE UNDER A CHANGING CLIMATE Глава III/62: Моделирование влияния конверсии лесов на питание подземных вод в условиях изменяющегося климата Marco Natkhin; Jörg Steidl; Ottfried Dietrich; Gunnar Lischeid.....	297
Chapter III/63: MODELLING FRESHWATER HABITATS AND THEIR MACROINVERTEBRATE COMMUNITIES Глава III/63: Моделирование пресноводных сред обитания и их макробеспозвоночных сообществ Jens Kiesel; Daniel Hering; Maria Ceylan; Mathias Kuemmerlen; Sonja Jähnig; Britta Schmalz; Nicola Fohrer.....	301
Chapter III/64: QUANTIFYING INTERACTION NETWORKS AND STABILITY PROPERTIES OF PLANKTON FOOD WEBS USING MULTIVARIATE FIRST ORDER AUTOREGRESSIVE MODELLING Глава III/64: Количественное определение взаимодействия и свойств устойчивости пищевых цепей планктона с использованием многовариантного авторегрессионного моделирования первого порядка Alena S. Gsell; Deniz Özkundakci; Marie-Pier Hébert; Rita Adrian	306
Основная глава 11.3 Моделирование ландшафтных отделений Main Chapter 11.3 Modelling Landscape Compartments.....	311
Глава III/65: ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ В БОЛОТНО-ОЗЕРНЫХ ЛАНДШАФТАХ Chapter III/65: A Model of the Dynamics of the Frozen Soil Depth in Bog-Lake Landscapes Виктор М. Белолипецкий; Светлана Н. Генова.....	311

Глава III/66: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПО ПОЧВЕННОМУ ПРОФИЛЮ РАЗЛИЧНЫХ ЛАНДШАФТОВ Chapter III/66: Use of Parameter-Reduced Dynamic Models to Describe the Migration of Heavy Metals in the Soil Profile of Various Landscapes Александр С. Фрид; Татьяна И. Борисочкина.....	315
Глава III/67: ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА КОМПОНЕНТОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ОКРЕСТНОСТЯХ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ Chapter III/67: Approach to Monitoring the Status and Assessment of the Quality of Environmental Components in the Vicinity of a Mining and Processing Plant Based on Methods of Remote Sensing Геннадий П. Глазунов; Владимир М. Гендугов; Мария В. Евдокимова; Мария В. Шестакова	319
Chapter III/68: THE USE OF HYPER SPECTRAL DATA FOR CROP CLASSIFICATION USING MACHINE LEARNING Глава III/68: Использование гиперспектральных данных для классификации культур с использованием машинного обучения Ralf Wieland; Batunacun...	324
Глава III/69: МЕТОДЫ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В БАССЕЙНЕ Р. ОКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЛЬЕФА, КЛИМАТА И ПОЧВ Chapter III/69: Methods for Forecast of Winter Wheat Yield in the Oka Basin Using Relief, Climate and Soil Data Петр А. Шарый; Лариса С. Шарая; Ольга В. Рухович	328
Глава III/70: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ Chapter III/70: Yield Forecasting of Agricultural Crops by the Method of Functional Approximation Маргарита Листова; Михаил Альперович; Евгений Альперович.....	333
Chapter III/71: SIMULATING THE EFFECTS OF AGROCHEMICALS AND OTHER RISK-BEARING MANAGEMENT MEASURES ON THE TERRESTRIAL AGROBIODIVERSITY: THE RISKMIN APPROACH Глава III/71: Моделирование влияния агрохимикатов и других мер по управлению рисками в наземном агробиоценозе: подход RISKMIN Matthias Trapp; Mark Deubert; Lucas Streib; Martina Roß-Nickoll; Björn Scholz-Starke; Andreas Toschki.....	338
Chapter III/72: A DSS MODEL FOR THE GOVERNANCE OF SUSTAINABLE RURAL LANDSCAPE Глава III/72: Модель DSS для управления устойчивым сельскохозяйственным ландшафтом Massimo Rovai; Maria Andreoli; Simone Gorelli; Heikki Jussila.....	342

Часть 8 Концепции и исследования ландшафтного мониторинга
Part 8 Landscape Monitoring Concepts and Studies

Основная глава 8.1 Мониторинг городских и промышленных ландшафтов
Main Chapter 8.1 Monitoring Urban and Industrial Landscapes

Глава III/1: ГЕТЕРОГЕННОСТЬ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ КАК ОСОБОЙ
ЭКОСИСТЕМЫ

Chapter III/1: Heterogeneity of the Environment as a Characteristic of an Urban Ecosystem

Ильгизар И. Рахимов*, Кадрия К. Ибрагимова, Айзат М. Басыров

DOI 10.25680/2148.2018.30.26.194

*Эл. Почта: rakhim56@mail.ru

Казанский федеральный университет, 420008, Казань, ул. Кремлёвская, 18, Россия

РЕЗЮМЕ. Рассмотрены основные закономерности функционирования и отличительные признаки городской экосистемы. На примере орнитофауны проанализированы особенности распределения городских популяций по различным биотопам. Указывается также на роль этносоциальной обстановки в особенностях размещения и проживания организмов в условиях города. Представленный материал основывается на наблюдениях, проведенных с 70-х годов прошлого века в разных городах Республики Татарстан. Выделены основные местообитания, обеспечивающие вхождение многих видов в городской ландшафт. Представлена классификация городских биотопов. Освоение городской территории птицами происходит по определенной схеме: от залетов отдельных особей в поисках корма до формирования городских популяций синантропных птиц. Гетерогенность городской среды создает мозаичность городских местообитаний, их сочетание способствует высокой степени разнородности фауны. Птицы различных экологических групп могут встречаться на несвойственных для них территориях.

Abstract. The main regularities of functioning and distinctive features of an urban ecosystem were analysed. On the example of avifauna, the features of distribution of bird populations in various biotopes were studied. The role of the ethno-social situation for habitats of organisms in the city are also considered. The presented material is based on observations made since the 70s of the last century in different cities of the Republic of Tatarstan. The main habitats that provide for the entry of many species into the urban landscape were identified. Classification of urban biotopes is presented. The development of urban territory by birds occurs according to a certain pattern: from flying of individuals in search of food to the formation of populations of synanthropic birds. Heterogeneity of the urban environment creates a mosaic of urban habitats, their combination contributes to the high degree of heterogeneity of fauna. Birds of different ecological groups can meet on non-native territories.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: городские экосистемы, урбанизированная среда, экология города, синантропизация.

Keywords: urban ecosystems, urban environment, urban ecology, syn-anthropisation

ВВЕДЕНИЕ

Городская или урбанизированная экосистема представляет собой одну из форм антропогенно-трансформированных экосистем. Городская экосистема представляет собой результат сложного взаимодействия комплекса организмов (растения, грибы, микроорганизмы, животные и человек) со средой их существования. Следует согласиться, что городская экосистема – это функциональная система, не имеющая четкого пространственного разграничения, содержащая и связывающая компоненты, обладающие разной территориальной протяженностью [1]. Городская или урбанизированная экосистема представляет собой одну из форм антропогенно-трансформированных экоси-

стем. Это реально существующее, поддерживаемое деятельностью человека сообщество с определенным видовым составом организмов и своеобразием связей их компонентов, зависящих от комплекса физико-географических и социально-экономических условий территории [2] .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Урбанизированная среда характеризуется своим особым пространственным и временным размещением животных. Не все виды животных могут сразу приспособиться к условиям городской среды и, поэтому держатся от него на некотором удалении. Ее отличительной особенностью является обилие экотонов - переходных, промежуточных зон между различными биотопами. По мнению Д.А. Кривоуцкогo [3], экология города по сути является экотональной экологией. Неоднородность местообитаний обеспечивает разнообразие внутри сообщества. В городе, представляющем собой мозаику местообитаний, состоящую из различных биотопов, наблюдается большое видовое разнообразие птиц. Биотопы, находясь по соседству создают пограничные зоны, содержащие в себе элементы двух соседних местообитаний. Видовой состав и плотность населения птиц значительно превышает эти показатели в естественных экосистемах. Лишь в экосистемах достаточно крупных городов можно наблюдать до 200 видов птиц, которые размещаются с плотностью до 1500-2000 ос/км², что не встречается ни в одном из естественных экосистем. Ниже представлена классификация городских биотопов, которой мы придерживаемся в ходе исследований (Рисунок 1).

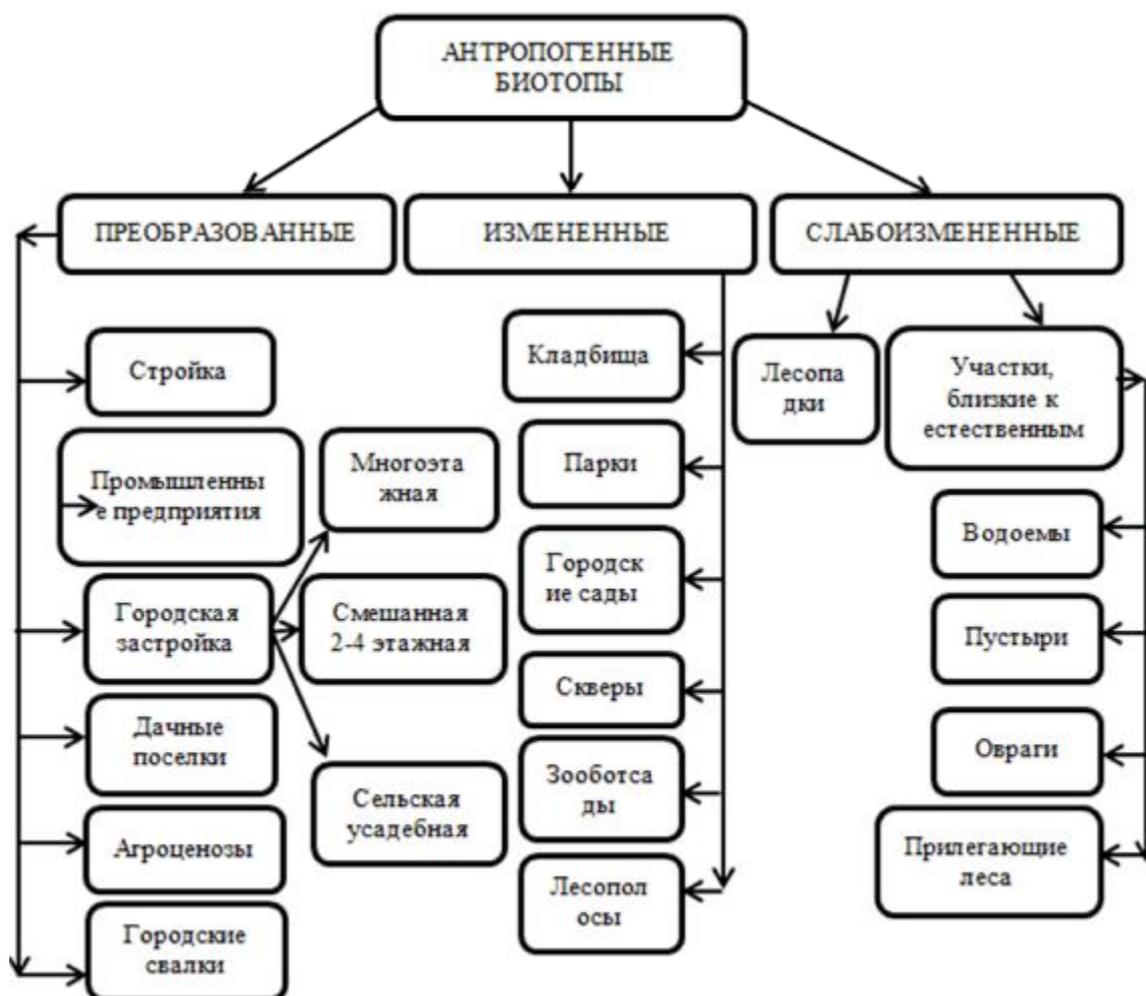


Рисунок 1 - Классификация городских биотопов

Традиционно выделяют несколько типов размещения популяций и сообществ. Из них пятнистое (агрегированное) предусматривает наличие относительно гомогенных участков определенного размера более или менее резко ограниченных друг от друга, что является следствием гетерогенности среды [4, 5, 6]. Исследование и выделение отдельных городских биотопов и рассмотрение ха-

рактера размещения как отдельных видов птиц, так и их орнитокомплексов полностью подтверждают агрегированный характер их пространственного размещения в городской экосистеме. Эти пятна образуют скопления более высокого ранга. Так, использование методов вариационной статистики позволили по критерию Стьюдента определить достоверную разность между отдельными городскими биотопами. По видовому составу, характеру пребывания и использования территории, плотности населения птиц отличается авифауна скверов, городских садов, парков и т.д. Однако, каждый из этих биотопов входит в состав более крупного территориального участка, например, в различные типы городской застройки, которые также включены в территориальные выделы еще более высокого ранга.

Рассматривая экологические и градостроительные аспекты среды, в которой существуют рядом с человеком и различные животные, нельзя забывать и этносоциальную обстановку, которая может стать определяющей для жизни в городах, особенно таких заметных организмов, как птицы. Например, в Индии в городах наблюдается огромное скопление различных животных, которые охраняются религиозными обычаями. Феноменальным является обилие хищных птиц, в городах можно встретить десятки черных коршунов, бенгальских грифов, стервятников и др. [7]. В Среднем Поволжье, где проживают десятки различных национальностей, культура и уклад жизни этих народов определенным образом влияют на состав авифауны. Например, у татар территория кладбищ является своеобразным резерватом с ограничением посещения людьми, поэтому на территориях татарских кладбищ гнездятся редкие виды птиц. Известно несколько колоний серых цапель, которые существовали на территории кладбищ до тех пор, пока полностью не оказались в окружении городских кварталов.

Экологи выделяют три основных типа изменений среды обитания: циклические изменения, т.е. периодически повторяющиеся при смене времен года; направленные изменения, происходящие в течение продолжительного периода; хаотические изменения, появляющиеся резко и без определенного ритма воздействия. В антропогенных экосистемах на птиц эти группы изменений также действуют. Циклические изменения при периодическом многократном воздействии из поколения в поколение в ходе естественного отбора привели к возникновению ряда особенностей образа жизни, которые сами по себе являются сезонными, циклически повторяющимися. В наиболее общем виде в условиях урбанизированной среды повторяется годовой цикл размножения, миграций и другие сезонные изменения. Фенологические явления, обусловленные комплексом абиотических факторов, в антропогенных условиях претерпевают изменения, что выражается в более продолжительном времени фенологических явлений, в более раннем или позднем их начале или окончании. Так, репродуктивный период синантропных птиц в условиях города более продолжителен. Голуби начинают гнездиться с февраля, их репродуктивный период может продолжаться до декабря. Многие воробьиные птицы успевают вывести за сезон 2-3 и более выводков. Благоприятные условия незамерзающих водоемов городов, их большая безопасность изменяет сроки миграций птиц. При наличии стоков теплых вод с ТЭЦ и других промышленных предприятий незамерзающие водоемы могут сохраняться всю зиму. Так, кряквы и другие водоплавающие задерживаются в городах до самых сильных морозов, отлетают только тогда, когда не остается участков с открытой водой, где они могли бы плавать. Наблюдается продвижение к северу области зимовок перелетных птиц, обитающих в городах, и, следовательно, сокращение протяженности их сезонных миграций, что является шагом к формированию оседлости (кряквы, грачи, скворцы, рябинники).

Процесс заселения и освоения птицами антропогенных территорий (синантропизация) и формирование орнитоценоза городской экосистемы подчиняется следующим основным закономерностям:

- Городские экосистемы состоят из видов, обладающих широкой экологической пластичностью, которая обеспечивает им формирование адаптаций к новым и постоянно меняющимся условиям. Наиболее благоприятно сочетание трофической и топической пластичности.
- В каждой экологической группе птиц, связанной с определенным биотопом, отличающейся характером питания, гнездования и другими особенностями биологии птиц, существует один-два вида, жизненные потребности которых в наибольшей степени удовлетворяются в условиях городской экосистемы.
- Сохранение в черте городов участков с естественными местообитаниями ускоряет входение в городскую экосистему многих, населяющих эти территории видов. Они служат переходными зонами для большинства потенциальных синантропов.

- Освоение городской территории идет по биотопам - аналогам природных местообитаний, сохраняющих свойства естественных экосистем. Осваиваются микростации, физиономически сходные с материнскими нишами. Многие виды первоначально заселяют парки, городские кладбища и лишь затем жилые кварталы. Эти биотопы служат переходными зонами при заселении города многими видами.
- Внедрение в антропогенный ландшафт, как известно, происходит чаще у границ ареала, в более трудных для жизни вида условиях. В Палеарктике это происходит, преимущественно, на северных и северо-восточных границах ареалов. В краевых частях ареала часто наблюдается нарушение стереотипа гнездования. Периферическая часть области гнездования характеризуется мозаичным распределением населения вида, низким уровнем обилия, скачкообразным характером кривых динамики обилия. Условия периферической части ареала менее благоприятны, чем его центр.
- Деятельность человека оказывает влияние на качественный и количественный состав авифауны. Наблюдаются колебания численности, связанные с антропогенными факторами, хозяйственной деятельностью человека, в результате которых одни виды могут увеличивать численность или резко ее сокращать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На изменение условий среды обитания птицы реагируют адаптацией поведения, начиная от незначительных его изменений до появления новых экологических форм – птиц - синантропов.
2. Новые формы поведения приводят к изменению характера распространения и численности птиц.
3. Указанные выше механизмы освоения орнитокомплексами урбанизированных местообитаний и, в целом, характер функционирования городской экосистемы свидетельствуют о формировании на антропогенно трансформированной территории своеобразной системы живых организмов.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Мазинг В.В. 1984. Экосистема города, ее особенности и возможности оптимизации. - Экологические аспекты городских систем: 181-191
- [2]Atkins A. 2012. Animal Cities: Beastly Urban Histories. p. 294.
- [3]Криволицкий Д.А. 1971. Современные представления о жизненных формах животных. – Экология 3: 19-25
- [4]Азовский А.И., Чертопруд М.В. 1998. Масштабно-ориентированный подход к анализу пространственной структуры сообществ. - Журнал общей биологии 59 (2): 117-136
- [5]Гиляров А.М. 1990. Популяционная экология. 191 с.
- [6]Смуров А.В., Полищук Л.В. 1989. Количественные методы оценки основных популяционных показателей: статистический и динамический аспекты. 208 с.
- [7]Галушин В.М. 1982. Адаптации хищных птиц к современным антропогенным воздействиям.- Зоологический журнал 61 (7): 1088-1096

Глава III/2: МОНИТОРИНГ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ МОСКВЫ Chapter III/2: Monitoring Heavy Metals in Soils of Moscow

Olga V. Plyaskina*1; Dmitry V. Ladonin²

DOI 10.25680/4588.2018.19.20.195

*Эл. Почта: ollp@mail.ru

1. ЗАО «ОХФК», Киевское ш. 10 км, 249020 Обнинск, Россия

2. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Факультет почвоведения, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, 119991 Москва, Россия

РЕЗЮМЕ. Целью работы было охарактеризовать состояние ТМ в почвах и уличной пыли в одном из территориальных округов г. Москвы и особенности их современного поступления, выбрать оптимальные подходы к оценке состояния ТМ в городских почвах. Из разных функциональных зон округа (газоны жилой зоны, скверы, пустыри, обочины автомобильных дорог, всего более 40 точек отбора) отобрали и проанализировали образцы поверхностного слоя почв, уличную пыль, а в зимнее время – снег и атмосферный воздух. Были определены основные химические свойства почв и уличной пыли, талой снеговой воды, и содержание в пробах ТМ (более 10 элементов): общее, в неселективных вытяжках, распределение по формам соединений, оценено атмосферное поступление ТМ. Показана необходимость использования нескольких различных вытяжек для получения полной и правильной картины состояния ТМ в городской среде. Показана важная роль уличной пыли в функционировании городской экосистемы как возможного источника вторичного загрязнения ТМ и потенциальной опасности для здоровья людей.

Abstract. The aim of the work was to describe the condition of heavy metals (HM) in soils and street dust in one the districts of Moscow city and the peculiarities of their modern atmospheric fall-out, to choose optimal approaches to the estimation of HM condition in city soils. From different functional zones of the district (living blocks, parks, road sides, waste ground, in total more than 40 sampling sites) we picked samples of upper soil layer, street dust and in winter time – snow and air. Analyzed them for main chemical properties and HM content (more than 10 elements): total, in non-selective and selective extracting solutions. It was shown that it is necessary, besides total content of HM, to use at least two more extracting solutions of different power to get the full and right image of HM condition in city environment. Also the important role in city functioning of street dust as a possible secondary source of contamination and a potential hazard for people was shown.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тяжелые металлы, городские почвы, уличная пыль, химический состав снега, фракционный состав соединений, атмосферное загрязнение.

Keywords: heavy metals, urban soils, street dust, fractional distribution of heavy metals, atmospheric fall-out, snow chemical composition.

ВВЕДЕНИЕ

При мониторинге городской среды, которая отличается большой изменчивостью и неоднородностью, необходимо использовать комплексный подход, но в то же время анализируемые показатели должны быть информативными, не слишком трудозатратными и правильно интерпретироваться. При оценке загрязнения почвы тяжелыми металлами (ТМ) необходимо принимать во внимание состав их соединений в почве. Характер взаимодействия ТМ с почвенными компонентами зависит от многих факторов и определяет возможность дальнейшей миграции ТМ в грунтовые воды, их доступность растениям, потенциальную угрозу живым организмам, в т. ч. человеку. Во многих городах уличная пыль – неотъемлемый компонент городской экосистемы [1, 2] (Рисунок 1) и может оказывать на её функционирование значительное влияние: являться вторичным источником загрязнения почв и атмосферы, а также наносить прямой вред здоровью человека, попадая в лёгкие при вдыхании, и растениям, оседая на листьях.

Анализ снега (твёрдого осадка и снеговой воды) и атмосферного воздуха позволяет оценить современные тенденции поступления ТМ, их количество и некоторые качественные характеристики.

В этой статье представлены результаты наших работ по оценке возможностей комплексного изучения содержания и современного поступления ТМ на примере почв Юго-Восточного административного округа г.Москвы (ЮВАО).

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВЕ И УЛИЧНОЙ ПЫЛИ



Рисунок 1– Уличная пыль – часть городской экосистемы

В пробах почв и уличной пыли (фракция <0,1 мм), помимо основных физико-химических характеристик [6], определяли количество ТМ, извлекаемое 1 н. азотной кислотой, ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 4,8 (ААБ) [3], общее содержание [4] и фракционный состав соединений ТМ по схеме [5]. Количественное определение металлов (Na, Mg, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Ag, Cd, Ba, Pb) проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS).

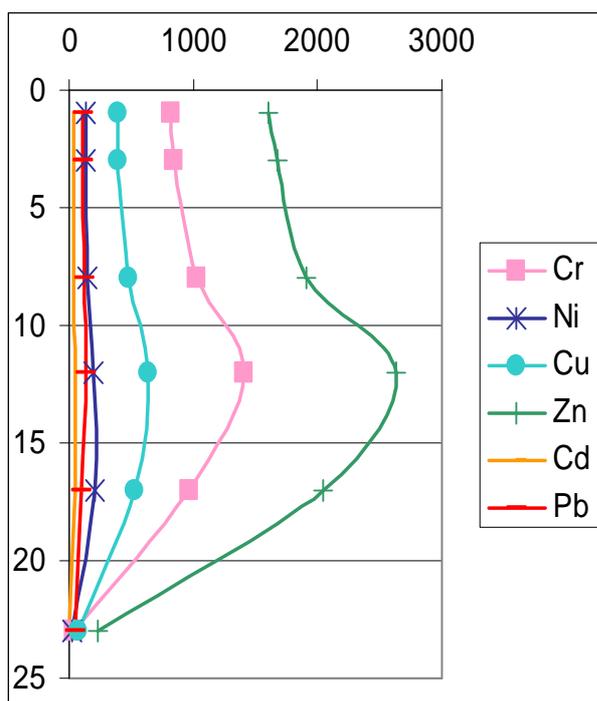
Содержание ТМ в почвах сильнее варьирует, размах между максимальным и минимальным значениями в несколько раз выше, чем в уличной пыли. В целом, уличная пыль характеризуется более высоким содержанием ТМ, особенно меди, цинка и свинца (Таблица 1).

Сравнение состава ассоциаций ТМ в почвах и в уличной пыли показывает, что в большинстве случаев между ними отсутствует пространственная связь, и это подтверждает предположение о различиях в поступлении ТМ в почву и уличную пыль. Однако в части точек выявляется связь между содержанием в почвах и в уличной пыли свинца.

Таблица 1. – Содержание ТМ в 1 н HNO₃ вытяжке из почв и уличной пыли (медианное значение, мг/кг)

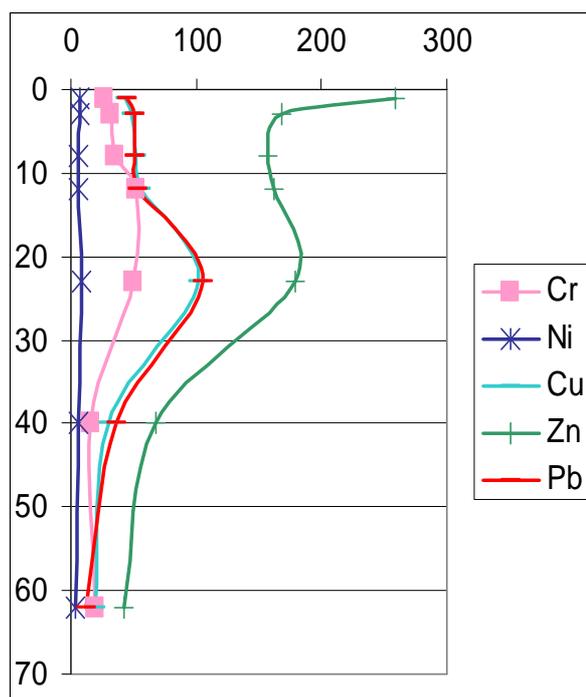
Элемент	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Почва	6,32	14,0	182	1,93	4,72	22,2	105	0,66	24,0
Уличная пыль	10,1	20,8	274	4,38	10,4	75,2	321	1,16	67,8

Анализ профильного распределения ТМ в двух почвах с территорий различного использования (Рисунок 2) показал, что профильное распределение, несмотря на разный уровень загрязнения, имеет схожий характер: на глубине 15-25 см наблюдается некоторое увеличение концентраций хрома, никеля, меди, цинка, кадмия и свинца, а ниже 30 см слоя – значительное снижение концентраций этих элементов. Обычно в ненарушенных почвах наиболее обогащен ТМ верхний слой (до 10 см), затем наблюдается падение содержания ТМ. В антропогенных почвах такое распределение часто нарушается и регулируется не атмосферными выпадениями, биологическим накоплением и внутрипрофильной миграцией, а зависит от содержания ТМ в насыпных грунтах, которые могут быть как загрязненными, так и, наоборот, более чистыми.



см

a)



см

b)

Рисунок 2 – Распределение по профилю ТМ (1н азотнокислая вытяжка) в почвах территорий различного использования а) пустырь возле Южного порта; б) городской сквер

ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ СОЕДИНЕНИЙ ТМ В ГОРОДСКИХ ПОЧВАХ

Данные, получаемые по результатам фракционирования соединений ТМ дают возможность понять, насколько исчерпан или не исчерпан ресурс почв и их возможность прочно закреплять поступающие ТМ, а также оценить формы поступления ТМ.

При сильном загрязнении почв катионы различных ТМ начинают конкурировать между собой за взаимодействие с реакционными центрами [6], при этом доля прочно связанных соединений наименее конкурентоспособного элемента снижается. Такая картина наблюдалась нами в двух точках с очень высоким суммарным уровнем загрязнения ТМ, что привело к увеличению доли специфически сорбированного, т.е. способного к миграции, и доступного растениям, никеля.

Если же почвенный ресурс не исчерпан, то распределение ТМ по формам соединений в почвах в первую очередь зависит от химических свойств самих ТМ и от особенностей поступления ТМ в почву.

Так, ванадий, хром, кобальт прочно закреплены в почве за счет взаимодействия с минеральными компонентами. Для меди и свинца характерным является взаимодействие с органическим веществом почв, кроме того, медь связана с железистыми минералами, а свинец – более прочно за-

креплен в почве за счет глинистых минералов. Цинк и кадмий достаточно подвижны в почве и значительная доля этих ТМ находится в непрочно поглощённом состоянии.

В уличной пыли, по сравнению с почвой, выше доля ТМ в составе остаточной фракции, это может быть следствием увеличения в уличной пыли по сравнению с почвой неизменённых соединений ТМ техногенного происхождения. Одновременно в уличной пыли наблюдается повышенное содержание доли непрочно поглощённых ионов кадмия, кобальта, меди и свинца.

Для отдельных элементов выявляются различия между распределением по фракциям при низком уровне загрязнения и при более высоких уровнях, что показывает преимущественные пути закрепления ТМ в почве: медь – за счет взаимодействия с органическим веществом, хром – с железистыми минералами.

Влияние химических свойств для городских почв ЮВАО г. Москвы на распределение ТМ по фракциям почти не выражено.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕСЕЛЕКТИВНЫХ ВЫТЯЖЕК И СЕЛЕКТИВНОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ

Использование методик фракционирования ТМ [5] или BCR хотя и несет значительное количество дополнительной информации о состоянии ТМ в почве, но является достаточно трудоемким. Гораздо более быстрым вариантом является использование так называемых неселективных вытяжек из почв. В России чаще всего используют 1 н. HNO_3 и ААБ [3]. Однако при этом упускается из виду, что для разных ТМ в эти вытяжки переходят катионы из разных почвенных соединений и связанные с почвенными компонентами с разной силой, и это надо учитывать при интерпретации полученных результатов.

Как показывает сравнение фракционного состава соединений ТМ с содержанием ТМ в 1 н. азотнокислой вытяжке, при обработке почвы 1 н. азотной кислотой для разных ТМ в вытяжку переходят группы соединений разной подвижности [8]. Например, для меди – это соединения с органическим веществом и железистыми минералами, достаточно прочно связанные с почвенными компонентами, а для цинка – в значительной мере непрочно поглощённые почвой катионы.

Сравнение количеств ТМ, извлекаемых ААБ и переходящих в первые две вытяжки при фракционировании [5] показало, что ААБ (рН 4,8) в большинстве случаев извлекает дополнительное количество ТМ по сравнению с 3% уксусной кислотой (рН 2,25), которая используется в схеме фракционирования. Это можно объяснить тем, что ААБ имеет большую концентрацию непротонированных ацетат-ионов, способных образовывать комплексы с ТМ. Дополнительно извлекаемое количество ТМ согласуется с константами устойчивости ацетатных комплексов ТМ: чем больше константа устойчивости, тем большее количество ТМ извлекается ААБ по сравнению с 3% уксусной кислотой. Таким образом, количество «подвижных» соединений различных ТМ, извлекаемых ААБ, зависит не только от прочности их связи с почвенными компонентами, но и от устойчивости их комплексов с ацетат-ионом.

Тем не менее мы считаем, что комплексное использование данных вытяжек и осознанный подход к интерпретации получаемых результатов дают дополнительную информацию о состоянии ТМ в почве. Так, при сравнении доли кислоторастворимых соединений от общего содержания ТМ в почве и уличной пыли видно, что она выше в уличной пыли для Cr, Co, Ni, Cu, Zn. Это может быть связано с тем, что в пыли накапливаются кислоторастворимые соединения этих ТМ техногенного происхождения.

Доля ТМ, переходящих в ААБ по отношению к их общему количеству, в уличной пыли для исследованных элементов, ниже или такая же, исключение составляют Mn, Co, Pb. Таким образом, мы наблюдаем в пыли более высокое содержание свинца, чем в почве, и к тому же выше доля относительно подвижных его соединений.

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО ПОСТУПЛЕНИЯ ТМ СО СНЕГОМ

Из ТМ в растворимой форме в почву поступают цинк, марганец, медь, никель и свинец. Достоверной корреляционной связи между содержанием водорастворимых форм ТМ и ТМ в твёрдой фазе не наблюдается. Ассоциации ТМ, поступающих со снеговым осадком, а также уровни поступления ТМ не соотносятся с ассоциациями и содержанием ТМ в тех же точках в почвах. Общее содержание ТМ в почвах отражает результат многолетнего воздействия источников загрязнения, наложенного на природное количество ТМ. Кроме того, состав и интенсивность атмосферных выпадений из техногенных источников могут значительно меняться за время действия предприятий.

Элементные спектры в твердом снеговом остатке и в атмосферном воздухе в некоторых случаях отличаются, а в некоторых случаях между ними наблюдается значимая связь. Так, при анализе снега и атмосферного воздуха вдоль Московской кольцевой автодороги (МКАД) для цинка и никеля наблюдается корреляция ($R^2=0,8$) между содержанием в атмосферном воздухе и в твердом снеговом остатке, в то время как для внутривороних территорий такой закономерности отмечено не было, а содержание никеля в атмосферном воздухе было близко к нулю. В целом, для внутривороних территорий различия в элементном составе атмосферного воздуха и снегового остатка сильнее, чем для прилегающей к МКАД территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Городские территории являются сложным объектом для мониторинга и не могут быть охарактеризованы только одним параметром, например валовым содержанием ТМ в верхнем слое почвы.
2. Анализ уличной пыли дает важную дополнительную информацию для характеристики качества городской среды, а также для анализа возможных путей миграции ТМ. В силу происхождения уличной пыли содержание и состав ТМ в ней занимают промежуточное положение между современными атмосферными выпадениями и почвой, где ТМ накапливаются за весь период её существования. К тому же состав уличной пыли может значительным образом влиять на качество жизни в городе.
3. Комплексное использование неселективных вытяжек и правильная интерпретация результатов анализа может дать дополнительную информацию при мониторинге городских почв, в то же время не являясь таким трудозатратным, как селективное последовательное фракционирование.
4. Для территорий с высоким и постоянным уровнем атмосферного поступления ТМ анализ твердого снегового остатка и атмосферного воздуха несут сходную информацию. Однако каждый из этих методов оценки атмосферного поступления ТМ обладает своими особенностями, и данные, полученные разными методами могут значительно отличаться для некоторых элементов, а также в случае низкого и неравномерного поступления ТМ с атмосферными выпадениями.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Chutke N.I., Ambulkar M.N., Garg A.N. An environmental pollution study from multielemental analysis of pedestrian dust in Nagpur city, Central India. *Sci. Total Environ.*, 164, 1995, p. 185-194.
- [2]Shaneen N., Munir H. Shah, Jaffar M. A study of airborne selected metals and particle size distribution in relation to climatic variables and their source identification. *Water, Air and Soil Pollut.*, 164, 2005, p. 275-294.
- [3]Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами. Под. ред. Зырина Н.Г. и Малахова С.Г., М., Гидрометеоиздат, 1981, 108 с.
- [4]Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Method 3051, revision 0, CD-ROM, 1994, 14 p.
- [5]McLaren R. G., Crawford D. W., Studies on soil copper, I. The fractionation of copper in soils. *J. Soil Sci.*, v. 24, 1973, p. 172-181.
- [6]Пляскина О.В., Ладонин Д.В. Heavy metal pollution of urban soils. *Eurasian Soil Science* 42(7), 2009, p. 816-823.
- [7]Ладонин Д.В., Пляскина О.В. Фракционный состав соединений меди, цинка, свинца и кадмия в некоторых типах почв при полиэлементном загрязнении. Вестник Московского университета, серия 17, "Почвоведение". 2003, №1, стр. 8-16.
- [8]Пляскина О.В., Ладонин Д.В. К вопросу о применении 1 н. азотнокислой вытяжки при исследовании загрязнения почв тяжёлыми металлами. Актуальные проблемы геохимической экологии. Материалы V международной биогеохимической школы. Семипалатинск, 2005, с. 490-492.

Глава III/3: РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ МАССОВОЙ ДОЛИ НЕФТЕ-ПРОДУКТОВ В КВАРЦЕВОМ ПЕСКЕ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Chapter III/3: Development of Reference Materials of Oil Products in Quartz Sand for the Metrological Support of Ecological Monitoring

Галина А. Ступакова*, Клара Г. Панкратова, Владимир И. Щелоков, Елена Э. Игнатьева, Татьяна И. Щиплецова, Дмитрий К. Митрофанов

DOI 10.25680/7595.2018.40.53.196

*Эл. Почта: yniia55@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Прянишникова, ул. Прянишникова» 31А, 127550 Москва, Россия

РЕЗЮМЕ. Существующие стандартные образцы недостаточно полно отвечают требованиям контроля загрязнения сельскохозяйственных почв нефтепродуктами в процессе экологического мониторинга. Разработана процедура изготовления стандартного образца массовой доли нефтепродуктов в кварцевом песке (ПЗН-01) для контроля качества анализов при определении содержания нефтепродуктов в почвах методом флуориметрии. Метод включает добавление к песчаной матрице раствора нефтепродукта в легколетучем неполярном органическом растворителе, который затем, после тщательного перемешивания, полностью удаляется испарением при комнатной температуре. Специальные исследования показали, что разработанный стандартный образец характеризуется достаточной однородностью и стабильностью в течение срока его действия. Аттестованное значение стандартного образца было найдено в межлабораторном эксперименте, с участием 23 аккредитованных испытательных лабораторий.

Abstract. The available reference materials are insufficiently suitable for the control of the contamination of agricultural soils with oil products in the course of ecological monitoring. A procedure was developed for the preparation of a certified reference material containing oil products in quartz sand for the on-line and statistical control of analysis quality during the fluorimetric determination of oil products in soils, grounds, and bottom sediments. The procedure includes the addition of a solution of oil product in a volatile nonpolar organic solvent to the sand matrix, thorough mixing, complete evaporation of solvent under room temperature, and inter-laboratory metrological certification of the prepared reference material. Special investigations showed that the developed reference material is sufficiently homogeneous and stable in time. The certified value of reference material was determined in an inter-laboratory experiment with the participation of 23 accredited test laboratories.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стандартный образец, содержание нефтепродуктов в почвах, флуориметрический метод определения, метрологическое обеспечение

Keywords: reference material, oil products in soils, fluorimetric determination, metrological support

ВВЕДЕНИЕ

Содержание нефтепродуктов в почве – один из важнейших показателей при почвенном экологическом мониторинге.

К основным физико-химическим методам определения содержания нефтепродуктов в почве, применяющимся в лабораториях экологического профиля, являются: гравиметрический [1], ИК-спектрометрический [2], флуориметрический методы [3], которые существенно различаются по основным характеристикам, влияющим параметрам и средствам контроля [4].

В настоящее время в основных методах определения содержания нефтепродуктов в почвах используются два варианта государственных стандартных образцов (ГСО):

ГСО для калибровки и градуировки средств измерений;

ГСО для аттестации и контроля точности методик выполнения измерений содержания нефтепродуктов в почвах.

К ГСО первого вида относятся стандартные образцы содержания нефтепродуктов в органических растворителях. Они, очевидно, непригодны для контроля методик определения содержания нефтепродуктов в почвах, которые включают, кроме стадии измерения оптического параметра

раствора нефтепродукта в органическом растворителе, стадии экстракции нефтепродукта из анализируемой пробы почвы, очистки экстракта и его разбавления.

К настоящему времени разработан ряд ГСО состава почвы, загрязненной нефтепродуктами. Эти ГСО представляют собой песчаную матрицу, содержащую вазелиновое или турбинное масло. Однако агрохимические лаборатории анализируют главным образом почвы сельскохозяйственных земель и окружающих территорий, основными загрязнителями которых являются нефтепродукты, используемые для дорожной, строительной и сельскохозяйственной техники: разные виды топлива (летучие нефтепродукты, которые относительно быстро испаряются) и моторные масла. Таким образом, указанные СО являются скорее образцами-имитаторами, поскольку состав используемых для их изготовления соединений отличается от состава нефтепродуктов, загрязняющих почвы сельскохозяйственного назначения. Выпуск новых типов СО также диктуется потребностями Испытательных лабораторий АПК, проанализированными на основе учета их заявок, поступающих во ВНИИ агрохимии.

Таким образом, вопрос о разработке оптимальных стандартных образцов для метрологического обеспечения и сопровождения измерений содержания нефтепродуктов в почвах нельзя считать закрытым.

ЦЕЛЬ МЕТОДА

Нашей задачей явилось создание стандартного образца, содержащего нефтепродукт, типичный для загрязнения сельскохозяйственных земель, и предназначенный для контроля качества измерений содержания нефтепродуктов в почвах в лабораториях АПК, а также других отраслей экономики, при обеспечении однородности свойств стандартного образца и его стабильности во времени.

ПРИНЦИП И ПРОЦЕДУРА

Поставленная задача решалась методом изготовления стандартного образца состава дисперсных материалов, аттестованного по массовой доле нефтепродуктов. При изготовлении образца к песчаной матрице добавлялся раствор нефтепродукта в легколетучем неполярном органическом растворителе, который затем, после тщательного перемешивания, полностью удаляли испарением при комнатной температуре (в течение 5–7 дней).

Выбор песка в качестве твердой матрицы стандартного образца связан с тем обстоятельством, что нефтепродукты в почве взаимодействуют ее с органическими и глинистыми компонентами. Твердая фаза почвы состоит из частиц, различающихся по размеру, форме, природе (различные почвенные минералы, соли, гумус, а также растительные и животные остатки) и, следовательно, по адсорбирующей способности в отношении нефтепродуктов, что приводит к неравномерному распределению нефтепродукта между компонентами почвы. Поэтому в качестве твердофазной матрицы стандартного образца должен быть использован химически инертный однородный сыпучий материал, не реагирующий с нефтепродуктами. Исследовались возможные варианты: минеральный компонент сухой песчаной почвы после отмывания органических веществ, чистый кварцевый песок, дробленое стекло. При этом сыпучий материал должен быть подготовлен соответствующим образом: отмыт от возможных примесей, высушен и просеян сквозь сита для получения примерно равного размера частиц, чтобы обеспечить возможно более равномерные условия адсорбции нефтепродуктов на их поверхности. Кварцевый песок представляется наилучшим выбором, поскольку это однородный, химически стабильный материал (содержит до 99% оксида кремния SiO_2); в то же время, песок является компонентом практически любой почвы (иногда основным компонентом) и его физические свойства аналогичны свойствам почвы.

Однородность материала стандартного образца и стабильность его метрологических характеристик в течение всего срока годности обеспечиваются использованием кварцевого песка и его предварительной подготовкой. Песок тщательно очищается от видимых загрязнений, отмывается от органических, а также пылевидных, глинистых и илистых примесей, высушивается до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре и просеивается через набор сит для отбора фракции от 0,1 до 0,5 мм. Полученный песок отличается высокой степенью чистоты и однородности по сравнению с образцами любых типов почв.

С другой стороны, однородность стандартного образца обеспечивается использованием раствора нефтепродукта в органическом растворителе. Бóльший объем и меньшая вязкость раствора по сравнению с чистым нефтепродуктом позволяют достичь равномерного распределения нефтепродукта во всем объеме стандартного образца.

Стабильность стандартного образца также обеспечивается отсутствием взаимодействий нефтепродукта с твердофазной матрицей вследствие отсутствия в отмытом песке органических, пылевидных, глинистых и илистых материалов.

В качестве нефтепродукта использовали моторное масло (М-10Г2К по ГОСТ 8581-78), которое предназначено для автотракторных дизелей и автомобилей КамАЗ, ЗИЛ, и является, таким образом, основным нефтепродуктом, загрязняющим сельскохозяйственные земли. Для того чтобы приблизить результаты анализа стандартного образца к реальным уровням загрязнителя в почвах, нефтепродукт в стандартные образцы вносили в следующих диапазонах содержания (млн⁻¹): 50–500; 500–2000; более 2000.

Растворитель для моторного масла, используемый при изготовлении СО, должен соответствовать следующим требованиям:

- хорошая растворимость моторного масла;
- легкая испаряемость растворителя;
- малая токсичность растворителя;

– минимальное влияние остаточных количеств растворителя на анализ содержания нефтепродукта.

В качестве растворителя можно использовать растворители, применяемые для экстракции нефтепродуктов в различных методиках определения в почве: четыреххлористый углерод, хлороформ и гексан. Все они являются неполярными органическими соединениями и поэтому хорошо растворяют моторное масло и быстро испаряются, поскольку имеют низкие температуры кипения и, следовательно, достаточно высокое давление паров при комнатной температуре. Молекулы растворителей не содержат кратных связей или элементов (например, O, S, N), которые могут существенно влиять на результаты последующего определения нефтепродуктов методами спектроскопии.

Существенным недостатком четыреххлористого углерода и хлороформа является их большая токсичность (они относятся к веществам второго класса опасности). Поэтому все работы с четыреххлористым углеродом и хлороформом следует проводить в вытяжном шкафу, с соблюдением более строгих требований безопасности, чем при работе с гексаном (четвертый класс опасности).

Таким образом, для приготовления СО могут быть использованы все описанные растворители, но наиболее подходящим является гексан.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Аттестованное значение СО было найдено в межлабораторном эксперименте, в котором принимали участие 43 аккредитованных в установленном порядке испытательных лаборатории.

Исследование расчетного срока годности (т.е. периода времени, в течение которого изменение аттестованной характеристики – в нашем случае, содержания нефтепродукта, не выходит за пределы погрешности метода определения) для образцов, приготовленных из почвы бурой легкосуглинистой и из кварцевого песка, показало, что образец песка существенно стабильнее, чем образец почвы.

Разработанный и утвержденный стандартный образец массовой доли нефтепродуктов в кварцевом песке ПЗН-01 для контроля качества анализов с использованием флуориметрического метода (ГСО 10461-2014) и метрологические характеристики партий ГСО приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Метрологические характеристики отдельных партий стандартного образца массовой доли нефтепродуктов в кварцевом песке ПЗН-01

Партия ГСО	Интервал аттестованного значения, млн ⁻¹	*Границы относительной погрешности аттестованного значения СО ($P=0,95$), %
ПЗН-01-1	100–250	±7
ПЗН-01-2	500–1500	±7
ПЗН-01-3	1500–3500	±5

*Соответствуют расширенной неопределенности (U) аттестованного значения при $k=2$, ($P=0,95$).

Следует отметить, что на сегодняшний день необходима большая работа по разработке метрологического обеспечения и сопровождения измерений в области определения содержания нефтепродуктов в почвах, включая проведение сличительных испытаний и разработку средств контроля

(стандартных образцов). Необходимо также разработать общую концепцию обеспечения единства измерений в области оценки нефтяного загрязнения почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана процедура изготовления стандартного образца массовой доли нефтепродуктов в кварцевом песке (ПЗН-01) для контроля качества анализов при определении содержания нефтепродуктов в почвах методом флуориметрии.
2. Метод включает добавление к песчаной матрице раствора нефтепродукта в легколетучем неполярном органическом растворителе, который затем, после тщательного перемешивания, полностью удаляется испарением при комнатной температуре.
3. Разработанный стандартный образец аттестован методом межлабораторного эксперимента.
4. Совершенствование метрологического обеспечения и сопровождения измерений в области экологического мониторинга требует разработки общей концепции обеспечения единства измерений для оценки нефтяного загрязнения почв.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ПНД Ф 16.1.41-04. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах почв гравиметрическим методом, 2004.

[2] ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии (издание 2005 г.).

[3] ПНД Ф 16.1:2.21-98 Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом на анализаторе жидкости "Флюорат-02" (М03-03-2012) (издание 2012 г.).

[4] Ступакова Г.А., Панкратова К.Г., Щелоков В.И., Игнатъева Е.Э. К вопросу обеспечения единства измерений в области оценки содержания нефтепродуктов в почвах. – Плодородие. – 2011. – № 1 (58). – С. 24–25.

Глава III/4: БИОИНДИКАЦИЯ ПОЧВ АГРОЛАНДШАФТОВ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ Chapter III/4: Bioindication of Agrolandscapes` Soils in the Area of a Copper-Nickel Deposit

Лидия А. Яблонских*; Татьяна А. Девятова; Антон В. Белик; Ирина В. Румянцева
DOI 10.25680/9927.2018.36.44.197

*Эл. Почта: lidij-jblonskikh@yandex.ru

Воронежский государственный университет, Медико-биологический факультет, Университетская пл.1, 394018 Воронеж, Россия

РЕЗЮМЕ. Проведено детальное изучение ландшафтной структуры территории месторождения меди и никеля, расположенной в лесостепной провинции юго-восточной части Окско-Донской равнины (Центрально-черноземный регион). Ландшафтным картографированием установлено, что на исследуемой местности доминируют агроландшафты (70 % от общей площади). Фооновыми почвами являются лесостепные подтипы черноземов. Изучено и охарактеризовано физико-химическое, химическое и биологическое состояние черноземов. Определен диапазон колебаний валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почвах сопряженных ландшафтов. Выявлены корреляционные связи между ферментативной активностью и показателями химических свойств черноземов. Высокая активность большинства гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов прослеживается в черноземах плакоров по сравнению с их аналогами на склонах. Сделан вывод о том, что данные исследования имеют существенное значение в биоиндикации процессов трансформации черноземов в ходе недропользования. при нормировании техногенных нагрузок на почвенные экосистемы и оценке экологического ущерба в процессе техногенеза.

Abstract. A detailed study of the landscape structure the territory of the copper and nickel deposit located in the forest-steppe province of the southeastern part of the Oka-Don plain (Central Chernozem region) is carried out. Landscape mapping are revealed that is dominated by agrolandscapes in the surveyed area (70% of the total area). The background soils are forest-steppe subtypes of Chernozems. The physicochemical, chemical and biological state of Chernozems has been studied and characterized. The range of variations of gross and mobile forms of heavy metals in soils of adjoining landscapes is determined. Correlation links between enzymatic activity and indicators of the chemical properties of Chernozems are revealed. High activity of most hydrolytic and oxidation-reduction enzymes can be traced in Chernozems of placers in comparison with their analogues on slopes. It is concluded that these studies are of significant importance in the bioindication of the processes of transformation of Chernozems in the course of mining resource use.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: медно-никелевое месторождение, агроландшафт, ландшафтное картографирование, черноземы, свойства, ферментативная активность, биоиндикация почв.

Keywords: Copper-nickel deposit, agrolandscape, landscape mapping, chernozems, properties, enzymatic activity, bioindication of soils

ВВЕДЕНИЕ

Многолетними исследованиями почвоведов доказана ведущая роль показателей ферментативной активности почв при оценке экологического состояния почвенного покрова. Это связано с высокой чувствительностью этого показателя к внешним воздействиям и простотой его определения. По изменению ферментативной активности можно оценить протекание большого ряда биохимических процессов в почвах: минерализации, нитрификации, азотфиксации, денитрификации и еще целого ряда функциональных показателей почвенных микробоценозов. В связи с этим изучение ферментативной активности приобретает особую актуальность для почв, подвергающихся высокой антропогенной нагрузке в районах добычи полезных ископаемых или, планируемых под данное мероприятие.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования проводились в Новохоперском районе Воронежской области. Для изучения состояния агроландшафтов использовались методы полевой ландшафтной картографии. Всего было обследовано 22 ключевых участка (Рисунок 1). На них проведены детальные исследования ландшафтных фаций и их сопряженных рядов. На изученных участках были отобраны почвенные образцы для определения ферментативной активности, физико-химических и химических свойств и содержания тяжелых металлов. Отбор образцов осуществлялся с применением стандартных методов отбора проб при экологическом мониторинге. Лабораторное определение показателей экологического состояния почв проводилось по общепринятым методам в почвоведении [1 - 3].

АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОЗЕМОВ АГРОЛАНДШАФТОВ

Исследуемая территория располагается в Южном Битюго-Хоперском эколого-географическом районе лесостепной провинции Окско-Донской равнины в пределах водораздела рек Савала-Елань. Участок лежит на высоте 141-161 м над уровнем моря. На исследуемой территории рельефообразующее значение имеют мощные (до 100 м) рыхлые песчано-глинистые отложения усманской и кривоборской свит неогена. Согласно почвенно-климатическому районированию Центрально-Черноземного региона, исследуемая территория относится к Воронежско-Сампурскому району типичных мощных черноземов, которые составляют основной фон почвенного покрова исследуемой территории [5]. В районе распространения медно-никелевого месторождения черноземы типичные обычно встречаются вместе с черноземами выщелоченными, реже с черноземами обыкновенными, занимают плакорный и склоновый типы местности, что составляет 70 % от общей площади исследования [6]. Указанные подтипы черноземов представлены в основном среднеческими среднеческими видами средне- и тяжелосуглинистыми разновидностями, но в переходной полосе от террасового типа местности к склоновому, среди них распространены их малоческие аналоги легкого гранулометрического состава. Мощность гумусового горизонта колеблется от 63 до 78 см. В пахотном слое суглинистых черноземов содержится 6,0 - 6,5 % гумуса, а в слое 0 - 20 см залежи - 6,8 - 7,1 %. Количество общего азота в этих горизонтах равно 0,25 - 0,38 %.

Сумма обменных кальция и магния в верхнем полуметровом слое почвы равна 30 - 41 ммоль(экв)/100 г почвы. Реакция почвенного раствора в верхнем горизонте черноземов типичных близка к нейтральной или нейтральная, черноземов выщелоченных - слабокислая.

Варьирование средних показателей валовых форм содержания тяжелых металлов в пахотном горизонте изученных почв плакорных и склоновых фаций равно:

1. As и Hg < 0.1; Pb 5.3 - 7.2; Cd 0.12 - 0.19; Cu 8.6 - 14.0; Zn 24.0 - 42.0; Ni 12.0 - 20.0; Cr 6.4 - 15.6; Co 4.9 - 7.2; Mn 107 - 286 мг/кг (плакорные фации);
2. As и Hg < 0.1; Pb 5.0 - 5.3; Cd 0.10 - 0.12; Cu 8.1 - 8.3; Zn 19.0 - 22.0; Ni 11.8 - 12.0; Cr 5.0 - 6.0; Co 4.0 - 6.3; Mn 95 - 105 мг/кг (склоновые фации).

Ряд по степени убывания их количеств выглядит таким образом: Mn > Zn > Ni > Cu > Cr > Pb > Co > As > Hg > Cd, в котором первые три элемента постоянно занимают ведущие места, а Pb и Cr могут меняться местами. Полученные показатели содержания тяжелых металлов (ТМ) свидетельствуют о том, что в почвах склоновых фаций в сравнении с показателями почв плакоров, заметно ниже, что является следствием их миграции в подчиненные ландшафтные фации. Так, в почвах нижних частей склонов, на делювиальных шлейфах содержание таких элементов, как кадмий, медь, цинк и никель в 1,5-2,0 раза выше по отношению к почвам выше расположенных фаций (Таблица1). Доля подвижных форм ТМ от их валового содержания в черноземах агроландшафтов не превышает 1,5-4,6%, за исключением марганца, количество которого составляет 8,2-18,5%. Величина показателя суммарного загрязнения почв во всех изученных случаях в среднем равна 0,3-0,8, в единичных случаях - 1,33, что соответствует допустимой категории загрязнения земель [4].



Рисунок 1 - Пример ключевого участка агроландшафта

Черноземы плакоров проявляют следующую ферментативную активность: активность инвертазы - 23.76 - 25.73 мг глюкозы на 1 г почвы за 24 часа, каталазы - 5.23 - 5.42 мм O₂ за 1 мин на 1 г почвы за 24 часа, протеазы - 0.25 - 0.30 мг N-NH₂ на 1 г почвы за 24 часа и уреазы - 1.24 - 1.38 мг NH₃ на

1 г почвы за 24 часа (Таблица 2). У черноземов склонового типа местности активность всех ферментов уменьшается, в среднем на 10 % .

Выявлены корреляционные связи между ферментативной активностью и реакцией почвенной среды ($r = 0.8$), содержанием гумуса ($r = 0.9$), щелочногидролизуемым азотом ($r = 0.85$) и подвижным фосфором ($r = 0.8$).

Наиболее чувствительным ферментом к воздействию тяжелых металлов является инвертаза ($r = 0,7$), а устойчивым ферментом - каталаза ($r = 0,5$). На уровень ферментативной активности наибольшее влияние оказывает свинец ($r = 0,8$). По степени чувствительности к тяжелым металлам ферменты располагаются в следующий ряд: инвертаза > уреазы > фосфатаза > каталаза.

Данные исследования имеют существенное практическое значение в биоиндикации процессов трансформации черноземов в ходе недропользования, при нормировании техногенных нагрузок на почвенные экосистемы и оценке экологического ущерба в процессе техногенеза.

Таблица 1 - Содержание валовых и подвижных форм тяжелых металлов в верхних горизонтах почв агроландшафтов

Тип местности	Уровни фонового содержания тяжелых металлов, мг/кг									
	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Cr	Co	Mn	Ag	Hg
Валовые формы										
Плакорный	5.30 - 7.20	0.12 - 0.19	8.6 - 14.0	24.0 - 42.0	12.0 - 20.0	6.4 - 15.6	4.9 - 7.2	107 - 286	< 0.1	< 0.1
Склоновый	5.0 - 5.3	0.10 - 0.12	8.1 - 8.3	19.0 - 22,0	11.8 - 12.0	5.0 - 6.0	4.0 - 6.3	95 - 105	< 0.1	< 0.1
Подвижные формы										
Плакорный	0.07 - 0.1	<0.01	0.31 - 0.34	0.64 - 0.67	0.55 - 0.65	<0.1	<0.05	19.8 - 23.5	-	-
Склоновый	0.23 - 0.37	<0.01	0.24 - 0.29	0.32 - 0.39	0.39 - 0.48	<0.1	<0.05	16.5 - 18.9	-	-

Таблица 2 - Ферментативная активность черноземов агроландшафтов

Тип местности	Угодье; глубина, см	Протеаза, мг N-NH ₂	Инвертаза, мг глюкозы	Каталаза, мл O ₂ за 1 мин	Уреазы, мг NH ₃
		На 1 г почвы за 24 часа			
Плакорный	Пашня, 0 - 20	0.34	25.73	5.42	1.38
		0.37	23.76	5.23	1.24
Склоновый	Пашня, 0 - 20	0.15	19.15	3.29	1.10
		0.12	18.41	3.13	1.15

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определена специфика ландшафтной структуры территории медно-никелевого месторождения. Она представлена агроландшафтами, которые составляют 70 % от общей исследуемой площади. Ведущую ландшафтообразующую роль играют плакорные и склоновые типы местности, фоновыми почвами которых являются лесостепные черноземы под различными агроценозами.
2. Выявлены параметры физико-химических, химических и биологических свойств черноземов плакорного и склонового типов местности. Наиболее благоприятными свойствами обладают черноземы плакоров, которые содержат 6.0 - 6.5% гумуса, имеют близкую к нейтральной и нейтральную реакцию почвенного раствора, степень насыщенности основаниями равную 95 - 98%, высокую и среднюю обеспеченность подвижными элементами питания, высокие показатели ферментативной активности.
3. На период исследовательских работ установлено, что почвы агроландшафтов не загрязнены тяжелыми металлами. По всем изученным элементам отсутствуют превышения предельно допустимых концентраций.

4. Наиболее чувствительными критериями оценки устойчивости почв агроландшафтов являются биологические. Инвертазная активность показала себя как наиболее чувствительный индикатор экологического состояния почв агроландшафтов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воробьева, Л.А. Химический анализ почв / Л.А. Воробьева. М.: Изд-во МГУ, 1998. - 272 с.
[2] Колбовский, Е.Ю. Ландшафтоведение / Е.Ю. Колбовский. - М.: Академия, 2006. - 406 с.
[3] Мотузова, Г.В. Экологический мониторинг почв / Г.В. Мотузова, О.С. Безуглов. - М.: Академический проект; Гаудеамус, 2007. - 237 с.
[4] Мозолевский, И.В. Пространственное распределение тяжелых металлов в почвах агроландшафтов юго-востока Воронежской области / И.В. Мозолевский, Л.А. Яблонских, Т.А. Девятова, И.В. Румянцева // Сахарная свекла. - 2016. - №5. - С. 15 - 17.
[5] Эколого-географические районы Воронежской области / под ред. Ф.Н. Милькова. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 1996. - 216 с.
[6] Управление земельными ресурсами / под ред. Т.А. Девятовой. - Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2015. - 186 с.

Глава III/5: МИКРОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЧВ ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ СИБИРИ (РОССИЯ) Chapter III/5: Micromorphological Peculiarities of Soils in Technogene Landscapes of Coal-Mine Industries in Siberia (Russia)

Евгения А. Гуркова*1; Денис А. Соколов2; Сергей П. Кулижский3; Сергей В. Лойко3
DOI 10.25680/7777.2018.17.62.198

*Эл. Почта: sollygeohennet@mail.ru

- 1.Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской Академии наук, ул. Интернациональная, д. 117А, 667007 Кызыл, Республика Тува, Россия
- 2.Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской Академии наук, проспект Академика Лаврентьева, д. 8/2, 630090 Новосибирск, Россия
- 3.Томский государственный университет, проспект Ленина, д. 36, 634050 Томск, Россия

РЕЗЮМЕ. В статье представлены результаты микроморфологических исследований молодых почв, сформированных на поверхности отвалов каменноугольных разрезов, расположенных в различных климатических зонах Сибири. Диагностирован ряд микроморфологических признаков начального почвообразования. Установлено, что степень их сходства и отличия определяется, с одной стороны, характеристиками исходного субстрата, а с другой стороны - климатическими условиями, в которых формируются молодые почвы. Показано, что оценка характера почвообразовательных процессов с учетом зональной специфики дает возможность прогнозировать дальнейшую эволюцию почв техногенных ландшафтов.

Abstract. The results of micromorphologic studies of young soils formed on the surface of dumps of coal-mines located in different climatic zones of Siberia are presented in this article. A number of micromorphologic signs of initial soil formation have been diagnosed. It is established that the degree of their similarity and difference is determined, on the one hand, by the characteristics of the initial substrate, and on the other hand by the climatic conditions in which the young soils are formed. It is shown that the evaluation of the nature of soil-forming processes taking into account the zonal specificity makes it possible to predict the further evolution of soils of technogenic landscapes.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: молодые почвы, техногенные ландшафты, микроморфологические особенности, сканирующая электронная микроскопия, микромасса почв, железисто-марганцевые микроконкреции, гумус, ксероморфизм.

Keywords: mine soils, technogenic landscapes, micromorphologic features, scanning electronic microscopy, soil micromass, Fe-Mn nodules, humus, xeromorphism

ВВЕДЕНИЕ

Проблема диагностики процессов почвообразования, определение скорости их протекания в молодых почвах техногенных ландшафтов в настоящее время является одной из самых острых, поскольку тесным образом связана с проблемой восстановления техногенных ландшафтов. Особенно она актуальна для угледобывающих регионов России, где площади отвалов пород составляют несколько сотен тысяч гектаров [1]. Длительное время эти объекты функционируют как техногенные пустыни и, тем самым, наносят непоправимый вред окружающей среде и здоровью населения прилегающих территорий [2]. Минимизация негативных экологических последствий достигается в случае активизации на поверхности техногенного ландшафта почвообразовательных процессов. Их направленность и интенсивность выявляются посредством многоуровневых морфогенетических исследований, которые, будучи дополненными оценкой почвообразовательного потенциала климатогенных и геогенных факторов, позволяют выявить почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов. Подобные исследования, на взгляд авторов, возможны с применением средств электронной сканирующей микроскопии. Выявление микро- и субмикроморфологических особенностей почв техногенных ландшафтов Сибири и оценка характера протекающих в них процессов с применением таких средств и явилось целью настоящего исследования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследований выбраны почвы отвалов каменноугольных разрезов Сибирского федерального округа России. Их суммарная площадь по разным оценкам составляет от 100 до 300 тысяч гектар, а с зонами косвенного влияния эти цифры могут увеличиваться в разы. Техногенные ландшафты рассматриваемых территорий имеют разный возраст и образованы хаотичной смесью различных по размеру обломков углевмещающих пород (аргиллиты, алевролиты, песчаники). Для выявления зональных особенностей и признаков зональных процессов почвообразования изучены молодые почвы автоморфных позиций техногенных ландшафтов, расположенных в гумидном и субгумидном (горно-таежная и лесостепная зоны Кемеровской области), семиаридном (степи Хакасии), а также аридном и аридном экстраконтинентальном климате (степи Тувы).

Предварительно выполнена детальная макроморфологическая диагностика исследуемых почв, в соответствии с общепринятыми методами и классификацией почв техногенных ландшафтов [3], выделены 4 типа молодых почв – инициальные, органо-аккумулятивные, дерновые и гумусово-аккумулятивные эмбриоземы. В международной реферативной базе почвенных ресурсов эти почвы наиболее близки по признакам к Ecranic Technosols, Proto-folic Leptosols, Proto-folic Regosols и Proto-umbric Regosols соответственно [4]. Выявление микроморфологических особенностей молодых почв техногенных ландшафтов проводилось при помощи общепринятых микро- и субмикроморфологических методов [5]. Отбор образцов производился из верхних горизонтов молодых почв. Для сравнения были изучены образцы естественных почв, развитых вблизи техногенных ландшафтов, а также образцы почвообразующих пород, на которых они сформированы. Пробоподготовка для микроморфологических исследований также осуществлялась в соответствии с общепринятыми способами. Учитывая высокую каменистость, в ряде случаев изучались отдельные агрегаты. Микроскопирование проводили в два этапа с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-3000 с приставкой для элементного анализа поверхности Bruker Quantax 70, при увеличении до 3000. Интерпретация полученных результатов выполнялась в соответствии с «Interpretation...» [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные микро- и субмикроморфологические исследования выявили ряд особенностей молодых почв техногенных ландшафтов. Установлено, что грубо- и тонкодисперсная масса эмбриоземов резко отличается от таковой в естественных почвах прилегающих территорий: частицы менее 1 мм естественных почв и лессовидного суглинка имеют близкую к сферической форму, частицы почв отвалов ближе к плитчатой или чешуйчатой форме (Рисунок 1), которая является признаком, унаследованным от слоистой текстуры почвообразующей породы. В процессе выветривания обломки этих пород распадаются на отдельные макро- и микропластины. Благодаря этому, а также за счет различной скорости прогревания и остывания частиц различных размеров, происходит их горизонтальная ориентация в профиле, что отвечает наиболее компактному способу упаковки частиц подобной конфигурации. Образовавшаяся в результате такой дезинтеграции обломков пород тонкодисперсная масса занимает полости между более крупными отдельностями, что обуславливает свойственную эмбриоземам отвалов каменноугольных разрезов высокую плотность сложения

[6], а сформированный в результате такой упаковки горизонт, несмотря на высокую каменистость, служит водоупором [27]. Вследствие этого, несмотря на относительную молодость изученных почв, их микромакса, крайне редко ассоциирована в микроагрегаты. Показано, что скелетно-агрегатная структура была выявлена только в гумусово-аккумулятивных эмбриоземах отвалов возрастом более 20 лет, сформированных в условиях субгумидного климата (Рисунок 2а). Для сравнения, в зональных выщелоченных черноземах (Chernozems) прилегающих территорий агрегирована вся почвенная масса (Рисунок 2б). Важно отметить, что для агрегатов техногенных молодых почв характерна однопорядковая структура и «угловатость» микроагрегатов (Рисунок 3). Подобная «угловатость» также свидетельствует о слабой интенсивности структурообразующих процессов и, как следствие, о преобладании унаследованных породных признаков. Перечисленные микроморфологические признаки начальных стадий почвообразования можно обнаружить в молодых почвах техногенных ландшафтов практически всех регионов Сибири, где проводились исследования. Как было упомянуто выше, для этих регионов характерно разнообразие климатических условий, что не может не сказаться на формировании в эмбриоземах специфических почвообразующих признаков, отражающих влияние зональных условий. В молодых почвах на участках 20-летних техногенных отвалов в степных районах обнаружены продукты неполной минерализации растительных остатков. На образование такой формы органического вещества в аридных экстраконтинентальных (криоаридных) климатических условиях указывал в свое время В.И. Волковинцер [8]. Крайне скудные запасы почвенной влаги, высокие температуры на фоне короткого биологически активного периода способствуют тому, что поступающие в почву растительные остатки длительное время не разлагаются, высушиваются, т.е. «мумифицируются». Мумификация является специфическим процессом накопления органических веществ, характерным для зональных почв криоаридных территорий. Однако проведенные исследования обнаружили описываемое «мумифицированное» органическое вещество в молодых почвах и других регионах, в том числе и с семиаридным климатом (Рисунок 4.). Этот факт позволяет сделать вывод о том, что формирующиеся молодые почвы техногенных ландшафтов этих территорий характеризуются более выраженным ксерофизмом по сравнению с зональными. Вследствие этого, в техногенных ландшафтах здесь формируются эмбриоземы лишь начальных стадий – инициальной и органо-аккумулятивной [9].

Совершенно иная тенденция для почвенных процессов установлена при микроморфологическом анализе почв отвалов возрастом более 20 лет в субгумидных и гумидных районах. Здесь в профиле эмбриоземов выявлены новообразования железно-марганцевых микроконкреций. В пользу их формирования непосредственно в этих почвах (автохтонность) говорят их нерезкие границы и сферoidalность. Присутствие таких конкреций указывает на существование в молодых почвах с одной стороны, контрастного окислительно-восстановительного режима, с другой стороны указывает на возникновение условий глеегенеза, что в целом характеризует развитие зональных почвообразовательных процессов – глеевого и подзолистого [10-11]. Рассмотренные процессы нельзя назвать ведущими в изученных молодых почвах субгумидных районов. На современных стадиях развития эмбриоземов ведущим остается процесс гумусонакопления.

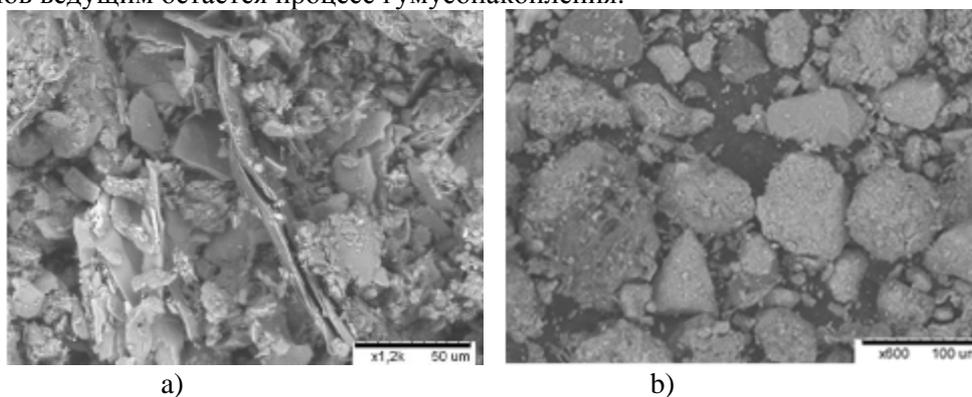


Рисунок 1 - Микрофотографии фракции <math><0,25\text{ мм}</math> инициального эмбриозема а) сформированного на техногенном элювии углевмещающих пород; б) сформированного на лессовидном суглинке

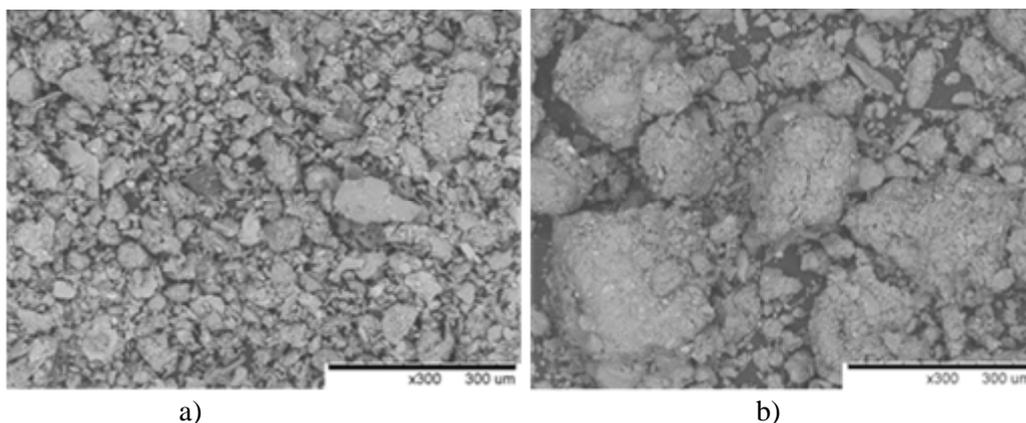


Рисунок 2 - Микрофотографии фракции $<0,25\text{ мм}$ а) горизонт АС гумусово-аккумулятивного эмбриозема; б) горизонт А чернозема выщелоченного

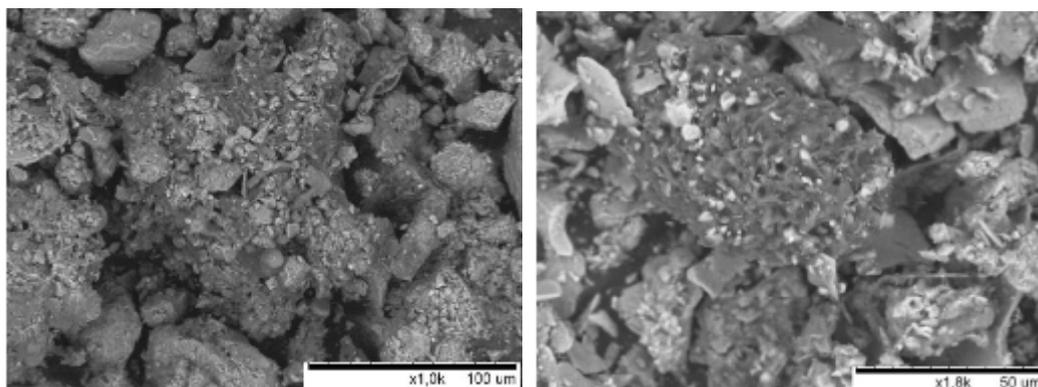


Рисунок 3 - Почвенные микроагрегаты горизонта АС гумусово-аккумулятивного эмбриозема

Рисунок 4 – Мумифицированное органическое вещество

Выявленное в процессе исследований единственное отличие микроконкреций, наблюдаемых в почвах техногенных ландшафтов, от таковых в зональных, заключается в ином соотношении железа и марганца: оно составляет 75, в то время как в дерново-подзолистых и серых лесных почвах оно колеблется в пределах от 2 в гумусовых, до 25 в элювиальных в разной степени оглееных горизонтах [11]. Такое несоответствие обусловлено не столько особенностями формирования конкреций в эмбриоземах, сколько различными методическими подходами к их изучению. При анализе железисто-марганцевых конкреций традиционными методами определяется элементный состав новообразования в целом, в то время как при использовании сканирующей электронной микроскопии анализируется только верхний его слой мощностью 1 мкм. Как было установлено В.Н. Шобой [12], формирование подобных новообразований происходит в результате биологической сегрегации с последующим физико-химическим осаждением на поверхность конкреции железа и марганца. Поскольку окислительно-восстановительные пары Fe^{2+} - Fe^{3+} и Mn^{2+} - Mn^{4+} имеют разные стандартные потенциалы, во многом определяющие растворимость этих элементов [13], образование конкреции сопровождается попеременным их осаждением. В итоге она имеет дифференцированное по содержанию элементов слоистое строение. При этом широкое отношение Fe/Mn говорит не о высокой степени гидроморфизма [14], а о резко контрастном окислительно-восстановительном режиме эмбриоземов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Общая масса исследуемых почв характеризуется преобладанием унаследованных породных признаков, что выражается в отсутствии почвенных агрегатов. Единичные агрегаты свойственны для гумусово-аккумулятивных эмбриоземов, сформированных в условиях субгумидного климата. Форма этих образований говорит о слабой переработанности субстрата структурообразовательными процессами.

2. Микромасса эмбриоземов имеют пластинчатую форму. Благодаря этому в процессе функционирования молодых почв происходит их уплотнение с образованием водоупорных слоев, что в условиях гумидного и субгумидного климата приводит к сезонному переувлажнению почв и создает предпосылки для глеевого и подзолистого процессов. Формируемый в результате контрастный окислительно-восстановительный режим сопровождается образованием железисто-марганцевых конкреций, характерной чертой которых является широкое соотношение Fe/Mn.
3. В гумидном климате в условиях кратковременно-застойного водного режима происходит оподзоливание верхней части профиля. Учитывая зональную специфику, дальнейшая эволюция почв будет сопровождаться формированием мощных элювиальных горизонтов и выносом продуктов трансформации материала отвалов.
4. В субгумидном климате в благоприятных условиях синхронного течения элювиально-глеевого процесса и гумусонакопления развитие молодых почв будет проходить с формированием почв, близких по свойствам не к черноземам, как считалось ранее, а к серым лесным.
5. Почвы техногенных ландшафтов аридных областей характеризуются более выраженным ксероморфизмом по сравнению с зональными. В этих условиях процесс трансформации органического вещества сопровождается не гумификацией, а мумификацией растительных остатков. В итоге эволюция почв на поверхности отвалов каменноугольных разрезов достигает только органо-аккумулятивной, реже дерновой стадии почвообразования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Потапов, В.П., Мазикин, В.П., Счастливцев, Е.Л. Вашлаева, Н.Ю. Геоэкология угледобывающих районов Кузбасса. Новосибирск: Наука, 2005. 660 с.
- [2]Андроханов, В.А., Курачев, В.М. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 224 с.
- [3]Курачев, В.М. Андроханов, В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов. Сибирский экологический журнал. 2002. № 3. С.255–261.
- [4]IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2014.
- [5]Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths / Eds. G. Stoops, V. Marcelino and F. Mees. Elsevier, 2010.
- [6]Семина, И.С., Беланов, И.П., Шипилова, А.М., Андроханов, В.А. Природно-техногенные комплексы Кузбасса: Свойства и режимы функционирования. Наука. Сиб. отд-ние, 2013. 396 с.
- [7]Госсен, И.Н. Водопроницаемость почв на участках рекультивации различного направления. Рекультивация нарушенных земель в Сибири. Кемерово, 2009. С.8–10.
- [8]Волковинцер, В.И. О почвообразовании в степных котловинах юга Сибири. Почвоведение. 1969. №8. С.3–11.
- [9]Соколов, Д.А., Кулижский, С.П., Доможакова, Е.А., Госсен, И.Н. Особенности формирования почв техногенных ландшафтов в различных природно-климатических зонах юга Сибири. Вестник ТГУ. 2012. №364. С.225–229.
- [10]Андроханов, В.А. Специфика и генезис почвенного покрова техногенных ландшафтов. Сибирский экологический журнал. 2005. №5. С.795–800.
- [11]Зайдельман, Ф.Р., Никифорова, А.С. Классификация, свойства и информационное значение марганцево-железистых конкреционных новообразований. Память почв. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. С.314–351.
- [12]Шоба, С.А., Балабко, П.Н. Микростроение и состав марганцево-железистых новообразований почв лесной зоны. Микроморфология, диагностика почв и почвообразовательных процессов. М.: Наука, 1983. С.21–33.
- [13]Кауричев, И.С., Орлов, Д.С. Окислительно-восстановительные процессы и их роль в генезисе и плодородии почв. М.: Колос, 1982. 247 с.
- [14]Водяницкий, Ю.Н. Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2009. 184 с.

Основная глава 8.2 Агроэкологический мониторинг Main Chapter 8.2 Agri-Environmental Monitoring

Глава III/6: МОНИТОРИНГ ПЕСТИЦИДОВ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ Chapter III/6: Monitoring of Pesticides in Agroecosystems

Михаил И. Лунёв

DOI 10.25680/2535.2018.93.70.199

Эл. Почта: milunev@yandex.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, ул. Прянишникова, 31а, 127550 Москва, Россия

РЕЗЮМЕ. Пестициды являются в большинстве своем токсикантами по своей химической природе и ксенобиотиками по отношению к биосфере и человеку. Эффективный контроль за их последствием на окружающую среду осуществляется в рамках агроэкологического мониторинга. Изменение объемов и ассортимента применяемых пестицидов оказывает существенное влияние на уровни и характер накопления их остаточных количеств в объектах агроэкоэкологии. При осуществлении контроля пестицидов, относящихся к группе «стойких органических загрязнителей», учитываются положения Стокгольмской конвенции о СОЗ. Определены объекты и процессы, требующие первоочередного внимания при проведении работ по мониторингу пестицидов в агроэкоэкологиях.

Abstract. Most pesticides are toxicants by their chemical nature and xenobiotics for the biosphere and humans. Efficient control of their aftereffect on the environment is exercised within the framework of agroecological monitoring. Changes in the volumes and range of applied pesticides significantly affect the level and character of accumulation of their residues in agroecosystem components. Control of pesticides from the group of persistent organic pollutants meets the Stockholm Convention for POPs requirements. Objects and processes demanding primary attention during the monitoring of pesticides in agroecosystems are specified.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сельскохозяйственные угодья, почвы, мониторинг, остатки пестицидов, стойкие органические пестициды.

Keywords: agricultural lands, soils, monitoring, pesticide residues, persistent organic pesticides.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из глобальных экологических проблем, возникающих в процессе сельскохозяйственного производства, является негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека пестицидов - химических веществ, предназначенных для борьбы с вредными организмами и возбудителями болезней как непосредственно в сельском хозяйстве, так и в ряде других отраслей народного хозяйства (лесное хозяйство, санитарно-эпидемиологический надзор и др.).

Наряду с очевидным положительным эффектом со временем стали проявляться и отрицательные последствия широкого применения химических средств защиты растений: накопление их остатков в почве, водоемах, возникновение устойчивых к пестицидам популяций вредных организмов, появление новых экономически значимых видов вредителей, губительное действие на представителей полезной флоры и фауны, потенциальная угроза здоровью человека, нарушение естественных биоценозов и т.д. [1,2]. Пестициды и близкие им соединения, являясь в большинстве своем типичными ксенобиотиками, составляют от 3 до 5% общего количества различных химических соединений, являющихся продуктами хозяйственной деятельности человека и выявленных в окружающей природной среде [3]. В этой связи возникла необходимость всестороннего изучения экотоксикологии пестицидов и принятия мер по контролю и охране биосферы и здоровья человека. Важным инструментом в решении этих задач является мониторинг окружающей среды в целом и отдельных ее компонентов, в том числе относящихся к сфере сельскохозяйственного производства.

ПРИНЦИПЫ, СТРУКТУРА И РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ПЕСТИЦИДОВ В АГРОЭКОСИСТЕМАХ

Мониторинг пестицидов отвечает общей методологической структуре экологического мониторинга [4,5] и включает систему наблюдений, оценку и прогноз уровней загрязнения пестицидами с последующей разработкой мероприятий по оздоровлению окружающей среды. В системе наблюдений выделяют фоновый и импактный мониторинг. Первый из них включает систему наблюдений за общебиосферными явлениями, условиями и состоянием среды без учета влияния локальных антропогенных воздействий. Импактный или локальный мониторинг представляет собой систему наблюдений в регионе за последствиями поступления пестицидов или других ксенобиотиков из установленных источников [6].

Особенностью пестицидов, применяемых в земледелии, является необходимость их внесения непосредственно в агрофитоценозы для достижения хозяйственных целей. В этой связи экологотоксикологический контроль за последствиями применения пестицидных препаратов наиболее эффективно может быть реализован в рамках почвенно-экологического мониторинга. Непосредственный контроль за уровнями накопления остаточных количеств пестицидов и их метаболитов является частной задачей такого мониторинга.

В Российской Федерации эту задачу решают различные организации и ведомственные службы. Так, санитарно-эпидемиологическая служба страны контролирует уровни загрязнения почвы и разрабатывает нормативные документы по ограничению вредного воздействия химических веществ на условия жизни и здоровье населения. В Министерстве природных ресурсов и экологии России контроль за негативным воздействием пестицидов на окружающую среду является составной частью экологического мониторинга, при этом основное внимание уделяется таким объектам, как почва и вода. Значительная работа по контролю остаточных количеств пестицидов в природных объектах проводилась и проводится системой Росгидромета, при этом ежегодно публикуются его результаты. Регулярный контроль за содержанием остаточных количеств пестицидов в почвах сельхозугодий и растительной продукции проводит агрохимическая служба Минсельхоза России, при этом в последние годы методическую основу такого контроля составляет система реперных участков с характерными технологическими и почвенными условиями [7,8].

Проведение ежегодного контроля позволяет выявить основные изменения и тенденции в уровнях и характере загрязнения пестицидами и другими ксенобиотиками природных объектов и сельскохозяйственной продукции. Весьма показательны в этой связи результаты, полученные в 80-е и 90-е годы прошлого века, когда в России произошло существенное снижение объемов применения средств химизации сельскохозяйственного производства. Если в 1986-1990 гг. активные защитные мероприятия в среднем ежегодно осуществлялись на площади 61,1 млн. га, то в 1991-1995 гг. этот показатель снизился до 31,7 млн. га. Результаты контроля, проведенного агрохимической службой в этот же период, показали, что уменьшение объемов применения пестицидов привело к заметному снижению уровней загрязнения почв (Таблица 1) и растительной продукции их остаточными количествами.

В последние два десятилетия международным сообществом большое внимание уделяется проблемам, связанным с группой химических веществ, известных как «стойкие органические загрязнители» (СОЗ) [9]. Эти высокоустойчивые соединения использовались (и в ряде стран продолжают использоваться) в качестве пестицидов или в промышленности, а также непреднамеренно вырабатываются в виде побочных продуктов горения и в ходе промышленных производств. В настоящее время выделяют более десятка стойких органических загрязнителей, в отношении которых на международном уровне признается необходимость немедленного принятия мер в глобальном масштабе. В их число входят хлорсодержащие пестициды альдрин, хлордан, ДДТ, ГХЦГ, дильдрин, эндрин, гептахлор, мирекс и токсафен. Пути решения проблем СОЗ изложены в Стокгольмской конвенции [10].

Применительно к устаревшим пестицидам, относящимся к СОЗ, а также утратившим свои физико-химические и(или) биологические свойства, стоит задача по их инвентаризации, идентификации и уничтожению. Такие работы во многих странах, в том числе и России, ведутся начиная с середины 1990-х годов.

Таблица 1 - Сводные результаты контроля содержания остаточных количеств пестицидов в почвах сельскохозяйственных угодий Российской Федерации в конце 80-х годов (А) и во второй половине 90-х годов (Б)

Группа пестицидов	Число проанализированных проб, шт.		Доля проб от числа проанализированных, %			
			с обнаружением ОКП		с превышением ПДК	
	А	Б	А	Б	А	Б
Инсектициды	20489	5378	25,4	12,7	4,5	0,3
<i>в том числе</i>						
ХОП	17661	3227	26,2	12,2	11,7	0,3
ФОП	2683	1370	20,8	12,3	0,4	0,15
пиретроиды	145	775	16,5	14,5	10,0	0,3
Гербициды	25842	7079	34,7	22,6	4,9	0,7
<i>в том числе</i>						
сим-триазины	16449	1284	34,3	8,6	7,1	1,0
группа 2,4-Д	5370	3398	35,4	11,3	2,5	1,0
Прочие	4023	2397	36,2	39,2	2,3	0,13
Фунгициды, протравители	562	139	20,6	0	2,9	0
Среднее для всех пестицидов	46893	12596	30,5	15,7	4,7	0,4

Примечания: ОКП - остаточные количества пестицидов; ПДК - предельно-допустимая концентрация; ХОП - хлорорганические пестициды; ФОП - фосфорорганические пестициды.

Места складирования и захоронения устаревших пестицидов, среди которых значительное место занимают хлорорганические инсектициды, являются характерными точечными источниками потенциального и реального негативного воздействия ксенобиотиков на окружающую среду. В этом качестве их необходимо рассматривать как объекты, подлежащие обязательному контролю при проведении как общего экологического мониторинга, так и целевого мониторинга, позволяющего оценивать воздействие пестицидов на окружающую среду.

Результаты обследования отдельных бывших складов химических средств и мест захоронения пестицидов показывают, что в зависимости от уровня сохранности и обустройства этих сооружений степень воздействия на окружающую среду может варьировать от минимальной до весьма серьезной. При обследовании одного из могильников пестицидов в Ростовской области было установлено, что пестициды мигрируют за пределы непосредственного захоронения, при этом в зависимости от их растворимости возможна существенная миграция по профилю почвы и поступление остатков препаратов в грунтовые воды [11]. Средние уровни содержания ДДТ и его метаболита ДДЭ в верхнем слое почвы этого могильника превышали допустимый уровень (Таблица 2).

В современных условиях при планировании и реализации мероприятий по мониторингу пестицидов и других ксенобиотиков сельскохозяйственного происхождения в агроэкосистемах и сельхозпродукции первоочередного внимания требуют следующие объекты и процессы: 1) места хранения и захоронения устаревших пестицидов; 2) почвы под многолетними насаждениями, на которых ранее применялись хлорорганические препараты; 3) сельскохозяйственные угодья, на которых применяются современные малодозовые препараты, способные оказывать фитотоксическое воздействие и последствие на культурные растения; 4) импортируемая сельскохозяйственная продукция из стран, в которых продолжают применяться хлорорганические и другие «проблемные» пестициды; 5) региональная и глобальная миграция ксенобиотиков по воздуху и с водотоками, а также их хозяйственная миграция с продукцией.

Совершенствование методологии работ по мониторингу пестицидов и методов анализа их микроколичеств и внедрение разработок в практику позволяет решать задачу по минимизации воздействия этого достаточно распространенного класса токсикантов на окружающую среду и

человека, поддерживая и углубляя при этом положительный хозяйственный эффект химической защиты растений.

Таблица 2 - Содержание остаточных количеств пестицидов (ОКП) и их метаболитов в пробах почвы и грунта, отобранных с могильника пестицидов

Токсикант	Содержание ОКП, мг/кг	
	почва ¹⁾	грунт ²⁾
<i>n,n'</i> -ДДТ	0,20±0,04	н/о ³⁾
<i>n,n'</i> -ДДЭ	0,18±0,03	н/о
<i>n,n'</i> -ДДД	0,04±0,01	н/о
Прометрин	0,013±0,005	3,09±0,46
Байлетон	н/о	0,78±0,16
Зенкор	н/о	0,07±0,02

Примечания: 1) отобраны 10 проб с поверхности могильника (верхний слой почвы 0-25 см), радиус обследованной площади 50 м; 2) отобраны 2 пробы из контрольных скважин глубиной 11 м, расположенных на расстоянии 3 м от стенки могильника; 3) н/о – не обнаружено; 4) могильник заложен более 30 лет назад.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Мониторинг является эффективным инструментом в оценке эколого-токсикологических последствий применения пестицидов в земледелии. Он реализуется различными ведомствами и службами и позволяет получать достоверную информацию о последствии пестицидов на окружающую среду и здоровье человека.
2. Результаты контроля почв сельхозугодий на содержание остатков пестицидов указывают на выраженную зависимость этого показателя от объемов и ассортимента применяемых пестицидов.
3. Экологические аспекты проблемы стойких органических пестицидов тесно взаимосвязаны с наличием и состоянием мест складирования и захоронения устаревших пестицидов.
4. Последние, как правило, являются характерными точечными источниками негативного воздействия токсикантов на окружающую среду. Их следует отнести к объектам и процессам, требующим первоочередного внимания при реализации мониторинга пестицидов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Brown A.W.A. Ecology of pesticides. N.Y.: J.Wiley and Sons, 1987. 525 p.
- [2] Лунёв М.И. Пестициды и охрана агрофитоценозов. М.: Колос, 1992. 269 с.
- [3] Соколов М.С., Монастырский О.А., Пикушова Э.А. Экологизация защиты растений. Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1994. 462 с.
- [4] Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. М.: Гидрометео-издат, 1984. 560 с.
- [5] Система агроэкологического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения / Сычёв В.Г., Ефремов Е.Н., Лунёв М.И., Кузнецов А.В. – М.: Россельхозакадемия, 2006. 79 с.
- [6] Спиридонов Ю.Я., Ларина Г.Е. Вопросы мониторинга пестицидов в окружающей среде. Агрохимия, 1999, № 11, с. 64-71.
- [7] Методические указания по проведению локального мониторинга на реперных и контрольных участках. М.: ФГНУ Росинформагротех, 2006. 76 с.
- [8] Лунёв М.И. Агроэкологический мониторинг в системе агрохимических исследований: состояние и перспективы. В сб. «Проблемы техногенного воздействия на сферу агропромышленного производства: теория и практика». Обнинск: ВНИИХСРАЭ, 2010. С.26-42.
- [9] POPs. Regulatory actions and guidelines concerning persistent organic pollutants. Geneva: UN, 1998, 267 p.

[10] Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях. С поправками, внесенными в 2009 году. Текст и приложения. www.pops.int; www.dokipedia.ru/document/5201048; www.gosbook.ru/node/26293.

[11] Лунёв М.И. Эколого-токсикологические аспекты проблемы устаревших пестицидов. Вестник РУДН. Сер. «Экология и безопасность жизнедеятельности», 2002, № 6, с.13-19.

Chapter III/7: URANIUM IN PHOSPHATE FERTILIZERS – CHALLENGES AND OUTLOOK

Глава III/7: Уран в фосфатных удобрениях - вызовы и перспективы

Judith Schick; Sylvia Kratz; Ewald Schnug*

DOI 10.25680/7688.2018.31.31.200

Email: ewald.schnug@julius-kuehn.de

Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany

ABSTRACT. Rock phosphates used for the production of mineral P-fertilizers may contain considerable amounts of U. Consequently, U can also be found in P-fertilizers, sometimes exceeding 200 mg U/kg. The regular application of mineral P-fertilizers leads to an average input of 114 t U/yr to agricultural land in Germany (equal to 8.2 g U/(ha*a)). From 1951-2010, this added up to a total amount of 6839 t U (or 493 g U/ha). The input of U to agricultural soils is a potential threat, especially with view to its entrance into the food chain via contaminated drinking water. The input of U by P-fertilizers can be significantly reduced by an increased use of recycling fertilizers (from manure or sewage sludge) which are low in U, or the extraction of U during the production of mineral P-fertilizers.

Резюме. Фосфаты горных пород, используемые для производства минеральных удобрений, могут содержать значительные количества урана (U). Следовательно, уран можно также найти в фосфорных удобрениях, иногда его количество превышает 200 мг U / кг. Регулярное применение фосфорных удобрений приводит к поступлению в среднем 114 тонн U / год на сельскохозяйственные угодья Германии (равное 8,2 г U / (га в год)). С 1951 по 2010 год его количество увеличилось до общей суммы 6839 т. у.е. (или 493 г у.е. / га). Поступление U в сельскохозяйственные почвы является потенциальной угрозой, особенно с точки зрения его попадания в пищевую цепь через загрязненную питьевую воду. Внесение U с фосфорными удобрениями может быть значительно уменьшено за счет увеличения использования возобновляемых удобрений (навоз или осадок сточных вод), которые имеют низкое содержание U, или путем извлечения U при производстве фосфорных минеральных удобрений.

KEYWORDS: P-fertilizers, uranium, soil accumulation, ground water contamination, P-recycling, U-extraction

Ключевые слова: фосфорные удобрения, уран, накопление в почве, загрязнение грунтовых вод; P-рециркуляция, U-экстракция

INTRODUCTION

Phosphorus (P) is an essential plant nutrient [1]. P-fertilizers are used in agriculture to supply sufficient P-amounts to the soils to produce healthy plants and achieve optimum yields - a major prerequisite to maintain the world food production. Commercial mineral P-fertilizers are made from rock phosphates, which may contain high uranium (U) concentrations. Depending on their geographical and geological origin, typical U concentrations in rock phosphate ores range between < 10 and >200 mg/kg [2]. Marine-sedimentary rock phosphates, which make up approximately 80% of the world's production [3], exhibit significantly higher concentrations of U than igneous rock phosphates because during their genesis, U and other trace elements from the seawater were enriched [2; 4; 5]. Since the world's rock phosphate reserves are limited, the amount of "clean" rock phosphates (with low U-concentrations) is not sufficient to cover the global demand for the production of mineral P fertilizers. Thus, also contaminated sources have to be

used by the fertilizer industry. This should cause concern since U is known for its chemical toxicity and its radiological hazard. U can cause not only harm to the environment but also to public health once it has entered the food chain.

U-CONCENTRATION IN DIFFERENT P-CONTAINING FERTILIZERS

Mineral P containing fertilizers are produced by reacting phosphate rock with sulphuric, phosphoric or nitric acid, generating a P containing acid solution which is concentrated in a final evaporation process after several further treatment steps. In that process, U is completely transferred into the acid solution and stays with the P component during the evaporation process, where it is therefore enriched compared to the raw material [2].

Table 1 gives an overview of typical U-concentrations found in different mineral and organic P-containing fertilizers marketed or produced in German speaking countries. Naturally, the highest U concentrations occur in straight P-fertilizers (mean: 89-167 mg U/kg). The high variability reflects the different origins of the rock phosphate ores used to produce the fertilizers. While U concentrations in mineral compound fertilizers (NP, PK, NPK) tend to be lower than those in straight P fertilizers (mean: 16-86 mg U/kg) due to the dilution by other, non-rock phosphate based nutrient sources, they still exceed those found in organic P-sources such as farmyard manures/slurries or sewage sludge (mean: 0.91-3.5 mg U/kg). Data on U in organic fertilizing materials in the German speaking countries is scarce, however, the data reported here is underlined by the findings of [6] who analyzed a series of poultry (n= 37; range 0.49-2.87 mg U/kg; mean: 1.52 mg U/kg) and pig manure (n= 35; range: 1.18-6.08 mg U/kg; 1.63 mg U/kg) in Canada. By mono-incineration of sewage sludge (SS), U is enriched in the ash as a result of mass loss (mean: 6.3 mg U/kg).

Table 1: Mean U-concentrations and ranges in different mineral and organic fertilizers sold or produced in German speaking countries (Germany: [2], [7], [8], [9], [10]; Austria: [11])

	<i>U (mg/kg)</i>			<i>U (mg/kg P₂O₅)</i>			<i>n</i>	<i>Reference</i>
	min	max	mean	min	max	mean		
Commercial mineral fertilizers								
Single Superphosphates (SSP)	42	231	90	217	482	345	9	[7, 11]
Triple superphosphates (TSP)	31	250	122	68	515	285	37	[7, 8]
Partly acidulated rock phos-	77	176	167	365	450	415	29	[7, 8]
Soft ground rock phosphates	38	194	89	199	524	309	7	[7]
NP fertilizers	0.62	191	86	2.8	417	221	62	[7, 8]
PK fertilizers	30	206	69	213	1240	492	30	[7, 8]
NPK fertilizers	0.28	72	16	2.3	399	147	107	[7, 8]
Farmyard slurries and manures								
Pig slurry	0.35	11	3.5	0.71	14	6.8	8	[2]
Cattle slurry	0.15	0.40	0.26	0.76	1.75	1.21	14	[2]
Broiler manure	0.32	5.0	0.68	8.6	176	22	20	[2]
Municipal sewage sludge (from Lower Saxony, average P content: 5% P₂O₅)								
	0.37	1.7	0.91			18	10	[2]
Untreated mono-incineration ash from sewage sludge (24 German mono-incineration facilities)								
	2.0	26	6.3	15	155	41	24	[9]
Struvite (precipitated from municipal waste water treatment)								
	0.10	0.30	0.20	0.37	2.3	1.1	5	[10]

U LOADS AND SOIL ACCUMULATION RESULTING FROM P FERTILIZATION

U is a natural, but minor constituent of the earth's crust (0.9-1.7 mg/kg). European soils contain between 0.8 – 11 mg/kg U. In addition to the geogenic background, U may also enter the soil via anthropogenic activities, e.g. from fossil-fuel power plants but also from P fertilizer works [12].

As a result of the elevated U-concentration in mineral P sources, considerable amounts of U were introduced into agricultural soils via P-fertilization during the last decades. [5] estimated that since 1950, an average of 114 t U/yr were applied to agricultural land in Germany with mineral P-fertilizers (equal to an average of 8.2 g U/(ha*a)), which added up until 2010 to a total amount of 6839 t U (or 493 g U/ha). The contribution of mineral fertilizer bound U to the average background concentrations of agricultural

(top)soils was estimated by the authors to range from 4.4 % to 13.7 %, depending on the parent material (periglacial till on claystones or sand, respectively).

The fate of U once it has entered the soil via P-application is still subject to some scientific debate. U in the soil exists to 80-90% in the U^{+6} oxidation state which is generally known to be very mobile under oxidizing conditions. However, it also can be fixed to the soil when precipitated as uranyl (UO_2^{2+}) or complexed by natural organic matter [4; 12].

Previous studies on the fate of U entering the soil via P-fertilizer application came to contradictory results. [13] and [14] did not detect an increase of plant or soil U as the result of P-fertilization. This is underlined by the studies by [15] and [16], who reported increased U concentrations in surface and ground water as a result of P-application, and, consequently, U input and leaching. In contrast, longterm fertilization trials described by [17] and [18] showed that almost all U that entered the soil accumulated and did neither leach nor was it taken up by plants.

For Germany, a tendency toward elevated U concentrations in the top soils of arable and grass land in comparison to adjacent forest soils was observed, as well. Median values showed differences of 0.15 mg/kg U between agricultural and forest soils. On the groundwater recharge area "Fuhrberger Feld", U concentration in a farmland soil was 81% higher than in a forest soil at a depth of 20 cm, and still 52% higher at 50 cm [19; 20]. Furthermore, it was observed that the readily mobilizable fraction of U increased with total U contents. While this fraction accounted for up to 10% in the farmland topsoil, it was only 2% in the forest soil [19].

The plant uptake of U from agricultural fields seems to be negligible. [2] estimated U plant uptake by typical field crops to range below 0.35 g U/ha, while they calculated annual U loads with mineral P fertilizers between 7.0 - 23 g/ha and year, assuming a P rate of 22 kg P/(ha*a). Calculated annual U-loads were significantly lower for farmyard manure and slurry or for sewage sludge (2.3 and 3.2 g/ha respectively), however, still above estimated plant uptake by almost a factor of 10. Results of pot experiments with P fertilizer rates according to the codes of good agricultural practice have also shown to have, if at all, only to a minor effect on the U concentrations in shoots [21]. Thus it can be assumed, that U on agricultural fields rather accumulates in the soil and might be leached into the ground water. Accordingly, the ingestion of U most likely occurs via drinking water rather than via solid vegetable food.

URANIUM IN GROUND- AND SURFACEWATER

U tends to accumulate in the upper soil layer but a share can also be translocated into lower layers. Especially sandy soils with a low organic matter content are prone to U leaching. Furthermore, lime was identified to increase the U mobility as a result of the formation of soluble carbonate complexes [22]. Accordingly, U that entered the soil can be leached into deeper soil layers and, consequently into surface water and aquifers.

In the "Fuhrberger Feld" U concentrations in the groundwater up to 3.9 $\mu\text{g/L}$ were found and assumed to be derived from the readily mobilizable soil U fraction. It was observed that higher U concentrations in the groundwater appeared with higher U concentration in the soil [19]. However, the share of fertilizer derived U in the groundwater depends strongly on the regional background concentrations in soils. For regions with low natural background concentrations it is estimated that more than 90% of U in the groundwater can be fertilizer-derived. For the North German Plains, a region with very low geogenic background U, one fourth out of 369 drinking water samples displayed concentrations $>0.5 \mu\text{g U/L}$ while two thirds of all samples showed concentrations $>0.1 \mu\text{g U/L}$, interpreted by the authors as potential fertilizer-derived contamination [23; 24].

Consequently, there is an urgent need to set limit values for U in mineral fertilizers on an EU wide legal basis to effectively diminish U loads to agricultural land. In addition to limit concentrations, spatially related "load limits" should be defined based on ecotoxicological considerations [5].

RECYCLING FERTILIZERS

One option to reduce fertilizer-derived U loads to agricultural fields is the substitution of rock phosphate-based fertilizers with P from secondary waste materials. The processing and use of P containing recycling materials also reduces the dependence on the import of rock phosphates from politically instable countries (e.g. Morocco, Tunisia, Syria) or countries who require huge amounts of rock phosphates for the maintenance of their own agricultural production (e.g. USA or China). Based on the amounts produced, the most important P-containing recycling materials are farmyard manures and slurries, followed by rendering by products and their ashes, and biogas digestates. Unfortunately, the transport of manure is very expensive which results in its excessive application in areas with high livestock densities. Therefore, further treat-

ments such as solid/liquid separation or incineration are highly recommended to allow an inexpensive transport of manure-derived P to regions where it is actually needed. Another relevant and promising alternative P source are P recycling products derived from waste water treatment, including P salts precipitated in the treatment process (struvite) or ashes from SS mono-incineration. Since Germany aims at a complete ban for the use of untreated SS in agriculture, only fertilization with SS-based recycling products which are free from inorganic and organic contaminants and supply plant available P will be allowed in the future. Recent analyses of several recycling products from waste water treatment indicate that they display significantly lower U-concentrations than rock phosphate-based fertilizers (see Table 1). Although usually low in U, recycling materials may still exhibit elevated concentrations of other heavy metals, e.g. Al and Fe in SS and Cu and Zn in manures, which has to be considered when using them as P-source, also with view to P-availability.

EXTRACTING U FROM P-FERTILIZERS

A reduction of U-loads resulting from mineral P application can also be achieved by the extraction of U from the phosphate rock. Technically, the extraction of U from phosphoric acid has been developed and refined since the 1960s [25], however, until now, the fertilizer industry has seen no urgent need for establishing this costly step in the routine fertilizer production process. [23] suggest to use the extracted U for energy production as a contribution to climate protection. According to their estimates, the costs for U extraction would not lead to increasing prices for mineral P-fertilizers since the worldwide demand for U for nuclear energy production is rising.

CONCLUSIONS

Mineral P fertilizers may contain considerable amounts of U.

Annually, more than 100 t U enter the soil via mineral P-fertilization in Germany.

The major share of accumulated U in the soil is not taken up by the crops but remains in the soil, constituting a major threat for ground and drinking water.

P containing recycling materials such as farmyard manures/slurries or products from waste water treatment with significantly lower U contents should be considered as an alternative P source for fertilization (or fertilizer production).

The extraction of U from phosphoric acid should be considered as an option to produce “cleaner” mineral fertilizers.

REFERENCES

- [1] Finck, A. 2007. Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten (Hirt's Stichwortbücher). 6. Auflage, Borntraeger.
- [2] Kratz, S., Knappe, F., Rogasik, J., Schnug, E. 2008. Uranium in Agroecosystems. In: de Kok L.J., Schnug, E. (eds.). Loads and fate of fertilizer derived Uranium. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp.179-189.
- [3] Stewart, W.M, Hammond, L.L., Van Kauwenbergh, S.J. 2005. Phosphorus as a natural resource. In: Sims, J.T., Sharpley, A.N. (eds.) Phosphorus: agriculture and the environment. Madison, Wisconsin. ASA, CSSA and SSA, pp. 3-22.
- [4] Read, D., Black, S.; Beddow, H.; Trueman, E.; Arnold, T.; Baumann, N. 2008. The fate of Uranium in phosphate rich soils. In: de Kok L.J., Schnug, E. (eds.), Loads and fate of fertilizer derived Uranium. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp. 65-71.
- [5] Kratz, S., Godlinski, F., Schnug, E. 2011: Heavy metal loads to agricultural soils in Germany from the application of commercial phosphorus fertilizers and their contribution to background concentrations in soils. In: Merkel, B., Schipek, M. (eds.). The new uranium mining boom – challenges and lessons learned, pp. 755-762.
- [6] Sheppard, S.C., Sapinelli, B. 2012. Trace elements in feed, manure and manured soils. In: Journal of Environmental Quality 41(6): 1846-1856.
- [7] Kratz, S., Schick, J., Schnug, E. 2016. Trace elements in rock phosphates and P containing mineral and organo-mineral fertilizers sold in Germany. Science of the Total Environment – Special Issue. Vol. 542 Part B, pp. 1013-1019. Available online: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.046>
- [8] Dittrich, B., Klose, R. 2008. Schwermetalle in Düngemitteln. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft 3/2008.

- [9] Krüger, O., Adam, C. 2014. Monitoring von Klärschlammmonoverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik. UBA Texte 49/2014.
- [10] Zeggel, L., Riedel, H., Marb, C. 2015. Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalem Klärschlamm – Abschlussbericht. Hrsg.: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU).
- [11] Baumgarten, A., Eder, A., Dersch, G., Großgut, G., Humer, F., Herndl, M., Katzlberger, C., Kumpan, M., Landstetter, C., Liebmann, B., Pfundtner, E., Riss, A., Spiegel, H., Zethner, G. 2016. Verhalten von Uran aus Phosphat haltigen Düngern im System Boden-Wasser-Pflanze. Endbericht Februar 2016. AGES Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit.
- [12] Kabata-Pendias, A. 2010. Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition. CRC Press, Boca Raton.
- [13] Mortvedt, J.J. 1996. Heavy metal contaminants in inorganic and organic fertilizers. In: Fertilizer Reserch 42: 55-61.
- [14] Hamamo, H., Landsberger, S., Harbottle, G, Panno, S. 1995. Studies of radioactivity and heavy metals in phosphate fertilizer. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 194(2): 331-336.
- [15] Barišić, D., Lulić, S., Miletić, P. 1992. Radium and uranium in phosphate fertilizers and their impact on the radioactivity of waters. In: Water Research 26(5): 607-611.
- [16] Zielinski, R.A., Simmons, K.R., Orem, W.H. 2000. Use of ²³⁴U and ²³⁸U isotopes to identify fertilizer derived Uranium in the Florida Everglades. In: Applied Geochemistry, 15: 369-383.
- [17] Rothbaum, H.P., McGaveston, D.A., Wall, T., Johnston, A.E., Mattingly, G.E.G 1979. Uranium accumulation in soils from long continued applications of superphosphate. In: Journal of Soil Science. 30(1): 147-153.
- [18] Taylor, M., Kim, N. 2008. The fate of Uranium Contaminants of Phosphate Fertilizer. In: de Kok L.J., Schnug, E. (eds.). Loads and fate of fertilizer derived Uranium. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp.147-155.
- [19] Huhle, B., Kummer, S., Stadler, S., Merkel, B. 2008 Mobility of Uranium from Phosphate Fertilizers in Sandy Soils. In: de Kok L.J., Schnug, E. (eds.). Loads and fate of fertilizer derived Uranium. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp.47-55.
- [20] Utermann, J., Fuchs, M. 2008. Uranium in Germans soils. In: de Kok L.J.; Schnug, E. (eds.). Loads and fate of fertilizer derived Uranium. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp.33-45.
- [21] Schick, J., Schroetter, S., Lamas, M., Rivas, M., Kratz, S., Schnug, E. 2008. Soil to plant interface of Uranium. In: de Kok L.J., Schnug, E. (eds.). Loads and fate of fertilizer derived Uranium. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp.157-167.
- [22] Rogasik, J., Kratz, S., Funder, U., Panten, K., Barkusky, D., Baumecker, M., Gutser, R., Lausen, P., Scherer, H.W., Schmidt, L., Schnug, E. 2008. Uranium in soils of German long-term fertilizer experiments. In: de Kok L.J., Schnug, E. (eds.). Loads and fate of fertilizer derived Uranium. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, pp.135-146.
- [23] Schnug, E.; Haneklaus N. 2015. Uranium in phosphate fertilizers – review and outlook. In: Merkel, B., Alireza, A. (eds.). Uranium – Past and future challenges. Proceedings of the 7th International Conference on Uranium Mining and Hydrogeology. Springer: pp. 123-130.
- [24] Smidt GA, Hassoun R, Birke M, Erdinger L, Schäfer M, Knolle F, Utermann J, Duijnsveld HM, Birke M, Schnug E 2011. Uranium in German tap and groundwater – Occurrence and origins. In: Merkel, B., Schipek, M. (eds.). The new uranium mining boom – challenges and lessons learned, pp. 807-820.
- [25] Guzmán, E.T.R., Ordoñez Regil, E. & Pacheco-Malagón, G. 1995. Uranium leaching from phosphate rock. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 201: 313-320.

Глава III/8: ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ И ХИМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ ^{137}Cs В ЗЕРНЕ ОЗИМОЙ РЖИ В ОТДАЛЕННЫЙ ПЕРИОД ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Chapter III/8: Influence of Long-Term Application of Fertilizers and Plant Protection Chemicals on the Accumulation of ^{137}Cs in Grains of Winter Rye at Long Time after the Chernobyl Accident

Людмила П. Харкевич*, Игорь Н. Белоус, Виктор Ф. Шаповалов

DOI 10.25680/5048.2018.69.24.201

*Эл. Почта: ludmila.kharkevich@vandex.ru

Брянский государственный аграрный университет ул. Советская 2а, 243356, п. Кокино, Выгоничский р-н, Брянская обл., Россия

РЕЗЮМЕ. Приведены результаты многолетних исследований в полевых опытах на дерново-подзолистой песчаной почве, загрязненной долгоживущими радионуклидами. Рассмотрено влияние различных систем удобрения и химических средств защиты растений на переход радионуклидов в зерно озимой ржи. Установлено, что изучаемые в опытах агрохимические средства способствовали снижению размеров накопления ^{137}Cs в зерне озимой ржи. При выращивании озимой ржи на дерново-подзолистых песчаных почвах в условиях радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных угодий применение органических и минеральных удобрений и химических средств защиты растений способствует росту урожайности зерна и снижению перехода ^{137}Cs в основную продукцию. Норма высева практически не влияла на величину загрязнения зерна ^{137}Cs . Улучшение уровня питания растений способствовало уменьшению накопления радиоцезия. Комплексное применение удобрений с пестицидами давало тенденцию к дальнейшему снижению содержания ^{137}Cs в продукции.

Abstract. The results of long-term studies in field experiments on sod-podzolic sandy soil contaminated with long-live radionuclides are presented. The influence of various fertilizer systems and chemical plant protection products on the transition of radionuclides to winter rye grain is analysed. It was found that the agrochemicals studied in the experiments contributed to a decrease in the accumulation of ^{137}Cs in the grain of winter rye. When growing winter rye on sod-podzolic sandy soils under the conditions of radioactive contamination of agricultural lands, the use of organic and mineral fertilizers and chemical plant protection agents contributes to an increase in the yield of grain and a decrease in the transfer of ^{137}Cs to the main products. The seeding rate had practically no effect on the grain contamination value of ^{137}Cs . Improvement of the plant nutrition level contributed to a decrease in the accumulation of radiocaesium. Complex application of fertilizers with pesticides tended to further reduce the ^{137}Cs content in products.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: озимая рожь, урожайность, кампозан М, пестициды, азот, калий, сераделла, ^{137}Cs .

Keywords: Winter rye, yield, Camposan M, pesticides, nitrogen, potassium, seradella, ^{137}Cs .

ВВЕДЕНИЕ

В результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году произошло загрязнение обширных площадей сельскохозяйственных угодий в Украине, Белоруссии и России. Это повлекло за собой исключение ведения на них производства из-за превышения предельно допустимого содержания радионуклидов в продукции, так как потребление содержащих радионуклиды продуктов становится важным компонентом суммарного облучения населения [1, 2].

В России наиболее пострадавшей оказалась Брянская область и хотя после Чернобыльской катастрофы прошло более 30 лет, однако коренного перелома в радиационной обстановке в сторону улучшения не наступило. По сравнению с доаварийным периодом (1985 год) превышение уровня радиационной загрязненности сельскохозяйственных угодий по области составляет 47 раз, по юго-западным районам – 120 раз. Таким образом, вероятность получения сельскохозяйственной продукции, не отвечающей санитарно-гигиеническим требованиям, очень большая [3 - 5].

Основная проблема ликвидации последствий крупнейшей техногенной катастрофы на ЧАЭС связана с решением вопроса о максимально возможном снижении уровня воздействия радиации на

население, проживающее и ведущее различного рода хозяйственную деятельность, особенно в сфере сельскохозяйственного производства [6 - 9].

Озимая рожь – наиболее распространенная зерновая продовольственная культура, поэтому необходима разработка таких технологий возделывания озимой ржи в условиях радиоактивного загрязнения, которые позволят повысить урожайность и снизить поступление ^{137}Cs в урожай и получать экологически безопасную продукцию, поскольку сельскохозяйственная продукция, полученная на радиоактивно загрязненных угодьях, является основным источником внутреннего облучения населения [10]. В отдаленный период после аварии эта проблема не потеряла своей актуальности, и хотя на почвах сельскохозяйственных угодий области произошло изменение радиационной обстановки в сторону улучшения, но процесс очищения почв от ^{137}Cs идет очень медленно, тем самым, сохраняется вероятность производства продукции растениеводства с высоким уровнем загрязнения [11, 12].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Краткосрочный опыт № 1 проводился в колхозе «Комсомолец» Новозыбковского района Брянской области в 1993 – 1996 гг. Почва опытного участка дерново-слабоподзолистая, рыхлопесчаная, подстилаемья на глубину 70 – 90 см суглинистой мореной. Агрохимические показатели плодородия почвы пахотного слоя опытного участка : pH_{KCl} – 5,6 – 6,0, гидролитическая кислотность -0,72 мг-экв. на 100 г почвы, сумма поглощенных оснований – 5,14 мг-экв на 100 г, содержание гумуса – 1,3 – 1,5%, общего азота – 0,08 – 0,1%, подвижных форм фосфора (P_2O_5) – 150 – 250 и обменного калия (K_2O) – 150 – 180 мг на кг почвы. В опыте изучали 4 возрастающие дозы азотного удобрения (N_0 , N_{60} , N_{120} , N_{180}), нормы высева озимой ржи (обычная – 4,5 млн всхожих зерен на 1 га, уменьшенная на 1/3 – 3 млн зерен на 1 га, уменьшенная наполовину – 2,25 млн зерен на 1 га), ретардант кампозан М в дозе 4 л/га препарата и без ретарданта. Общим фоном под основную обработку почвы вносили $\text{P}_{70}\text{K}_{100}$. Азот вносили дробно: при дозе N_{60} – осенью N_{30} и весной в фазу возобновления вегетации растений N_{30} , при дозе N_{120} - осенью N_{30} + N_{45} в фазу весеннего кущения + N_{45} в фазу трубкования, в дозе N_{180} - осенью N_{30} + N_{75} в фазу весеннего кущения + N_{75} в фазу трубкования. Кампозан М применяли в фазу начала выхода растений в трубку путем наземного опрыскивания штанговым опрыскивателем с расходом рабочего раствора 300 л/га.

Длительный опыт № 2 заложен на Новозыбковской опытной станции в 1993 году. Почва опытного участка - дерново-подзолистая, рыхлопесчаная, сформированная на древнеаллювиальной супеси, подстилаемой связным песком. Исходные показатели агрохимической характеристики почвы пахотного слоя: содержание органического вещества 2,4-2,5%; pH_{KCl} - 6,7-6,9; гидролитическая кислотность (по Каппену-Гильковицу) - 0,58-0,73 мг-экв/100 г почвы; сумма поглощенных оснований - 7,18-16,88 мг-экв/100 г почвы; содержание подвижного P_2O_5 и обменного K_2O (по Кирсанову) соответственно 385-510 и 69-117 мг на кг почвы. Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs колебалась в пределах 526-666 кБк/м².

Длительный опыт № 3 заложен в 1954 – 1955 гг на Новозыбковской опытной станции на дерново-подзолистой слабокультуренной почве (pH_{KCl} – 4,6; $\text{H}_{\text{г}}$ – 2,2; $\text{H}_{\text{о6}}$ – 0,17; S – 0,7 мг-экв/100 г, гумус (по Тюрину) – 0,7-0,8%; P_2O_5 – 63; K_2O – 20-30 мг/кг), опыт заложен в пространстве и во времени в восьмипольном севообороте со следующим чередованием культур: люпин на удобрение (сид. пар) и на зеленую массу (зан. пар); озимая рожь; картофель; овес; сераделла (зан. пар); озимая рожь; люпин на зерно; ячмень.

В опытах в качестве органического удобрения применяли подстилочный навоз КРС с содержанием N – 0,43%, P_2O_5 – 0,23%, K_2O – 0,48%. Минеральные удобрения вносили в форме аммиачной селитры (34,4% д.в.), двойного суперфосфата (44% д.в.), хлористого калия (56% д.в.).

Исследования проводили по общепринятым методикам [13]. Метеорологические условия в годы проведения опытов характеризуются большим разнообразием. Наиболее благоприятными по погодным условиям были 1994, 1998, 2001, 2004, 2006 гг., умеренными 1996, 1997, 1998, 2007, 2008 гг., засушливыми 1995, 1999, 2002, 2003, 2005, 2010 гг. Эти годы характеризуются низкими запасами продуктивной влаги, летним дефицитом осадков и их неравномерным выпадением при температурах воздуха, намного превышающих среднегодовые значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Несмотря на то, что на опытном участке (опыт № 1) была отмечена достаточно высокая плотность загрязнения, накопление ^{137}Cs в зерне озимой ржи не достигало величины допустимого уровня (70 Бк/кг) (табл. 1). С увеличением дозы азота отмечен рост накопления радионуклида в зерне как в ва-

риантах с применением кампозана М, так и без него. О том, что азотные удобрения способствуют увеличению перехода ^{137}Cs в основную продукцию, отмечено и в других исследованиях [3, 14]. На вариантах с применением ретарданта наблюдалась более низкая удельная активность зерна по сравнению с вариантами, где ретардант не применялся. Кампозан М снижал полегаемость растений озимой ржи, тем самым препятствуя механическому загрязнению зерна в результате более близкого контакта с поверхностью почвы.

Таблица 1 - Содержание ^{137}Cs в зерне озимой ржи сорта Пуховчанка, Бк/кг. Среднее за 1994 – 1996 гг (к-з «Комсомолец Новозыбковского района Брянской области)

Доза азота	Ретардант	Норма высева, млн. шт/га		
		4,5	3,0	2,25
N ₀	Без ретарданта	42	32	44
	Кампозан М	27	32	36
N ₆₀	Без ретарданта	64	41	46
	Кампозан М	33	33	27
N ₁₂₀	Без ретарданта	69	52	35
	Кампозан М	44	42	31
N ₁₈₀	Без ретарданта	64	49	53
	Кампозан М	57	40	43

Повышенное содержание обменного калия в почве опытного участка и внесение под основную обработку почвы достаточно высокой дозы калия также способствовали снижению перехода радионуклида в зерно озимой ржи, поскольку на почвах, обеспеченных калием, поглощение ^{137}Cs растениями происходит менее интенсивно, чем на почвах с более низким содержанием калия.

Длительное применение удобрений способствовало снижению удельной активности зерна озимой ржи в опыте № 2 (табл. 2). На накопление ^{137}Cs оказывали влияние погодные условия. Это выразилось в повышении содержания радиоцезия в зерне во 2-й и 5-й ротациях севооборота. В 3-й и 4-й ротациях севооборота прослеживается четкая тенденция снижения накопления ^{137}Cs по сравнению с 1-й. С течением времени ^{137}Cs закрепляется минеральной и органической фракциями почвы, уменьшается его подвижность и, как следствие, доступность для растений. Таким образом, фактор времени также влияет на переход ^{137}Cs в товарную часть продукции, способствуя его уменьшению даже на контрольном варианте.

В 5-й ротации севооборота по сравнению с 4-й наблюдалось некоторое увеличение накопления ^{137}Cs . Однако следует отметить, что за исключением контрольного варианта и варианта с последствием 80 т/га навоза, содержание ^{137}Cs в зерне фиксировалось на уровне значений, наблюдаемых в 3-й ротации.

Таблица 2 - Влияние длительного применения средств химизации на поступление ^{137}Cs в зерно озимой ржи, Бк/кг

Система удобрения	Ротации севооборота, годы					среднее
	1993-1996	1997-2000	2001-2004	2005-2008	2009-2012	
Контроль	77	81	60	57	95	74
Последствие 80 т/га навоза	49	60	38	28	54	46
Последствие 40 т/га навоза +N ₇₀ P ₃₀ K ₆₀	32	33	34	23	36	32
N ₇₀ P ₃₀ K ₆₀	42	46	32	24	34	36
N ₁₄₀ P ₆₀ K ₁₂₀	29	41	31	21	31	31
N ₂₁₀ P ₉₀ K ₁₈₀	43	40	26	30	28	33
Последствие 40 т/га навоза +N ₇₀ P ₃₀ K ₆₀ + пестициды	34	40	30	21	32	31
N ₇₀ P ₃₀ K ₆₀ + пестициды	41	45	34	24	35	36
N ₁₄₀ P ₆₀ K ₁₂₀ + пестициды	26	33	26	18	28	26
N ₂₁₀ P ₉₀ K ₁₈₀ + пестициды	24	33	23	18	23	24

По мере увеличения доз вносимых удобрений снижение содержания ^{137}Cs составило от 1,6 до 3,1 раз по отношению к контрольному варианту.

Под озимую рожь в опыте № 3 запахивалась отава сераделлы (в среднем 60 – 100 ц/га). Содержание ^{137}Cs в зерне озимой ржи с 2004 по 2012 год уменьшилось в 2,3 – 3,8 раза в зависимости от варианта (табл. 3). Постепенное ежегодное снижение удельной активности зерна было нарушено в 2010 году. Критические погодные условия этого года повлияли как на урожайность, так и на накопление ^{137}Cs . Самые низкие значения удельной активности зерна озимой ржи отмечены в 2009 году (от 3 до 10 раз ниже по сравнению с 2004 годом). В этом году получена самая высокая урожайность за годы наблюдений, вследствие этого уменьшалось поступление радионуклида в зерно за счет биологического разбавления.

Таблица 3 - Содержание ^{137}Cs в зерне озимой ржи (предшественник сераделла), Бк/кг

Вариант	2004 г	2005 г	2006 г	2007 г	2008 г	2009 г	2010г	2011 г	2012 г	Среднее
Контроль	102	72	59	47	48	32	52	41	31	54
$\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{90}$	82	41	35	33	36	10	27	19	24	34
Навоз 20 т $\text{N}_{60}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$	51	50	42	39	40	7	21	26	18	33
Навоз 20 т $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{90}$	65	37	31	27	32	6	14	17	17	27
Навоз 20 т $\text{N}_{120}\text{P}_{90}\text{K}_{120}$	49	30	27	23	26	8	20	15	21	24

Сераделла, используемая на зеленое удобрение, способствовала улучшению условий минерального питания растений и снижению накопления ^{137}Cs в зерне озимой ржи. Даже без внесения минеральных и органических удобрений содержание ^{137}Cs в зерне на контроле было довольно низким. Возрастающие дозы минеральных удобрений в сочетании с навозом и сидератом снижали удельную активность зерна озимой ржи, что подтверждается также исследованиями, сделанными ранее [5, 15 - 17]

Таким образом, в результате длительного применения удобрений и средств защиты растений улучшались агрохимические свойства почвы и условия минерального питания растений, урожайность увеличивалась, происходил биологический процесс разбавления. Улучшение плодородия почвы с течением времени способствовало закреплению ^{137}Cs органической и минеральной фракциями почвы, уменьшению его подвижности и доступности для растений.

В заключение следует отметить, что вопрос получения экологически безопасной продукции не потерял своей актуальности и в настоящее время, поскольку цезий-137 относится к долгоживущим радионуклидам, что предопределяет длительную опасность загрязнения сферы сельскохозяйственного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Технология возделывания сельскохозяйственных культур является эффективным инструментом, влияющим на поступление радионуклидов из почвы в растения и накопление их в товарной части продукции.
2. Разработаны системы удобрения озимой ржи, которые обеспечивают уменьшение перехода ^{137}Cs из почвы в растения и снижают удельную активность основной продукции (зерно).
3. Представленные системы удобрения озимой ржи были апробированы в условиях Брянской области (Россия), но они могут быть использованы при разработке мер безопасности сельскохозяйственного производства и в других регионах, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Алексахин, Р.М. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Р.М. Алексахин [и др.]; под ред. Л.А.Ильина и В.Л.Губанова. – М.: ИздАТ, 2001. – 752 с.
- [2]Алексахин, Р.М. Радиологические аспекты реабилитации сельского хозяйства после аварии на АЭС «Фукусима Даичи» / Р.М. Алексахин, В.Г. Сычев // Плодородие. – 2013. № 4. – С. 2 – 6.
- [3]Белоус Н.М. Воспроизводство плодородия и реабилитация радиоактивно загрязненных дерново-подзолистых почв юго-запада России: Автореф. дисс д-ра. с.-х. наук, М.; ВИУА. 2000. 51 с.

- [4]Белоус, Н.М. Влияние систем удобрений на продуктивность и содержание цезия-137 в урожае / Н.М.Белоус, В.Ф.Шаповалов, Л.П.Харкевич // *Агрохимический вестник*. 2007. № 1. С.11 – 13.
- [5]Белоус, И.Н. Влияние систем удобрения на урожай и качество зерна озимой ржи /И.Н.Белоус, Л.П.Харкевич, В.Н.Адамко // *Агрохимический вестник*. – 2014. - № 1. – С. 38 – 40.
- [6]Белоус, Н.М. Влияние систем удобрения и пестицидов на накопление ¹³⁷Cs в сельскохозяйственных культурах на дерново-подзолистых песчаных почвах / Н.М.Белоус, В.Ф.Шаповалов, А.В.Кузнецов // *Агрохимия*. – 2002. - № 2. – С. 52 – 58.
- [7]Курганов, А.А. Раелизация комплекса мер по смягчению последствий Чернобыльской катастрофы в агропромышленном комплексе России / А.А. Курганов, А.В. Мошаров, А.В. Нижегородский. // *Материалы научно-практической конференции «Роль творческого наследия академика ВАСХНИЛ Ключковского В.М. в решении современных проблем сельскохозяйственной радиологии»*. – М., 2001. – С. 44.
- [8]Фокин, А. Д. Сельскохозяйственная радиология / А.Д. Фокин, А.А. Лурье, С.П. Трошин. – М.: Дрофа, 2005. – 367с.
- [9]Воробьева, В. В. Введение в радиоэкологию / В. В. Воробьева. – М.: Логос, 2009. – 360с.
- [10]Малявко, Г.П. Возделывание озимой ржи на радиоактивно загрязненных почвах / Г.П. Малявко, И.Н. Белоус // *Агрохимический вестник*. – 2012. - № 5. – С. 17 – 19.
- [11]Санжарова, Н. И. Изменение радиационной обстановки в сельском хозяйстве после аварии на Чернобыльской АЭС / Н. И. Санжарова // *Агрохимический вестник*. – 2010. – №2. – С. 6-9.
- [12]Прудников, П. В. Использование местных агроруд и комплексных удобрений на их основе для производства нормативно чистой продукции на радиоактивно загрязненных почвах: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.04 / П. В. Прудников. – Немчиновка, 2012. – 44с.
- [13]Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Часть I. М.: ВИУА, 1975. 167 с.
- [14]Белоус Н.М., Шаповалов В.Ф. Продуктивность пашни и реабилитация песчаных почв. – Брянск, 2006. – 432 с.
- [15]Белоус, Н. М. Условия производства зерна озимой ржи на радиоактивно загрязненных почвах / Н. М. Белоус, Г. П. Малявко, В. В. Талызин, В. Ф. Шаповалов // *Агрохимический вестник*. – 2009. – № 2. – С. 2-3.
- [16]Белоус, Н. М. Продуктивность плодосменного севооборота и плодородие дерново-подзолистой песчаной почвы в условиях радиоактивного загрязнения / Н. М. Белоус, В. Ф. Шаповалов, Д. Г. Кротов, В. В. Талызин // *Агрохимический вестник*. – 2009. – № 3. – С. 2- 5.
- [17]Жигарева, Т. Л. Влияние технологических приемов возделывания сельскохозяйственных культур на накопление ¹³⁷Cs в урожае / Т. Л. Жигарева, А. Н. Ратников, Р. М. Алексахин, Г. И. Попова, К. В. Петров, Н. М. Белоус, А. Т. Куриленко // *Агрохимия*. – 2003. – № 10. – С. 67-74.

Глава III/9: МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ, ФИЗИЧЕСКИЕ, ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ЗАПАДНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ

Chapter III/9: Morphological, Physical, Water-Physical and Physical-Chemical Indicators of a Chernozem in the Western Caucasian Forelands

Асхад Х. Шеуджен*1,2; Оксана А. Гуторова2; Сергей В. Есипенко1; Лотар Мюллер3,1; Уве Шиндлер4,1

DOI 10.25680/2545.2018.79.51.202

*Эл. Почта: ashad.sheudzhen@mail.ru

1.Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Факультет агрохимии и почвоведения, ул. Калинина 13, 350044, Краснодар, Россия

2.Всероссийский научно-исследовательский институт риса, дом 3, 350921, Краснодар, п. Белозерный, Россия

3.Лейбниц центр агроландшафтных исследований, Ул. Эберсвальдер 84, 15374, Мюнхеберг, Германия

4.Академия плодородия почв имени Е.А. Митчерлиха, Профессор-Митчерлих-Проспект 1, 14641 Паулиненуэ, Германия

РЕЗЮМЕ. В статье рассматриваются морфологические, физические, водно-физические и физико-химические свойства чернозема выщелоченного Западного Предкавказья, используемого в 11-польном зерно-травяно-пропашном севообороте. Чернозем выщелоченный хорошо дифференцирован на почвенно-генетические горизонты с мощностью гумусового слоя А+АВ, равной 148 см. Для формирования высокопродуктивного биоценоза почва обладает благоприятными и справедливыми характеристиками физическими (плотность сложения 1,30 г/см³, плотность твердой фазы 2,67 г/см³, общая пористость 51,9 %, пористость аэрации 27,8 %) и водно-физическими (полная влагоемкость 34,0 %, наименьшая влагоемкость 29,8 %, максимальная гигроскопичность 9,49 %, влажность завядания 14,2 %, диапазон активной влаги 15,6 %) свойствами. Почва имеет неплохие запасы гумуса в толще А+АВ, равные 385,5 т/га, а также большую сумму поглощенных оснований Ca²⁺+Mg²⁺ в горизонте Апах – 42,8 миллиграмм-эквивалент на 100 г с преобладанием в почвенно-поглощающем комплексе катиона Ca²⁺, высокую намагниченность пахотного слоя $\chi=1,045 \times 10^{-3}$ ед. СИ и хорошо обеспечена оксидами кремния, алюминия и железа.

Abstract. The article deals with morphological, physical, water-physical and physicochemical properties of Leached Chernozems in Western Ciscaucasia used in 11-field grain-grass-tilled crop rotation. The Leached Chernozem is well differentiated into soil genetic horizons with a thickness of the humus layer A+AB equal to 148 cm. The soil has favorable to fair physical (density of 1,30 g/cm³, solid density 2,67 g/cm³, total porosity 51,9 %, aeration porosity 27,8 %) and hydrophysical (total moisture capacity 34,0 %, lowest moisture capacity 29,8 %, maximum hygroscopicity 9,49 %, the wilting point is 14,2 %, active moisture range 15,6 %) properties to form a highly productive agroecosystem. The soil has good reserves of humus in the A+AB stratum, equal to 385,5 t/ha, as well as a large sum of absorbed bases of Ca²⁺+Mg²⁺ in the Ap horizon – 42,8 milligram-equivalent per 100 g, with predominance in the soil-absorbing complex of the cation Ca²⁺, high magnetization of arable layer $\chi=1,045 \times 10^{-3}$ units. SI and is well provided with oxides of silicon, aluminum and iron.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: чернозем выщелоченный, гранулометрический состав почвы, плотность почвы, пористость почвы, гумус, обменные основания, магнитная восприимчивость

Keywords: leached chernozem, granulometric composition of soil, soil density, soil porosity, humus, exchange bases, magnetic susceptibility

ВВЕДЕНИЕ

К важнейшим свойствам почвы, определяющим её плодородие относятся физические, водно-физико-химические свойства и биологическая активность. Как показали результаты многочисленных исследований, проведенными разными авторами, характеристики и свойства почвы изменяются в процессе агрогенеза [1-5]. Для оценки состояния свойств почвы необходимо проводить мониторинговые исследования. В связи с этим на опытном поле кафедры Кубанского государственного аграрного университета имени И.Т. Трубилина (КубГАУ), расположенного в учебном хозяйстве "Кубань" г. Краснодара, с 1981 г. проводится длительный полевой опыт агроэкологического мониторинга. Основной целью этого эксперимента является оценка свойств почвы, продуктивности севооборота и эколого-экономическое обоснование системы применения минеральных удобрений в 11-польном зерно-травяно-пропашном севообороте.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный слабогумусный легкоглинистый на лессовидных тяжелых суглинках, характеризующийся низким содержанием гумуса (3,24 %), средним – фосфора подвижного (120 мг/кг) и высоким – калия подвижного (150 мг/кг) [1]. На участке был заложен полнопрофильный почвенный разрез (45°3'50.74", N и 38°51'19.61", E). Почвенные образцы отбирали из каждого почвенно-генетического горизонта. В них определяли: наименьшую влагоемкость – методом Качинского; максимальную гигроскопичность – по методу Николаевой при насыщении почвы сернокислым калием; влажность завядания – расчетным методом с применением коэффициента 1,5 от максимальной гигроскопичности; диапазон активной влаги – расчетным методом по разнице наименьшей влагоемкости и влажности завядания; полную влагоемкость – расчетным методом по общей пористости; плотность сложения – методом Качинского; плотность твердой фазы – пикнометрическим методом; общую пористость и пористость аэрации – расчетным методом; гранулометрический состав – методом пипетки с обработкой почвы пиро-

фосфатом натрия; общий гумус – методом Тюрина со спектрофотометрическим окончанием; запасы гумуса – расчетным методом; рН водной вытяжки из почвы – потенциометрическим методом; обменные катионы (Ca^{2+} и Mg^{2+}) – комплексонометрическим методом; валовой состав – методом кислотного разложения почвы с атомно-абсорбционным окончанием [6, 7]. Магнитную восприимчивость (χ) почвы измеряли каппаметром КМ-7 (Чехия) [8], кривую удержания воды – системой ЕЕМ-НУПРОР [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология почвы: Профиль чернозема выщелоченного хорошо дифференцирован на почвенно-генетические горизонты постепенно сменяющих друг друга: $A_{\text{пах}}$ – A – AB_1 – AB_2 – B – C . Для профиля свойственна однородная темно-серая окраска с буроватым оттенком, начинающаяся с горизонта AB_1 . Чернозем выщелоченный при достаточно небольшом содержании органических веществ имеет сверхмощную толщу гумусового слоя ($A+AB=148$ см). Профиль почвы промыт от карбонатов кальция вплоть до горизонта C и имеет средне уплотненное сложение (Рисунок 1).

Физические свойства почвы: В гранулометрическом составе чернозема выщелоченного фракция физической глины ($< 0,01$ мм) в пахотном горизонте составляет 61,2 %. В составе фракций преобладают частицы пыли (57,1 %) и ила (38,4 %). По соотношению сумм фракций почва относится к иловато-пылеватой легкоглинистой разновидности (Таблица 1).

В пределах почвенного профиля гранулометрический состав не однороден. В нижней его части, начиная с горизонта AB_2 вплоть до почвообразующей породы, легкоглинистый гранулометрический состав сменяется на тяжелосуглинистый. Это происходит в результате уменьшения фракций ила и увеличения пылеватых (0,05-0,001 мм) и песчаных частиц (1,00-0,05 мм).



Рисунок 1 – Почвенный разрез чернозёма выщелоченного Западного Предкавказья

Чернозем выщелоченный обладает благоприятными для роста и развития растений физическим состоянием. Плотность почвы пахотного слоя составляет $1,30 \text{ г/см}^3$ и увеличивается с глубиной до $1,45-1,47 \text{ г/см}^3$. Наименьшая плотность твердой фазы характерна для пахотного горизонта ($2,67 \text{ г/см}^3$), обогащенного гумусом и полуразложившимися растительными остатками. Вниз по профилю она постепенно увеличивается до $2,74 \text{ г/см}^3$. Почва характеризуется высокой общей пористостью, колеблющейся от 51,9 в горизонте $A_{\text{пах}}$ до 46,3 % в почвообразующей породе. Достаточно высока и пористость аэрации (воздухообеспеченность), варьирующая в пределах профиля от 27,2 до 20,0 %. Такие показатели свидетельствуют о хорошей оструктуренности почвы.

Таблица 1 – Физические, водно-физические и физико-химические свойства чернозема выщелоченного Западного Предкавказья

Глубина, см	Частицы (мм), %		Плотность сложения, г/см ³	Пористость, %	Максимальная гигроскопичность, %	Наименьшая влагоемкость, %	рН, ед.	Гумус, %	Ca ²⁺ *	Mg ²⁺ *
	более 0,01	более 0,001								
0-25	61,2	38,4	1,30	51,9	9,49	29,8	6,5	3,2	31,2	11,6
26-62	61,0	38,1	1,35	50,0	8,85	27,0	6,6	2,7	31,0	11,7
63-109	60,7	37,9	1,39	48,9	8,73	26,4	6,7	1,9	31,4	10,9
110-148	59,0	37,0	1,45	46,8	8,66	25,9	7,0	1,5	31,3	10,3
149-177	57,5	34,2	1,47	46,3	8,60	25,6	7,7	0,7	26,2	9,0
> 177	57,4	33,3	1,47	46,3	8,51	23,8	8,0	0,4	23,5	7,4

* – поглощенные основания в миллиграмм-эквивалентах на 100 г почвы (мг.-экв./100 г)

Чернозем выщелоченный в пахотном слое имеет достаточно высокую полную (34,0 %) и наименьшую (29,8 %) влагоемкости, максимальная гигроскопичность невысокая – 9,49 %, влажность устойчивого завядания растений также сравнительно небольшая – 14,2 %, а диапазон активной влаги равен 15,6 % (Рисунок 2).

Наиболее благоприятными для роста и развития растений водно-физическими свойствами характеризуется пахотный горизонт. С глубиной профиля и увеличением плотности сложения почвы значения показателей, характеризующих её водно-физические свойства, заметно снижаются. Такой характер изменения их связан с уменьшением к низу содержания в почве гумуса.

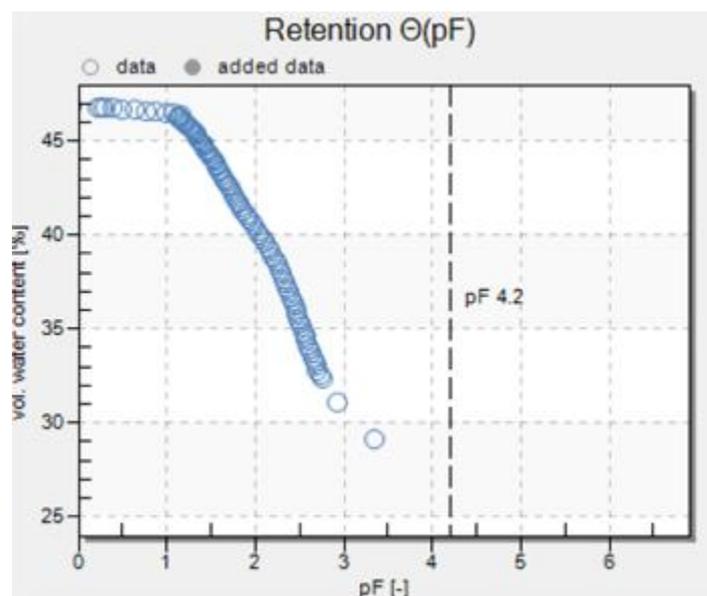


Рисунок 2 – Кривая удержания воды в 26-40 см слое почвы, измеренная системой БЕМ-НУПРОП [9]

Физико-химические свойства почвы: Наибольшее содержание суммы поглощенных оснований в черноземе выщелоченном отмечено в пахотном и подпахотном горизонтах. С глубиной почвенного профиля их количество заметно уменьшается, что связано, прежде всего, со снижением содержания общего гумуса и илистых частиц в составе гранулометрических фракций. В почвенно-поглощающем комплексе преобладает катион кальций, количество которого почти в 3 раза превышает содержание обменного магния. Соотношение двухвалентных катионов Ca²⁺: Mg²⁺ изменяется в пределах почвенного профиля от 2,7 в пахотном слое до 3,2 в горизонте С. Реакция среды пахотного горизонта слабокислая, которая с глубиной профиля переходит в нейтральную и достигает в почвообразующей породе щелочных значений (Таблица 1).

Чернозем выщелоченный по содержанию гумуса в пахотном горизонте – слабогумусный (3,2 %). В тоже время гумус, при постепенном уменьшении вниз по профилю, проникает на значительную глубину почвы. В иллювиальном горизонте В его содержание составляет 0,7 %. При этом гумусовые затеки обнаруживаются и в почвообразующей породе. Валовой запас гумуса в слое А+АВ составляет 385,5 т/га, в 2-х метровом слое почвы – 481,7 т/га.

Большая глинистость чернозема выщелоченного обуславливает образование в нем значительных количеств оксидов кремния, алюминия и железа. В пахотном слое почвы в убывающем порядке располагаются (в % на прокаленную и бескарбонатную почву): оксиды кремния (64,67), алюминия (18,10), железа (6,90), калия (2,73), магния (2,41), кальция (2,10), натрия (1,38), титана (0,80), фосфора (0,22), серы (0,11) и марганца (0,10). При продвижении вниз по профилю почвы содержание оксидов кремния, железа, кальция, магния и натрия увеличивается, а алюминия, калия, титана, фосфора, марганца и серы – уменьшается. Разное содержание химических элементов связано с различием в составе исходной почвообразующей породы, а также с трансформацией и миграцией в процессе почвообразования.

Магнитные свойства почвы: Все компоненты почв обладают определенной магнитной активностью, одной из характеристик которой является магнитная восприимчивость (χ), отражающая образование сильномагнитных минералов железа в хорошо оструктуренной и аэрированной почве и может служить дополнительным критерием, характеризующим водно-воздушные и структурные свойства почвы [4]. Магнитная восприимчивость верхних горизонтов автоморфных почв всегда выше магнитной восприимчивости материнских пород, а в гидроморфных почвах чаще наоборот. При этом автоморфные почвы характеризуются значительно большей магнитной восприимчивостью, чем гидроморфные почвы [4, 5].

На рисунке 3 представлен магнитный профиль чернозема выщелоченного.

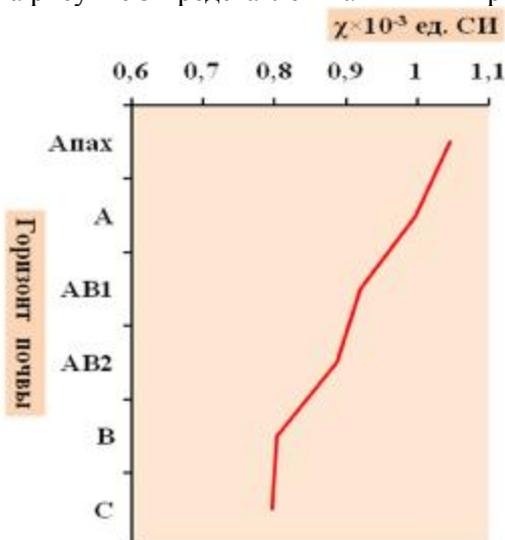


Рисунок 3 – Магнитная восприимчивость по профилю чернозема выщелоченного, измеренная каппа-метром КМ-7 [8]

Чернозем выщелоченный обладает достаточно высокой магнитной восприимчивостью, колеблющейся в пределах от $1,045$ в пахотном горизонте до $0,797 \times 10^{-3}$ ед. СИ в почвообразующей породе. Почва имеет аккумулятивный характер магнитного профиля: с глубиной значения магнитной восприимчивости постепенно уменьшаются. В верхнем аэрируемом слое формируются сильномагнитные минералы железа, поэтому пахотный горизонт обладает наибольшей намагниченностью (Рисунок 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Чернозем выщелоченный Западного Предкавказья слабогумусный сверхмощный легкоглинистый на лессовидных тяжелых суглинках хорошо дифференцирован на почвенно-генетические горизонты: $A_{пах}-A-AB_1-AB_2-B-C$.
2. Для формирования высокопродуктивного биоценоза чернозем выщелоченный обладает благоприятными физическими (плотность сложения $1,30 \text{ г/см}^3$, плотность твердой фазы $2,67 \text{ г/см}^3$, общая пористость $51,9 \%$, пористость аэрации $27,8 \%$) и водно-физическими (полная влагоемкость $34,0 \%$, наименьшая влагоемкость $29,8 \%$; максимальная гигроскопичность $9,49 \%$; влажность завядания $14,2 \%$, диапазон активной влаги $15,6 \%$) свойствами.
3. Чернозем выщелоченный имеет довольно большие запасы гумуса в толще $A+AB$, равные $385,5 \text{ т/га}$; высокую сумму поглощенных оснований $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ в горизонте $A_{пах}$ – $42,8 \text{ мг-экв./100 г}$ с преобладанием в почвенно-поглощающем комплексе катиона Ca^{2+} ; высокую намагниченность пахотного слоя $\chi=1,045 \times 10^{-3}$ ед. СИ и хорошо обеспечена оксидами кремния, алюминия и железа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шеуджен, А.Х. Агрохимия чернозема. – Майкоп: Полиграф-Юг, 2015. 232 с.
- [2] Кумахов, В.И. Почвы Кабардино-Балкарской республики. – Нальчик: Издательство М. и Котляровых, 2015. 244 с.
- [3] Вальков, В.Ф., Штомпель, Ю.А., Тюльпанов, В.И. Почвоведение (почвы Северного Кавказа). – Краснодар: Издательство «Советская Кубань», 2002. 300 с.
- [4] Шеуджен, А.Х., Гуторова, О.А., Зубкова, Т.А., Штуц, Р.В., Кашиц, В.П., Максименко, Е.П., Филипенко, А.С., Минаев, Н.С. Морфологические особенности и изменение магнитной восприимчивости почв рисового агроценоза и богары // Международный научно-исследовательский журнал, 2016. № 9-3 (51). С. 133-137.
- [5] Шеуджен, А.Х., Кольцов, С.А., Гуторова, О.А., Лебедевский, И.А., Онищенко, Л.М., Осипов, М.А., Есипенко, С.В. Микрофлора чернозема выщелоченного при длительном применении минеральных удобрений // Международный научно-исследовательский журнал, 2017. № 02 (56). С. 89-94.
- [6] Муха, В.Д., Муха, Д.В., Ачкасов, А.Л. Практикум по агрономическому почвоведению: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. 480 с.
- [7] Теория и практика химического анализа почв / Под редакцией Л.А. Воробьевой. – М.: Издательство "ГЕОС", 2006. 400 с.
- [8] Вадюнина, А.Ф., Корчагина, З.А. Методы исследования физических свойств почв. – М.: Издательство "Агропромиздат", 1986. 416 с.
- [9] Schindler, U., Durner, W., Unold, G.V., Mueller, L., Wieland, R. 2010. The evaporation method: extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 173, 4, 563-572.

Chapter III/10: MINERAL NITROGEN IN DIFFERENT SOILS OF CROPPING LAND IN LITHUANIA

Глава III/10: Минеральный азот в почвах различных сельхозугодий Литвы

Lina Zickiene*, Jonas Mazvila, Gediminas Staugaitis, Zigmas Vaisvila, Aistė Maseviciene

DOI 10.25680/6918.2018.48.88.203

*Email: agrolab@agrolab.lt

Agrochemical Research Laboratory of the Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry Savanoriu pr. 287, 50127 Kaunas, Lithuania

ABSTRACT. The concentration of mineral nitrogen in the main root zone of crops is very important for plant growth, development and yield, therefore our study set out to explore the regularities of mineral nitrogen distribution in the soils of various origin as influenced by different terrain and soil texture. The study was carried out in three soil regions where mineral nitrogen concentrations were comprehensively estimated in relation to the terrain, moisture regime, soil group, soil texture. It was determined by research, that higher mineral concentrations will accumulate in the terrain of plains, on footslopes of hills, in gleyic and in heavy-textured soils with higher humus status. Lower mineral nitrogen concentration is expected to accumulate in acid, erosion-affected soils.

Резюме. Концентрация минерального азота в основной корневой зоне сельскохозяйственных культур очень важна для роста, развития и урожайности растений, поэтому наше исследование посвящено изучению закономерностей распределения минерального азота в почвах различного происхождения под влиянием различных ландшафтных условий и гранулометрического состава почвы. Исследования проводили в трех почвенных регионах, где концентрации минерального азота были всесторонне изучены в зависимости от ландшафта, водного режима, типа и гранулометрического состава почвы. Было установлено, что более высокие концентрации минерального азота накапливаются на равнинных территориях, склонах холмов, в глеевых и в сильноструктурированных почвах с более высоким уровнем гумуса. Предполагается, что более низкая концентрация минерального азота будет характерна для кислых и эродированных почв.

KEYWORDS: soil, mineral nitrogen, soil texture, landscape

Ключевые слова: почва, минеральный азот, текстура почвы, ландшафт

INTRODUCTION

The optimisation of nitrogen fertilization is one of the most important tasks in agriculture aiming to prevent nitrate pollution of the environment and to achieve high crop yields [1]. Mineral nitrogen content in the soil is usually measured in early spring and based on the obtained results, nitrogen fertilization rates are calculated. Soil mineral nitrogen content is also measured in the autumn in order to know the amount of mineral nitrogen or only nitrates left after the cropping season - before winter [2, 3]. Soil N_{\min} is very mobile due to the fact that a large part of it is in the nitrate form; therefore it is difficult to precisely forecast the amount of it in the soil as well as to foresee its content fluxes in the long term [4]. N_{\min} content in the soil is affected by a range of factors: precipitation levels influencing the leaching of nitrates into the deeper soil layers, soil and air temperature influencing the rate of organic matter mineralization, soil texture and typology, amount of organic matter in the soil, crop grown, amount of plant residues left in the field after harvesting, organic and mineral fertilization rates and other factors [5, 6, 7]. Heavy-textured soils, containing more clay and silt particles, tend to accumulate higher concentrations of mineral nitrogen than light-textured soils, from which nitrogen migration is the most intensive [8, 9, 10]. The high concentration of N_{\min} in the soil measured in the autumn often markedly decreases by spring, therefore moderate nitrogen fertilization and cultivation of catch crops during the autumn-winter period reduce nitrate leaching losses [11, 12, 13].

Research objective – the study set out to explore the regularities of mineral nitrogen distribution in the soils of various origin as influenced by different terrain and soil texture.

MATERIAL AND METHODS

For mineral nitrogen investigation in a soil region, in different soil groups we selected three objects present in different zones of the country in the soil region characteristic of that zone. Research was done during 2011–2014 in the fields situated: 1) in Western Lithuania Zone, in the western part of the soil region of Middle Žemaičiai Upland and Western Kuršas Upland (x 409428; y 6158486); 2) in Middle Lithuania Zone, in the soil region of Lower Nemunas Plain (x 435370; y 6062869); 3) in Eastern Lithuania Zone, in the soil region of Baltic Upland's Western Plateau (x 574244; y 6158473).

In Western Lithuania Zone, in the western part of the soil region of Middle Žemaičiai Upland and Western Kuršas Upland, seven test plots were chosen in the fields differing in soil type and soil cover: 1 plot – Eutric Gleysols (GLE), soil texture – L/L/SL, 2 plot – Hapli-Endohypogleyic Luvisols (LVg-n-w-ha) – L/L/SL, 3 plot – Endohypogleyi-Eutric Planosols (Ple-gln-w) – SL/LS/L, 4 plot – Hapli-Endohypogleyic Luvisols (LVg-n-w-ha) – L/L/LS, 5 plot – Fluvi-Eutric Cambisols (CMe-fv) – L/L, 6 plot – Haplic Luvisol (moderately eroded) (LVh-em) – C/C/L, 7 plot – Hapli-Albic Luvisols (LVa-ha) – L/C/L [14, 15, 16]. In Middle Lithuania Zone, in the soil region of Lower Nemunas Plain, seven test plots were chosen in one field differing in soil type: 1 plot – Endocalcaric Gleysols (GLk-n), soil texture – CL/C, 2 plot – Calc(ar)i-Endohypogleyic Luvisols (LVg-n-w-ha) – L/CL/L, 3 plot – Bathihypogleyi Calc(ar)ic Luvisols (LVk-gld-w) – L/L, 4 plot – Calc(ar)i-Endohypogleyic Luvisols (LVg-n-w-ha) – L/C/L, 5 plot – Orthieutric Planosols (PLE-or) – SL/S/L, 6 plot – Haplic Luvisol (slightly eroded) (LVh-el) – L/L, 7 plot – Fluvi-Eutric Fluvisols (FLe-fv) – CL/C [14, 15, 16].

In Eastern Lithuania Zone, in the soil region of Baltic Upland's Western Plateau, five test plots were chosen in one field differing in soil type: 1 plot – Orthieutric Planosols (PLE-or) soil texture – SL/S/L, 2 plot – Eutri-Haplic Arenosols (ARh-eu) – SL/S, 3 plot – Haplic Luvisol (slightly eroded) (LVh-el) – L/CL, 4 plot – Eutric-Gleyic Fluvi Fluvisols (Fly-eu-gln(p)-w) – SL/SL/S, 5 plot – Calc(ar)i-Epihypogleyic Luvisols (LVg-p-w-cc) – L/CL [14, 15, 16].

Each test plot was replicated three times. The number of replications was chosen taking into account the expected differences between the treatments and the available resources. Soil samples were taken in spring (at the end of March – beginning of April), in summer (at the beginning of June) and in autumn (at the end of October-beginning of November) from 0–60 soil layers, from 10×10 m test plots. One composite soil sample was made of 4–6 subsamples, it was then thoroughly mixed, placed into a plastic box or a plastic bag and put into the specially suited cooled bag. These sample-containing bags were brought to the laboratory, where the collected samples were kept in a refrigerator at 1–3°C.

The content of nitrate and ammonia nitrogen in the tested soil sample was measured in accordance with the national standard ISO 14256–2:2005 the soil sample was dried, then the 1:2.5 1 M KCl extraction was

made. Nitrate and ammonia nitrogen content in the obtained filtrate was determined using Fiastar 5000 Analyser.

The relationship between the variables was assessed using the correlation-regression analysis method. The *STATISTICA 7* programme was used for correlation coefficients and ratios and for expression of the relationship between the objects of the research (Čekanavičius, Murauskas, 2002; Sakalauskas, 2003; Hill, Levicki, 2005). The following symbols were used in the work: ***, ** and * – statistically significant differences at 99.9; 99 and 95 % confidence level respectively.

RESULTS AND DISCUSSION

During the experimental period (2011–2014), in Western Lithuania Zone, in the soil region of Middle Žemaičiai Upland and Western Kuršas Upland, the mineral nitrogen fluxes in various soil groups in different seasons of the year (spring, summer and autumn) were found to vary considerably. Low concentrations of N_{\min} were present in the gley soils prevalent in the lowland terrain (plot 1) and gleyic soils prevalent in plain terrain (plot 2). These concentrations amounted to, on average, 5.6 and 4.5 mg kg^{-1} respectively in 0–60 cm layer during the experimental period (Fig. 1).

Soil texture had a significant effect on mineral nitrogen fluxes. In light-textured sands with deeper lying moderately heavy loam (plot 3), the average N_{\min} concentration over experimental years was 7.2 mg kg^{-1} , while in heavy-textured moderately heavy loams (plot 4) N_{\min} concentration was higher – 11.2 mg kg^{-1} (Fig. 1).

The highest N_{\min} concentration (on average 11.5 mg kg^{-1}) accumulated in the soils of footslopes of hills (plot 5), markedly lower N_{\min} concentrations (5.7 mg kg^{-1}) were found in the eroded soils of hill slopes (plot 6), and in the planes of hilltops in the spots less affected by erosion (plot 7), N_{\min} concentration amounted to 7.9 mg kg^{-1} (Fig. 1).

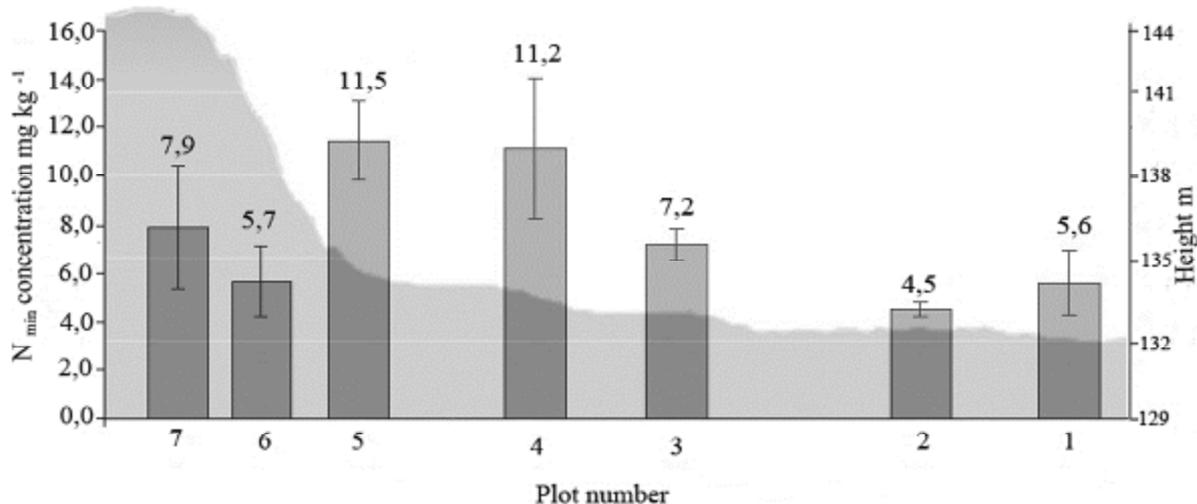


Figure 1 - Average mineral nitrogen concentration in 0–60 cm layer of Žemaitija and Kuršas Upland soils in Western Lithuania Zone (2011–2014)

During the experimental period (2011–2014), mineral nitrogen concentration in Middle Lithuania Zone in the soils of Lower Nemunas Plains differed between the seasons (spring, summer and autumn), and compared with that in the soils of other zones, was higher. The lowest average N_{\min} concentration 7.0 mg kg^{-1} in 0–60 cm soil layer was established in alluvial-deluvial soils (plot 7) (Fig. 2).

Soil texture had a significant effect on mineral nitrogen changes. In light-textured soils (plot 5), average N_{\min} concentration amounted to 7.8 mg kg^{-1} (Fig. 2). In heavy-textured soils (plot 4), N_{\min} concentration was higher – 9.5 mg kg^{-1} , i.e. by 1.7 mg kg^{-1} higher compared with that in the light-textured soils.

High N_{\min} concentration was recorded in gley, gleyic and in adjacent not water-logged soils (plots 1, 2 and 3) – 9.6, 8.6 and 8.1 mg kg^{-1} , respectively.

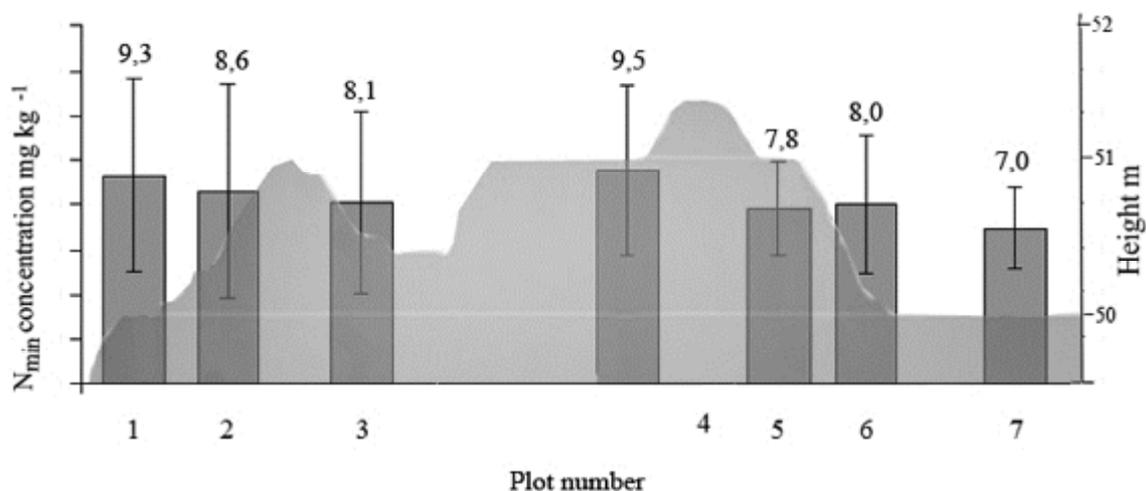


Figure 2 - Average mineral nitrogen concentration in 0–60 cm layer in the soils of Lower Nemunas Plain in Middle Lithuania Zone, 2011–2014

Mineral nitrogen fluxes in Eastern Lithuania Zone in the soil region of Baltic Upland's Western Plateau markedly varied between the seasons of the year (spring, summer and autumn) and depended on soil group and texture. In autumn, higher N_{\min} concentration 5.9 mg kg⁻¹ was noted for Eutri-Haplic Arenosols (Fig. 3). During the whole experimental period, higher average N_{\min} concentrations – 5.6 mg kg⁻¹ accumulated in Eutric Fluvi Fluvisols (Fig. 3).

In heavy-textured (p_1/p_2) soils (plots 3 and 5) N_{\min} concentration was lower – 4.8 and 4.6 mg kg⁻¹, respectively. However, during the autumn-winter period mineral nitrogen fluxes were lower compared with those in the soils with light texture.

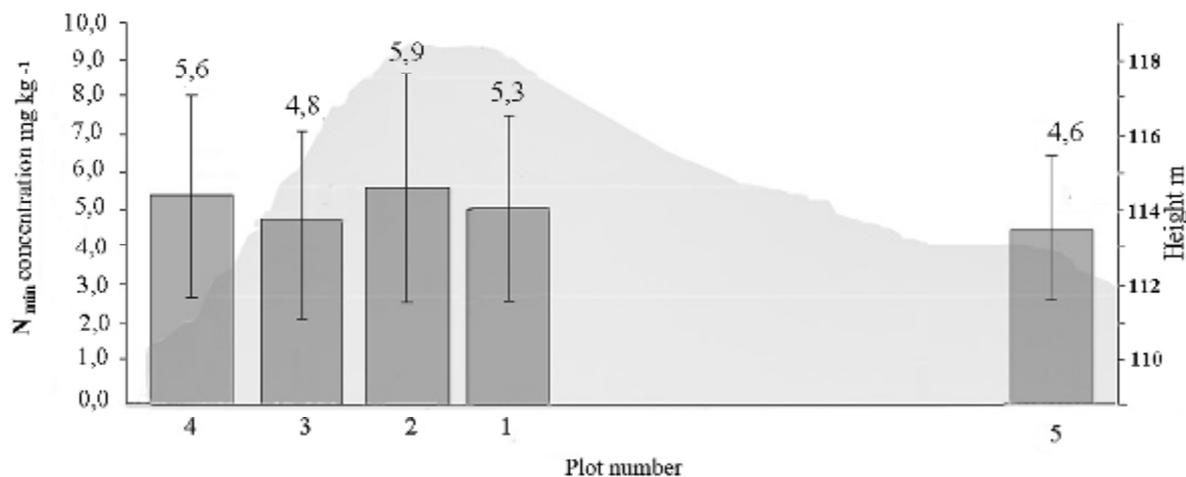


Figure 3 - Average mineral nitrogen concentration in 0–60 cm layer in the soils of Baltic Upland's Western Plateau, 2011–2014

The relationship between the crop yield and mineral nitrogen concentration (x ; mg kg⁻¹) was best reflected by the linear regression equations. In Western Lithuania Region, in the soil region of western part of Middle Žemaičiai Upland and Western Kuršas Upland and Eastern Lithuania Zone in the soils of Baltic Upland's Western Plateau the correlation coefficients indicating the strength of the correlation were moderately strong and strong: $r = 0.69$ ($p=0.003$), $r = 0.73$ ($p=0.005$), respectively and significant at 99 % confidence level. The strength of this correlation was lower ($r=0.59$, $p=0.163$) in Middle Lithuania Zone in the soil region of Lower Nemunas Plain.

CONCLUSIONS

1. Our study revealed typical pattern of mineral nitrogen in the main root zone of crops.
2. Pattern of mineral nitrogen were associated with soil texture and the position of soil types in the landscape
3. The study provided first data about the magnitude of mineral nitrogen concentration pools in soils resulting from mineralisation and fertilisation processes
4. In order to provide an optimal use of fertilisers and to protect water resources from pollution, future work should be directed on measurement and modelling of nutrient fluxes and cycles in agricultural landscapes of Lithuania.

REFERENCES

- [1]Wiesler, F., Armbruster, M. 2009. The application of the N_{min} soil test as an element of integrated nitrogen management strategies in agriculture. *Fertilizers and Fertilization* 37, 50–58.
- [2]Fotyma, E., Fotyma, M., Igras, J. 2005. Concentration of nitrate in groundwater as the environmental indicator. *Fragmenta Agronomija* 4, 5–20.
- [3]Staugaitis, G., Mažvila, J., Vaišvila, Z., Arbačiauskas, J., Putelis, L., Adomaitis, T. 2009. Soil mineral testing in Lithuania. *Fertilizers and Fertilization* 37, 99–107.
- [4]Rutkowska, A., Fotyma, M. 2011. Mineral nitrogen as a universal soil test to predict plant N requirements and ground water pollution – case study for Poland (ed. Burcu E. Ozkaraova Gungor). *Principles, Application and Assessment in Soil Science* 333–350.
- [5]Goulding, K. W. T., Poulton, P. R., Webster, C. P., Howe, M. T. 2000. Nitrate leaching from the Broadbalk wheat experiment, Rothamsted, UK, as influenced by fertilizer and manure inputs and the weather. *Soil Use Management* 16, 244–250.
- [6]Mclay, C.D.A., Dragten, R., Sparling, G., Selvarajah, N. 2001. Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches. *Environmental Pollution* 115, 191–204.
- [7]Liu, H. B., Wu, W. L., Zhang, J. 2005. Regional differentiation of non-point source pollution of agriculture-derived nitrate nitrogen in groundwater in northern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 107, 211–220.
- [8]Tong, Y. A., Shi, W., Lu, D. Q., Emteryd, O. 2005. Relationship between soil texture and nitrate distribution and accumulation in three types of soil profile in Shaanxi. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* 11, 435–441.
- [9]Goulding, K. W. T. 2000. Nitrate leaching from arable and horticultural land. *Soil Use and Management* 16, 1, 145–151.
- [10]Jabloun, M., Schelde, K., Tao, T., Olesen, E. J. 2015. Effect of temperature and precipitation on nitrate leaching from organic cereal cropping systems in Denmark. *European Journal of Agronomy* 62, 55–64.
- [11]Zentner, R. P., Campbell, C. A., Beiderbeck, V. O., Miller, P. R., Selles, F., Fernandez, M. R. 2001. In search of a sustainable cropping system for the semiarid Canadian prairies. *Journal of Sustainable Agriculture* 18, 117–136.
- [12]Entz, M. H., Bullied, W. J., Foster, D. A., Gulden, R., Vessey, K. 2001. Extraction of subsoil nitrogen by alfalfa, alfalfa-wheat, and perennial grass systems. *Agronomy Journal* 93, 3, 495–503.
- [13]Fan, J., Hao, M., Malhi, S. S. 2010. Accumulation of nitrate-N in the soil profile and its implications for the environment under dryland agriculture in northern China: a review. *Canadian Journal of Soil Science* 90, 3, 429–440.
- [14]Mažvila, J., Vaičys, M., Buivydaitė, V. 2006. Lithuanian morphological soil diagnostics: monograph. Lithuanian Institute of Agriculture, 283 p.
- [15]Juodis, J. 2001 a. Soil regions (ed. Eidukevičiene, M.). *Soils of Lithuania. Science and arts of Lithuania*, 699–707 (In Lithuanian, summary in english).
- [16]Juodis, J. 2001 b. Soil cover structure (ed. Eidukevičiene, M.). *Soil of Lithuania. Science and arts of Lithuania*, 690–698 (In Lithuanian, summary in English).



Photos 1,2. Field research plots of the Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, and two typical soil profiles within the soil mosaic of the agricultural landscape. Soils are a Haplic Luvisol and an Albic Gleyic Luvisol. Soils are typical for landscapes having a leaching regime. In case of redoximorphic properties in the deeper part of the soil profile temporary stagnant water or, like in the right photo, a sometimes relictic shallow water table may occur. In both cases, this is often associated with a slow lateral movement of water and leachates.

Основная глава 8.3 Мониторинг лесов
Main Chapter 8.3 Forest Monitoring

**Chapter III/11: MONITORING PROCESSES IN FOREST SOILS OF THE NORTHEAST
 GERMAN LOWLANDS**

**Глава III/11: Мониторинг процессов в почвах под лесом в Северо-Восточной
 Низменности Германии**

Winfried Riek^{*1,2}; Alexander Russ²; Jens Hannemann²

DOI 10.25680/2662.2018.86.80.204

*Email: WRiek@HNEE.de

1.Eberswalde University for Sustainable Development, Faculty of Forest and Environment, Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde, Germany

2.Eberswalde Forestry Competence Centre, Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde, Germany

ABSTRACT. The goal of the National Forest Soil Inventory is to provide a periodic overview on the spatial and temporal variation of forest soil condition. With regard to the anthropogenic and natural influencing factors the intensive monitoring sites of the Level II-program serve to gain a better understanding of the relevant cause-effect relationships. By the example of the Northeast German lowlands, the data obtained can be used to record changes in forest soil condition and to interpret them properly in the context of the effective pedogenic processes. An important factor that has shaped the soil condition in the past decades is the atmospheric deposition of nutrients and pollutants. Due to the generally improved air quality, an increasing dependence of the slightly changing soil properties on the natural conditions (e.g. parent material) as well as on the influence of the stand structure can currently be observed.

Резюме. Целью Национальной инвентаризации лесных почв является периодический обзор пространственных и временных изменений их состояния. Что касается антропогенных и естественных факторов воздействия, то интенсивные участки мониторинга программы II уровня служат для лучшего понимания соответствующих причинно-следственных связей. По примеру Северо-Восточной Низменности Германии полученные данные могут быть использованы для регистрации изменений состояния лесных почв и их правильного понимания эффективных педогенных процессов в них. Важным фактором, который сформировал состояние почвы в последние десятилетия, является осаждение питательных и загрязняющих веществ из атмосферы. В связи с общим улучшением качества воздуха в настоящее время наблюдается возрастающая зависимость незначительно изменяющихся свойств почвы от природных условий (например, материнской породы), а также от влияния структуры древостоя.

KEYWORDS: forest, soil, monitoring, forest inventory, soil survey, soil condition, soil acidification, carbon storage, forest nutrition, air pollution

Ключевые слова: лес, почва, мониторинг, инвентаризация леса, обследование почвы, состояние почвы, подкисление почвы, запасы углерода, питание леса, загрязнение воздуха

INTRODUCTION

For landscape research, reliable and representative environmental data are needed. A tried and tested measuring system which meets this demand is the National Forest Soil Inventory (NFSI), which is presented in this paper using the example of the Northeast German Lowland region. In the German federal state of Brandenburg, the NFSI includes 322 systematically distributed survey plots (1). Brandenburg is covered with 1.1 million hectares of forest area which corresponds to about one third of the state area. Both for ecosystems and on the scale of the landscape, forest soils fulfill crucial functions with regard to the water, nutrient and heat balance. The forest soil inventory was designed above all to investigate the current condition of forest soils in connection with atmospheric inputs. By repeating the NFSI every 15 years, changes over time can be detected with regard to deposition of air pollutants and climate change and their influence on soil chemical properties and site characteristics. Moreover the NFSI forms a suitable basis for the regionalization of inventory data and their coherent representation in the overall context of the landscape (2).

In addition to the extensive inventory plots of the NFSI as part of the European Level I monitoring program (3), there are eight intensive monitoring sites in Brandenburg which are representative of typical natural areas of the state (4). These sites are at the same time part of the European Level II monitoring program. All these intensive monitoring sites are equipped according to the standards of the ICP-forests (3) to model ecosystem water and element fluxes with high temporal resolution. This allows a detailed analyzes of the key ecosystem processes (5, 6).

SURVEY DESIGN

The NFSI is conducted as a co-operation between the Federal Government and the German states. The states are responsible for the assessment, analysis and evaluation of their own data. The survey is coordinated by a task force of the Federal Government and the German states. The Thünen-Institut of Forest Ecosystems keeps this data in a central database and is in charge of analyzing it nationwide.

For historical reasons there are two different inventory grids in the state of Brandenburg, each covering the whole forest area with a plot distance of 8x8 km. In total 322 plots were examined in the years 2007 and 2009 (NFSI II). 147 plots of this sample had already been examined in 1992 (NFSI I). The next inventory will take place as planned in the year 2022. The position of all examination plots is shown in Fig.1.

At each inventory site a comprehensive soil profile and site description were made. Both the vegetation and stand characteristics were recorded and needle / leaf samples were taken to analyze the current tree nutrition status. On each plot, soil material from eight circularly arranged satellite points was combined to one composite sample. The distance between sampling center and satellite points was 10 m. Soil sampling plots of the NFSI II were shifted 10 m from NFSI I satellites. Samples were taken from the organic layer (OF/OH-horizons) excluding the litter horizon (OL), as well as from the mineral soil in 0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm, 90-140 cm and 140-200 cm. To measure the bulk density in the laboratory, additional undisturbed core samples were taken of the mineral soil at the same depth intervals as the composite samples. The sampling procedure is described in detail in (7). Laboratory analyzes included pH, carbonates, organic carbon, total nitrogen, effective cation exchange capacity, plant available nu-

trient stocks, total elements including heavy metals, particle size distribution, coarse fragments and bulk density of about 2.500 soil samples per inventory.

On the intensive monitoring sites meteorological parameters as well as soil moisture, element concentrations in soil solution and current tree growth are continuously recorded by data logger. Via radio modem the data are transferred to a PC at the Eberswalde Forestry Competence Centre in a daily to weekly cycle.

CASE STUDY: STATUS AND DYNAMIC OF SOIL ACIDIFICATION

The area of Brandenburg is situated in the transitional zone of oceanic and continental climate. The annual average temperature varies regionally between 8.6– 9.3°C (1). The annual climatic water balance ranges from minimum values of about –82 mm to maximum values of about +36 mm. The parent materials are Quaternary sediments. In the topsoil mainly glacial cover sands, glacial fluvial sands, aeolian dune sand and glacial loam occur. The most common soil type is the podzolic brown-earth (WRB: Spodic Arenosol). The brown-earths differ in various degrees of the development of the spodic horizon. In addition, Podzols occur on the nutrient-poor dune sands and Luvisols on glacial loam. The inventory sample consists of about 70% pine, 7% oak and 3% beech stands. 16% are other deciduous stands and 4% other coniferous stands.

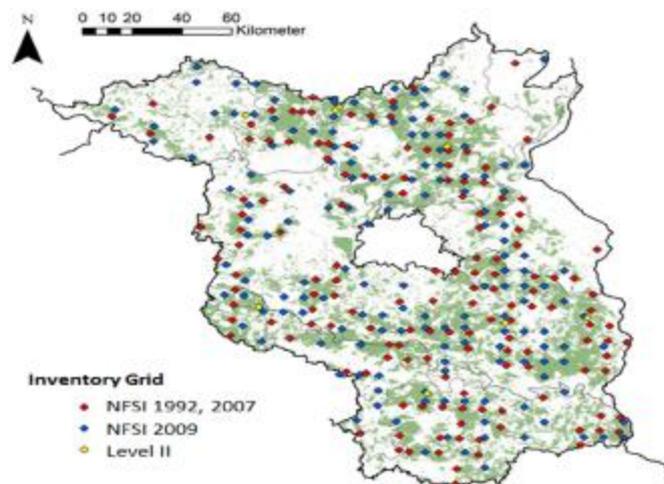


Figure 1 – Forest area in the state of Brandenburg with plots of the National Forest Soil Inventory and Intensive Monitoring Sites of the Level II programm.

Indicators of the soil condition show on the one hand a dependence on the natural site properties. For example, the total calcium content in 0-90 cm depth shows a spatial distribution pattern that reflects a dependence on geology, particularly on the stratigraphy. Thus in the northeastern part of Brandenburg there are the younger Pleistocene deposits with accordingly higher total Ca contents (Fig.2).

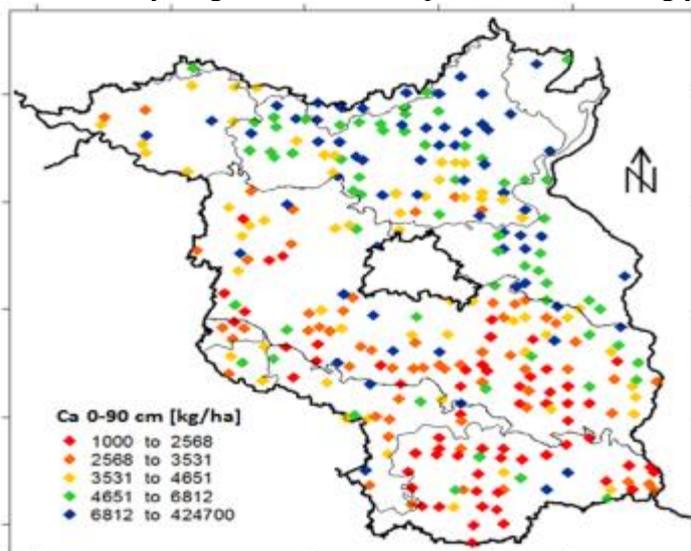


Figure 2 – Total Calcium stock [kg/ha] in 0-90 cm soil depth at the NFSI-plots of the state of Brandenburg with growing districts

However, anthropogenic factors characterize in particular the dynamic of slightly changing soil parameters such as pH-value and base saturation. Between NFSI I and NFSI II a decrease in the pH-values was recorded in the humus layer and the mineral top soil to 30 cm depth. In the subsoil it is not significant. The base-saturation as a sensitive indicator of soil acidification has decreased significantly in all depths of the examined soil body (Fig.3) and the calcium and magnesium stocks have changed from predominantly low-medium to low (Ca) and from low to very low (Mg) values, respectively (valuation levels by (8)). The leaching of calcium and magnesium ions, which had formerly been deposited by flying ash from brown coal power plants, is seen as one of the reasons for this obviously strong soil acidification in a relatively short period. A pronounced loss of base-cations is recorded especially in those soils that had unusually high base saturations for these normally nutrient-poor sandy soils at the time of NFSI I (9).

In the 1970s and 1980s the chemical topsoil condition was strongly affected by the atmospheric deposition situation. Until the first NFSI, particularly southern Brandenburg was one of the regions of central Europe most influenced by immissions. Different deposition intensities of acid sulphur compounds and ashes from brown coal-fired power stations with buffering capacities overlapped in a regionally varying pattern.

After the reunification, the atmospheric deposition strongly decreased due to decommissioning of industrial plants, introduction of flue gas cleaning systems and the use of low-emission energy sources. Of particular note is the elimination of the basic dust input, with the result that the importance of the acid deposition for the acid-base-status of the top-soils increased. With the end of this specific atmospheric input after the reunification, the accumulated mobile anions of sulfuric acid were leached out, taking corresponding amounts of calcium and magnesium cations with them. These results clearly differ from regions with formerly high depositions of sulphur, where sulphur was accumulated as aluminum hydroxyl sulphate under acid conditions. Based on element balances of intensive monitoring sites (Level II program) it was shown that the base stocks of the sites previously affected by flying ashes are now nearly exhausted (5, 10). Using the data of the NFSI II it can be confirmed that these individual findings from case studies are representative for a large part of the forest area in Brandenburg. Thus, in the regions formerly affected by dust deposition, it is assumed that the reduced base-saturation recorded in the NFSI II represents a more natural state than the artificially elevated values at the time of the NFSI I.

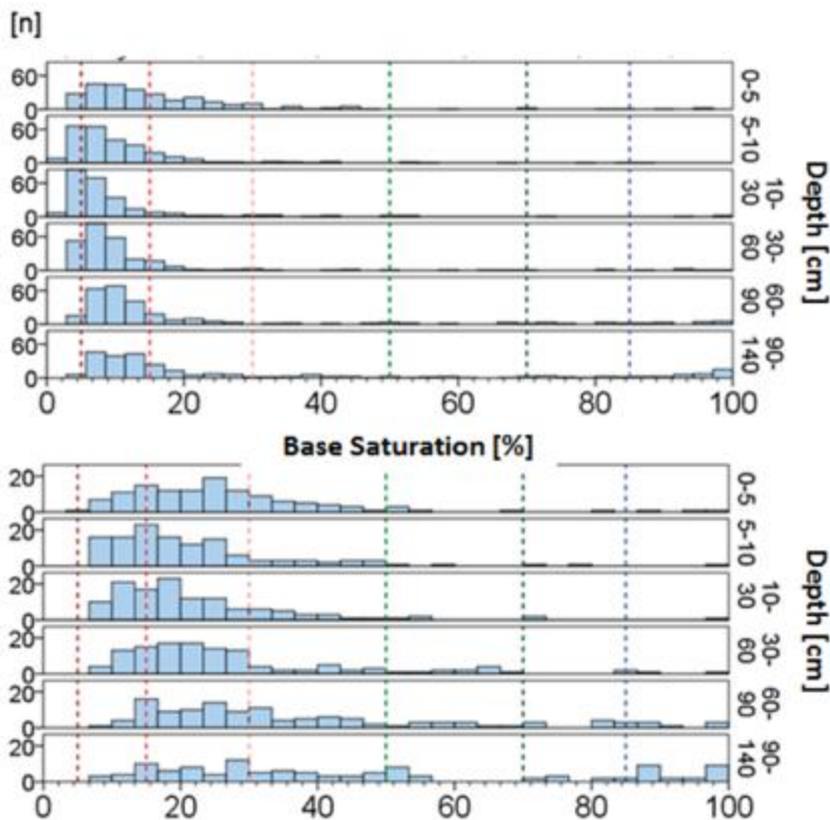


Figure 3 – Base saturation of the NFSI plots of Brandenburg (below: NFSI I in the years 1992/93; above: NFSI II in the years 2007 and 2009)

CONCLUSIONS

1. The National Forest Soil Inventory in combination with the intensive monitoring sites of the Level II-program is suitable for the representation of changes in the soil condition both descriptively and causal analytically.
2. Current data show very high dynamics of fundamental soil chemical properties.
3. The changed element input rates by atmospheric deposition induced the decrease of base stocks of forest soils in the Northeast German lowlands. As a result, currently many sites are returning to their naturally nutrient-poor status, which corresponds to the silicate-poor parent material.

REFERENCES

- [1]Riek, W., Russ, A., Kühn, D. (2015): Waldbodenbericht Brandenburg – Zustand und Entwicklung der brandenburgischen Waldböden. Ergebnisse der landesweiten Bodenzustandserhebungen BZE-2 und BZE-2a. Band 1. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 60. Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (Hrsg), Eberswalde. 172 S.
- [2]Riek, W., Russ, A. (2016): Regionalisierung: Ableitung von Flächenaussagen aus Fallstudien und BZE. In: 30 Jahre forstliches Umweltmonitoring in Brandenburg. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (Hrsg.). Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 63. 192-206.
- [3]ICP-forests - International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. Manuals. <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>
- [4]Riek, W., Russ, A., Hannemann, J., Kallweit, R. (2016): Bodenzustand und Baumernährung: Kennwerte aus BZE und Level II-Programm. In: 30 Jahre forstliches Umweltmonitoring in Brandenburg. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (Hrsg.). Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 63. 40-60.
- [5]Hannemann, J., Russ, A., Kallweit, R., Riek, W. (2016): Betrachtungen zu den Stoffbilanzen von Level II-Flächen in Brandenburg. In: 30 Jahre forstliches Umweltmonitoring in Brandenburg. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (Hrsg.). Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 63. 61-75.
- [6]Russ, A., Riek, W., Kallweit, R., Einert, P., Jochheim, H., Lüttschwager, D. Hannemann, J., Becker, F. (2016): Wasserhaushalt von Standorten des Level II-Programms in Brandenburg. In: 30 Jahre forstliches Umweltmonitoring in Brandenburg. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (Hrsg.). Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 63. 136-157.
- [7]BMELV (2006): Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). 2 Aufl. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Bonn.
- [8]AK Standortkartierung (2003): Forstliche Standortaufnahme - Begriffe, Definitionen, Einteilung, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 6 Aufl. IHW-Verlag, Eiching bei München, 352 S..
- [9]Riek, W., Russ, A., Martin, J. (2012): Soil acidification and nutrient sustainability of forest ecosystems in the northeastern German lowlands - Results of the national forest soil inventory. Folia Forestalia Polonia. Vol. 54, No. 3. 187-195.
- [10]Riek W., Kallweit R., Einert P., Strohbach B. (2006): Wasser- und Stoffhaushalt von Kiefernbeständen des Level II-Dauerbeobachtungsprogramms in Brandenburg. Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie, 40 (4), 145– 157.

Chapter III/12: EVALUATION OF THE SOILS' HUMUS STATUS IN ESTONIAN FOREST LANDSCAPES

Глава III/12: Оценка гумусного состояния почв лесных ландшафтов Эстонии

Raimo Kõlli*1; Tõnu Tõnutare1; Mait Lang1,2; Lech W. Szajdak3; Karin Kauer1; Kaire Rannik¹
DOI 10.25680/4129.2018.37.67.205

* Email: raimo.kolli@emu.ee

1.Estonian University of Life Sciences (EMU), Kreutzwaldi Str. 1a, 51014 Tartu, Estonia

2.Tartu Observatory, 61602 Tõravere, Tartu County, Estonia

3.Institute for Agricultural and Forest Environment, Polish Academy of Sciences, Bukowska Str. 19, 60-809 Poznan, Poland

ABSTRACT. Stewardship of soil organic carbon (SOC) is of paramount importance in formation and functioning of landscape. From the humus status (HS) of landscape's soils depend forest ecosystems composition and functioning (annual productivity and litter fall). In our work the methodological principles used in evaluation of soils' HS and the quantitative data of dominated Estonian forest soils' HS are presented. The main attention is paid to SOC concentration, stocks and distribution in the HC, as well to soils' humus cover (HC) fabric and types (*pro* humus forms). Essential are also the analyses on the role of HS in SOC cycling and its annual balance, in formation of ecosystems biodiversity and in evolving to landscape the environment protection ability. All key terms and soil names used in local level are explained as well by international ones.

Резюме. Управление органическим углеродом почвы (SOC) имеет первостепенное значение в формировании и функционировании ландшафта. От гумусного состояния (HS) почв ландшафтов зависит состав и функционирование лесных экосистем, следовательно и их годовой прирост и опад. В обзоре приведены методологические принципы определения гумусного состояния почвы, а соответствующие количественные данные представлены по преобладающим типам лесных почв Эстонии. Основное внимание в анализе уделяется концентрации, запасам и распределению органического углерода в гумусированном слое, а также строению и типам гумусированного слоя (HC) почв (т.е. на формы гумуса). Существенным является анализ роли гумусного состояния почв в круговороте органического углерода, его годовом балансе, в формировании биоразнообразия экосистем, а также роли ландшафта в охране окружающей среды. Все ключевые термины и названия почв, используемые на национальном уровне, объясняются также международными названиями.

KEYWORDS: humus status, forest soils, pedocentric approach, humus and soil cover, landscape, soil map

Ключевые слова: гумусное состояние, лесные почвы, педоцентрический подход, гумусный и почвенный покров, ландшафт, почвенная карта

INTRODUCTION

For the material basis of a landscape is its soil cover (SC). The appearance and functioning of landscape depends besides of SC on other factors including area relief, climatic conditions and land use. Therefore, the fabric, diversity and functioning capacity of formed on natural landscapes terrestrial ecosystems depend mainly on the physical-chemical properties and watering conditions of their soils [1, 2]. The best indicator in characterizing of forest landscape's functioning intensity is the humus status (HS) of its SC. The HS of soils may be taken as a driving force, which determines the character of processes and evolution direction of the forest landscapes.

Main aim of this overview is to elucidate the role of soils' HS in the functioning of landscapes. The knowledge on soil organic matter (SOM) throughout flux of SC or functioning regularities are essential in the planning of ecologically sound management and protection of forest landscapes. The integrating of soils' data into the landscape management is possible thanks to the availability (1) of large scale (1:10,000) soil maps for all Estonia and (2) of quantitative data on HS for all dominated soil types. In actual work both the methodological principles and the quantitative examples about some dominated Estonian forest soils' HS are given [2, 3, 4].

METHODOLOGICAL PRINCIPLES AND EXPLANATION OF TERMINOLOGY

For explaining the SC role in development and functioning of forest landscapes the pedocentric approach is used (Fig.1). The HS of a soil is in principle the management character of SOM or its throughout flux via the SC. This flux begins with litter fall on or into the soil and follows by variegated processes in mutual relationships with soil living, liqued, gaseous and solid phases, until to its stabilization or/and total mineralization and elimination from the SC. The terms used in the quantitative characterization of HS are (1) SC or solum which embraces the superficial landscape layer influenced by soil forming process and consists of humus cover (HC) and subsoil (SS), and (2) HC or topsoil or epipedon which encompasses the most active superficial part of SC via which the dominant part of soil organic carbon (SOC) cycling takes place. The HC consists of the forest floor, humus or raw humus and peat horizons and is closely coupled with plant cover. SS consists of the eluvial and illuvial horizons.

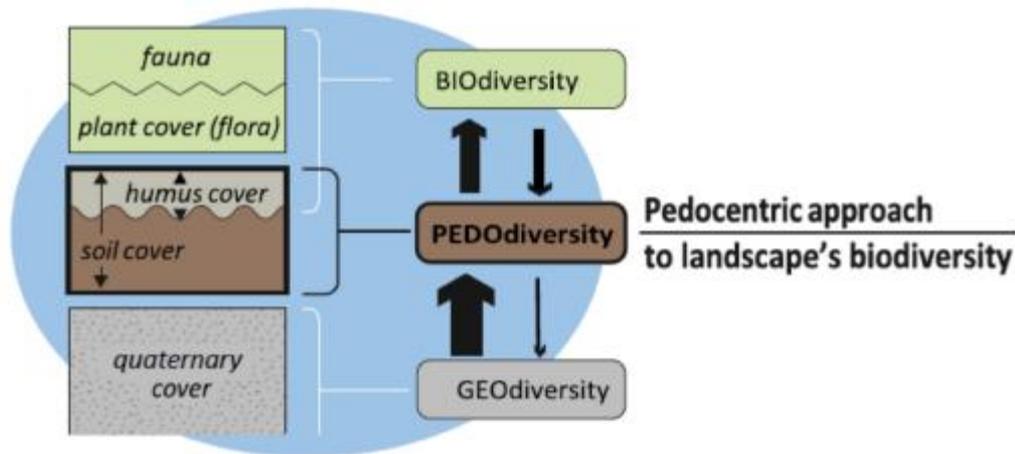


Figure 1 – Soil cover of the landscape is an intermedium between non-living (*geo*) and living (*bio*) compartments: Pedodiversity depends much on geodiversity but determines in turn the outlines of biodiversity.

Treating of SC on the basis large scale soil maps (1:10,000) needs the using of detail level classification taxa as (1) soil species which is the taxon of Estonian soil classification (ESC) identified by soil forming processes, (2) soil variety - taxon of ESC identified by soil species' texture and (3) soil association - an assemblage of two or more soil species (or varieties) within a designated soil contour, recurring in different patterns across the landscape.

ORIGIN OF USED DATA AND OUTLINES OF METHODS

The quantitative data of soils' HS originate mainly from the soil profile horizons database (DB) *Pedon* and HS research transect DB *Catena* created by us. The main parameters of soils' HS are the thickness and morphology of soil horizons, SOC concentration (g kg^{-1}), stocks (Mg ha^{-1}) and annual cycling ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). The SOC stocks are calculated on the basis of the SOC concentrations and bulk densities of corresponding soil horizons. The volume of the coarse soil fractions were determined during the field research. The content of fine-earth ($\phi < 1.0 \text{ mm}$) in soil samples was determined in the laboratory by sieving, but the particle size distribution by using the pipette method of Kachinsky. SOC concentration was determined by wet digestion of carbon with acid dichromate. In calculation of SOM in mineral soils the coefficient 1.72, but of peaty soils and forest floors 2.00 was used. The soil names given in the national DB by ESC were converted into World Reference Base (WRB) soil classification system. In addition to our experimental data the materials published on HS and productivity of mineral and peat soils of Estonia and on peat soils of Poland were used.

OVERVIEW ON LAND USE AND OF CLIMATIC AND PEDO-ECOLOGICAL CONDITIONS

To the natural area of Estonia, which is located in mild and wet pedo-climatic conditions, mainly the mixed forests are characteristic. As a result of intensified agricultural activity during last two centuries the most productive areas of Estonia (soils suitable for crop cultivation and grasslands) have been turned into arable, pastured or hay-lands (Fig. 2).

The main part of parent materials of soils is derived here from glacial and aquaglacial *Quaternary* deposits. For the parent material of half mineral soils are *Pleistocene* tills. The re-worked from tills glaciofluvial, glaciolacustrine, alluvial and aeolian sediments are distributed alternatively with tills.

Estonian forested landscapes' SC is typical to north-eastern Europe, where the *Histosols* (37%) and *Gleysols* (ca 36%) and are dominated. Among *Histosols* the *sapric* and *fibric* soil subdivisions in fens and bogs are dominating. From the *Gleysols* a half have *eutric* (calcareous) and a quarter – *dystric* properties. The share of automorphic mineral soils is only 24.3% of forest, from which the subdivisions of *Retisols* (7.9%), *Cambisols* (6.5%) and *Podzols* (6.0%) are dominating. The texture and moisture conditions of forested landscapes are characterized on Fig. 3. The landscape is shown in the photos of the Appendix.

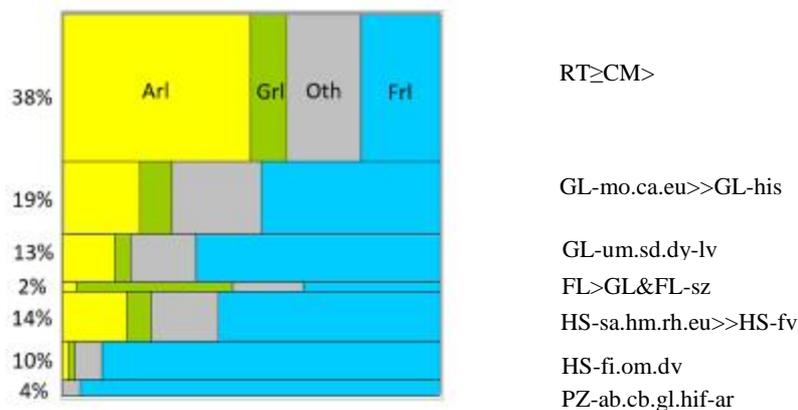


Figure 2 – Land use in Estonia given by WRB soil groups. Land use: Arl - arable, Grl – grass-, Frl - forest and Oth - rests or undefined lands. WRB reference soils: RT – *Retisols*, CM – *Cambisols*, LV – *Luvisols*, GL – *Gleysols*, FL – *Fluvisols*, HS-sa – *Sapric Histosols*, HS-fi – *Fibric Histosols*, and PZ – *Podzols*

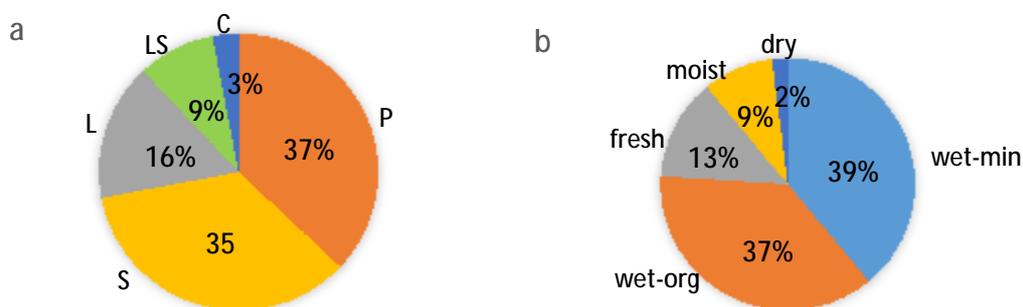


Figure 3 – Distribution of Estonian forest landscapes by the percentage of their soil covers' texture (a) and moisture conditions (b). Texture: P – peat, S – sand, L – loam, LS – loamy sand, C – clay. Moisture regime: wet-min – wet mineral (epigleyic) soils, wet-org – wet peaty soils, fresh – fresh (automorphic), moist (i.e. endogleyic) and dry (or aridic) soils.

EXAMPLES ABOUT SOME GENERALIZED RESULTS AND POSSIBILITIES FOR FURTHER DELIBERATIONS

Depending on soil type and land use the soils' HS quantitative characteristics are quite different in different SC layers (Table 1). Besides of simple soils HS characterization by SOC (SOM) content, vertical distribution in SC and horizontal pattern is possible to develop lot of pedocentric landscapes researches as (1) to present generalized data on humus balances (Fig. 4) and potential productivity of dominating soils [4, 5], (2) to present the HS data by soil species and their associations, by forest site types, by humus cover types [6] or by landscape regions [1], (3) to analyze the role of peatlands in landscapes for elucidating a reasonable equilibrium between their using and protection [7], and oth.

Table 1. Weighted mean^{a)} data on SOC retention capacity (Mg ha⁻¹) of forested lands' soil cover.

Land use, layer ^{b)}	Automorphic mineral soils	Hydromorphic mineral soils	Wetland organic soils	Weighted means of all soil groups
Forest land, SC	72.5	130.3	237.9	156.0
Forest land, HC	47.6	97.0	108.1	89.1
Forest land, SS	24.9	33.3	129.8	66.9

a) Weighted (by area) means; b) Abbreviations: SC – soil cover; HC – humus cover, and SS – subsoil.

Our researches insist that SC is a determining factor in the development of plant cover and its diversity. The pedodiversity may be caused by soil texture variations (from sand to clay), mineralogical and chemical composition, calcareousness and acidity. The pattern of SC and its diversity are induced by area geodiversity and hydrological conditions. For better understanding of mutual influences of SC and plant cover, the feedback influences of their main components (soil, plant) functioning should be studied at the ecosystem level, on typical-to-region soil types and management conditions. The annual productivity of natural ecosystems on well-drained soil depends mainly on clay and SOM content and stock in the soil profile, but on wet soils from watering character [5]. The maximum functioning activity of an ecosystem is observed in the presence of plant cover, which is optimal to soil properties.

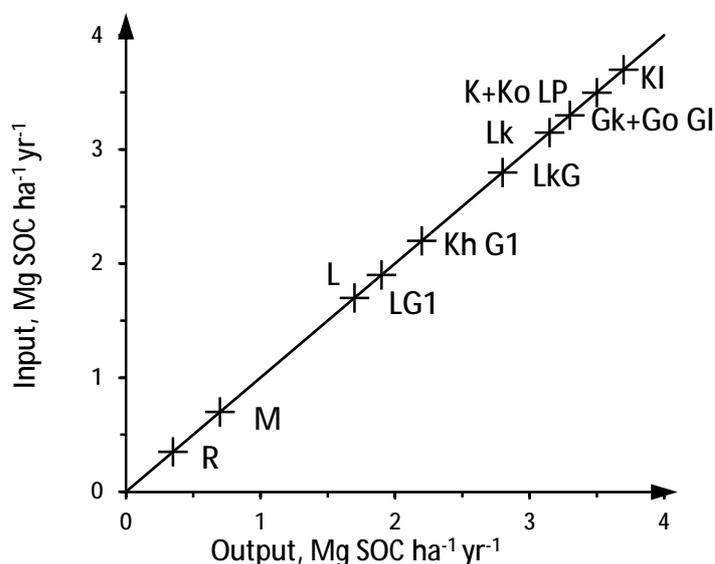


Figure 4 - Organic carbon annual circulation in some forested landscapes' soils.

Soils by WRB: Kh – *Leptosols*, K+Ko – *Cambisols*, KI – *Luvissols*, LP – *Retisols*, Lk – *Umbric Podzols*, L – *Albic Podzols*, Gk+Go – *Mollic Gleysols*, GI – *Umbric Gleysols*, LkG – *Spodic Gleysols*, G1 – *Histic Gleysols*, LG1 – *Histic Podzols*, R – *Fibric Histosols* and M – *Sapric Histosols*.

HC type may be used as a complex indicator of the landscape, which reflects of whole ecosystem functioning and the character of proceeding there biological turnover. The special interest should be focused besides of functioning soil-plant system to the detritus food chain. Knowledge on decomposers community help us to understand the substantiality of ecological processes in landscapes. Ecologically sound management of landscape takes also into account the environmental protection ability of soils as an intrinsic property of the ecosystem.

CONCLUSIONS

1. The pedodiversity of the landscape is an abiotic base for formation of optimal (specific to soil type) plant cover biodiversity. The ecologically sound matching of soil and plant covers is of pivotal importance in the reaching of sustainable ecosystem functioning and of a good environmental status of ambient area.
2. HS of natural forest landscapes has a determinative role in the formation of plant cover composition, productivity and diversity. Therefore the awareness on the composition and properties of HC types (*pro humus forms*) and their relationship with plant cover and SOM decomposition potentiality are the basis of ecologically proper and sustainable management of land (soil) resources.
3. Comparative analysis of soil-plant mutual relationships on the background of pedo-ecological conditions revealed that (1) the biodiversity of an ecosystem depends on soil properties, being therefore a

soil type-specific feature, and (2) the type of HC is a good ecological indicator in characterizing outlines of the biological turnover between soil and plant.

REFERENCES

- [1]Arold, I. 2005. Eesti maastikud (Estonian landscapes). Tartu Ülikooli kirjastus, Tartu, 453 pp. [in Estonian].
- [2]Kõlli, R., Ellermäe, O., Köster, T., Lemetti, I., Asi, E., Kauer, K. 2009. Stocks of organic carbon in Estonian soils. *Estonian J. Earth Sci.*, 58, 95–108.
- [3]Estonian Land Board 2012. Explanatory letter for the large scale digital soil map of Estonia. [in Estonian] http://geoportaal.maaamet.ee/docs/muld/mullakaardi_seletuskiri.pdf
- [4]Kõlli, R. 2002. Productivity and humus status of forest soils in Estonia. *For. Ecol. Manag.*, 171, 169–179.
- [5]Lang, M., Kõlli, R., Nikopensius, M., Nilson, T., Neumann, M., Moreno, A. 2017. Assessment of MODIS NPP algorithm-based estimates using soil fertility and forest inventory data in mixed hemi-boreal forests. *For. Stud.*, xx, ...–...
- [6]Kõlli, R. 1992. Production and ecological characteristics of organic matter of forest soils. *Eurasian Soil Sci.*, 24, 6, 78–91.
- [7]Kõlli, R., Astover A., Noormets, M., Tõnutare, T., Szajdak, L. 2009. Histosol as an ecologically active constituent of peatland: a case study from Estonia. *Plant Soil*, 317. 3–17.



Appendix, Photo 1. Meeni-kunnu, Estonia. Pine forest of *Rhodococcum* (on higher areas) and *Myrtillus* (on lower areas) site type on typical Podzols; by WRB for the dominating soils of the higher areas are Albic Carbic Podzols (Arenic), but of the lower - Ortsteinic Albic Gleyic Podzols (Arenic). (Photo K. Kauer)



Appendix, Photo 2. Karula, Estonia. Forest landscape with coniferous and mixed forests on the Karula Height; quaternary cover here is formed in late glacial period as an edge formation composed of morainal hills, adjoined mounds and paludified depressions; to this landscape is characteristic a high degree of pedodiversity. (Photo K. Kauer)

**Глава III/13: ОЦЕНКА ИНДЕКСА ЛИСТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕСНЫХ
ЛАНДШАФТОВ РОССИИ ПО ДАННЫМ ГОСУДАРСТВЕННОГО
ЛЕСНОГО РЕЕСТРА**

**Chapter III/13: Leaf Area Index Estimate for the Russian Forested Landscapes Based on the State
Forest Inventory Data**

Михаил Д. Корзухин*1; Василий И. Грабовский²

DOI 10.25680/9237.2018.71.58.206

* Эл. Почта: mdkorz@gmail.com

1. Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, ул. Глебовская, 20Б, 107258 Москва, Россия

2. Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, 117997 Москва, Россия

РЕЗЮМЕ. Данные Государственного Лесного Реестра (ГЛР) за 2007 год использованы для вычисления индекса листовой поверхности лесов (LAI, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) РФ в двух пространственных разрешениях – по Лесным районам (31) и по лесничествам (1900). Площади и запасы всех 66 пород ГЛР позволяют найти значения удельных запасов пород U ($\text{m}^2 \text{га}^{-1}$). Расчет LAI использовал конверсионные коэффициенты «запас древесины @ фитомасса листы», t m^{-3} , и проекционные удельные листовые поверхности (SLA, $\text{cm}^2 \text{г}^{-1}$). Полученные величины LAI близки к средним оценкам, найденным наземными и дистанционными методами (приведенный обзор для июля содержит 18 литературных источников). Наибольшие величины LAI наблюдаются в подзоне средней тайги Европейской части России и в Приангарье ($\text{LAI}_{\text{max}} \sim 5\text{-}6 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$). Полученные оценки LAI могут быть использованы для расчетов продуктивности лесных экосистем на разных масштабах рассмотрения, а также для калибровки данных, полученных методами дистанционного зондирования.

Abstract. The 2007 State Forest Inventory (SFI) data was aggregated at two spatial scales of 31 forest regions, and 1900 forest districts to estimate the leaf area index (LAI, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) of the Russian forests. Areal coverage and yields of every one of 66 wood species included in SFI was used to calculate the specific yield U ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$). To calculate LAI the conversion factors (t m^{-3}) were used to estimate the leaf phytomass from the yield, and projective specific leaf area (SLA, $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$). Our LAI estimates are about the average estimates provided by ground and remote studies, according to the review of 18 publications. Maximal LAI are found in the middle taiga of the European part of Russia and in the Angara region. The estimates of LAI have an application in assessments of productivity of forest ecosystems at various scales, as well as to validate a spatial scaling of the remotely sensed data.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: индекс листовой поверхности, Государственный Лесной Реестр, удельная листовая поверхность, LAI

Keywords: leaf area index, State Forest Register, specific leaf area, LAI

ВВЕДЕНИЕ

На уровне насаждения LAI [m^2 (проекционной поверхности листы) / m^2 (площади насаждения)] является важнейшим функциональным показателем, определяющим интенсивность энерго- и массообмена (поток H_2O и CO_2) между поверхностью и атмосферой. Данные Государственного Лесного Реестра (ГЛР) потенциально - самый обширный наземный источник для определения LAI лесов. Пространственной единицей представления в ГЛР является лесничество. Число лесничеств в 2007 г. равнялось 1900, что при общей площади лесов $7.325 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ дает среднюю площадь доступной пространственной единицы равной 3860 km^2 (квадрат $62' 62 \text{ км}$). Пространственное разрешение, достигаемое дистанционными методами, гораздо выше, однако данные ГЛР имеют пред ними серьезные преимущества, позволяя, в принципе, а) найти LAI для отдельных пород, и б) проследить зависимость LAI от возраста насаждения (что дистанционно сделать пока невозможно).

Таким образом, учитывая важность оценки LAI, есть основания рассчитать его по данным ГЛР. Результаты могут использоваться для контроля наземных измерений LAI, в экологических или модельных расчетах разного типа, а также для калибровки дистанционных методов. Усредненные по породам и возрастам значения LAI были рассчитаны для минимально возможных пространственных единиц - лесничеств (1900), затем для агрегированных пространственных единиц - лесных районов [1], отражающих экологическое деление территории РФ (31 единица).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отчетные данные ГЛР для 1900 лесничеств за 2007 год [2] содержат площади ($S(k)$, га) и запасы древесины ($V(k)$, m^3) для всех пород списка ГЛР, распределенных по группам возраста $k = 1, \dots, 6$; каждое лесничество принадлежит одному из 31 лесных районов. Эти величины были использованы для нахождения значений LAI для одного гектара, занятого группой возраста k породы p в лесничестве f .

Алгоритм расчета таков. Следуя работе Замолодчикова и др. [3], были взяты значения конверсионных коэффициентов «запас древесины @ фитомасса листвы» $K_{leaf}(p, k)$, $t\ m^{-3}$ (здесь и далее – граммы и тонны сухого веса); коэффициенты построены по материалам базы данных [4]. После нахождения удельного запаса $U(p, k) = V(p, k)/S(p, k)$, $m^3\ га^{-1}$ находится фитомасса листвы в $t\ га^{-1}$:

$$M_{leaf}(f, p, k) = K_{leaf}(p, k) \cdot U(f, p, k). \quad (1)$$

Необходимые коэффициенты для расчета значения удельных листовых поверхностей SLA (Specific Leaf Area), $cm^2\ г^{-1}$, были получены обработкой большого числа наземных полевых данных в работах [5, 6]; исходные полные листовые поверхности переведены нами в проекционные. Эти величины позволяют окончательно найти

$$LAI(f, p, k) = M_{leaf}(f, p, k) \cdot SLA(p) \cdot 10^{-2} \quad (2)$$

(числовой множитель переводит $SLA[cm^2\ г^{-1}]$ в $SLA[га\ т^{-1}]$). Ввиду значимости величин SLA для расчета LAI, в таблице 1 приведены использованные значения SLA для пород списка ГЛР, имеющих площадь не менее 0.5% в общей площади лесов (732.5 млн га в 2007 г.) и суммарно занимающих 98.5% площади.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Величины $K_{leaf}(p, k)$ находились, как правило, по измерениям, сделанным в середине вегетационного периода, поэтому они дают оценку максимальных значений LAI в течение года. Взвешенные по площадям групп возраста и пород величины LAI(f, p, k) позволяют найти LAI(f), а взвешенные по площадям лесничеств в пределах лесного района - LAI(r), $r = 1, \dots, 31$ – лесной район. Результаты приведены на рисунке 1.

Интересна оценка гетерогенности в пространственном распределении LAI. Мы построили карту значений LAI в максимальном доступном нам разрешении – по лесничествам. Была выбрана область в средней части Европейской территории России (Рисунки 1, 2); на этой территории находится 762 лесничества. Интересна концентрация высоких значений LAI на запад и юго-запад от Москвы и на западном склоне Уральского хребта. Резкое уменьшение LAI к юго-востоку соответствует, очевидно, уменьшению лесистости при переходе к лесостепи.

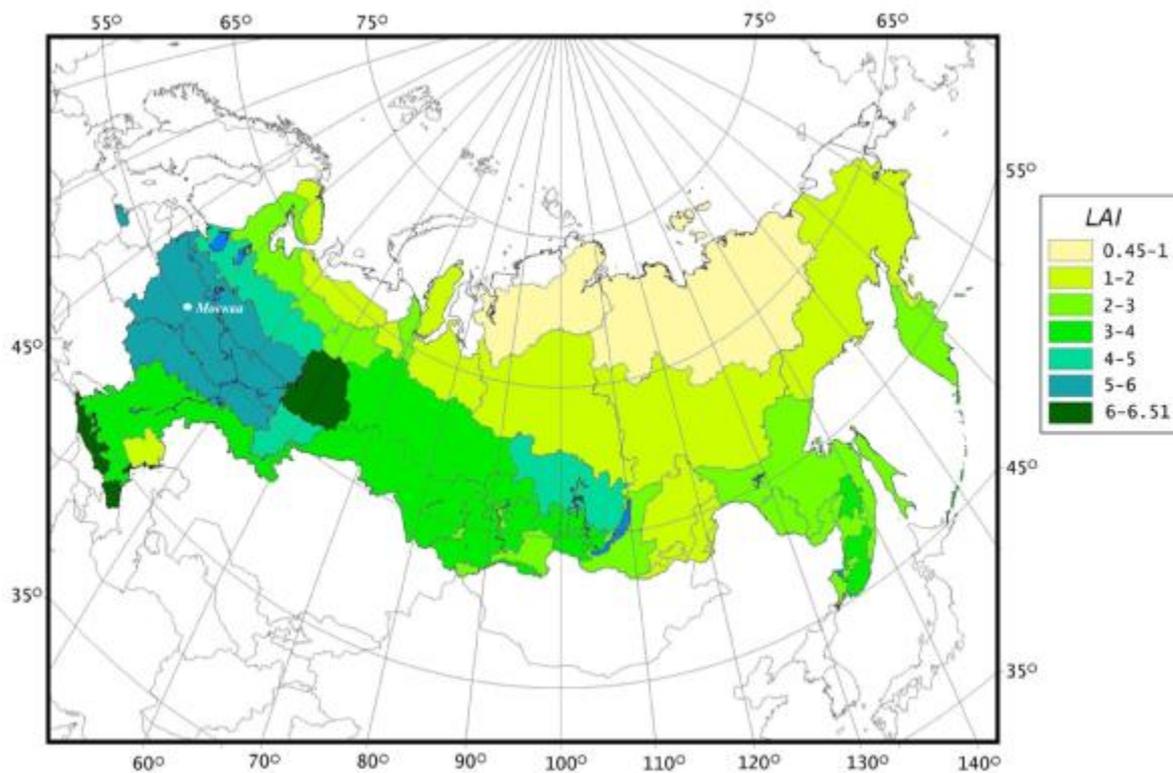


Рисунок 1- Значения LAI для 31 лесного района РФ, найденные с помощью конверсионных коэффициентов [запас древесины ® фитомасса листьев] [3] и SLA [5, 6].

Таблица 1- Удельные листовые поверхности (SLA) для основных пород, использованные для расчета LAI.

Код породы в ГЛР	Порода	SLA, $\text{cm}^2 (\text{г сухого веса})^{-1}$	Доля в полной площади
101	Сосна	51	0.1567
102	Ель	53	0.0997
103	Пихта	95	0.0190
104	Лиственница	98	0.3676
105	Кедр	51	0.0521
110+111	Дуб высоко- и низкоствольный	148	0.0088
117	Береза каменная	200	0.0118
124	Береза	199	0.1396
125	Осина	159	0.0287
182	Березы кустарниковые	204	0.0370
190	Ивы кустарниковые	220	0.0065
191	Кедровый стланик	51	0.0520
204	Другие кустарники	187	0.0058

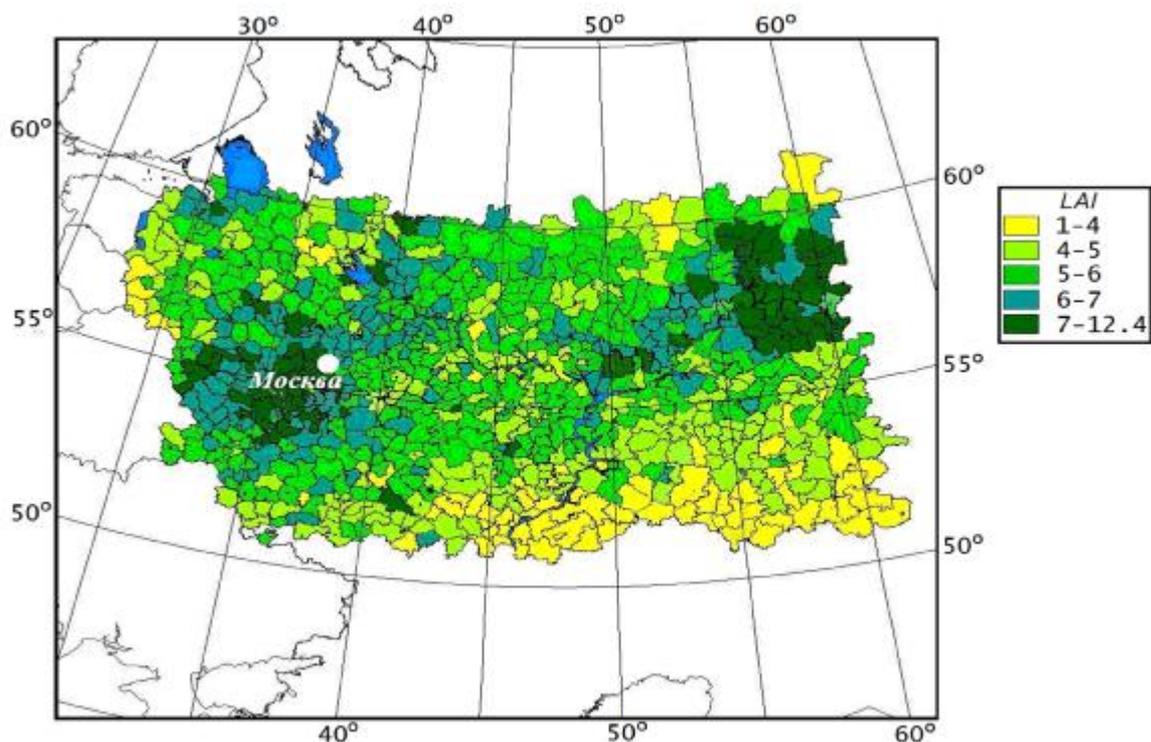


Рисунок 2- Значения LAI для лесничеств средней части Европейской территории России

Методы измерения LAI могут быть наземными (локальными) и дистанционными, как правило, спутниковыми (дают сплошное покрытие территории). И те, и другие зависят от инструмента и периода измерения, принятой модели строения полога и алгоритма расчета (по этой причине будут различаться результаты, полученные на одинаковых исходных данных). Специфика наших данных такова, что найденные значения LAI имеет смысл сопоставлять с данными, найденными дистанционно. Поиск в соответствующей литературе позволяет найти карты LAI для территории РФ как части глобальных карт; доступное разрешение обычно невелико. Не имея возможности осуществить строгое количественное сопоставление значений LAI, мы предприняли его визуальную оценку для широтно-долготного прямоугольника, выделенного на рисунке 1 и увеличенного на рисунке 2 (Таблица 2).

Таблица 2- Максимальные (LAI_{max}, обычно за июль) и среднегодовые (LAI_{aver}) значения LAI в области, изображенной на рисунке 2, по различным источникам (приближенно)

LAI max	LAI aver	База данных	Источник
5-6		Государственный Лесной Реестр	настоящая работа
	0.5-1.5	NASA SeaWiFS sensor	[7]
5-7		AVHRR ¹	[8]
3.5-5		LAI MODIS ² product	[9]
5-6	1.5	Global data sets of LAI from NDVI ³	[10]
6-7		SPOT VEGETATION	[11]
4-6		VEGETATION S10	[12]
6-8		ISLSCP-II ⁴ data set	[13]
4-6		MODIS data set (mean 2001–2004)	[13]
4-6		ECOCLIMAP data set	[13]
3-5		LASUR ⁵ /AVHRR data set	[14]

Таблица 2. Продолжение.

4-5		combined AVHRR and MODIS data	[15]
3-4.5		ECOSYSTEM data set	[16]
3-4		POLDER ⁶ data set	[16]
4.5-5.5		ISLSCP-II data set	[16]
4-5.5		MOD15A2	[17]
6-7		MODIS (2012)	[18]
3.2-4.0		Еру 8-km global data set for 1995	[19]
4.5-5.5		Сумма наземных и дистанционных методов	[20]
2-4		Global data sets of LAI (LAI)3g	[21]
4.1-5.6			Среднее по 19 лит. источн.

¹ AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer

² MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

³ NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

⁴ ISLSCP - International Satellite Land Surface Climatology Project

⁵ LASUR – Land Surface Reflectances

⁶ POLDER - Polarization and Directionality of Earth's Reflectances

Видна заметная вариабельность результатов. Найденные нами значения близки к верхней границе множества оценок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Данные Государственного Лесного Реестра (ГЛР) могут быть использованы для оценки LAI лесов на территории России.
2. Полученные величины укладываются в интервал значений LAI, полученных большим набором дистанционных методов.
3. Рекомендуется использование полученных значений LAI при построении моделей продуктивности лесов на территории РФ

ЛИТЕРАТУРА

[1]Перечень лесорастительных зон и лесных районов Российской Федерации. Приложение к Приказу Минсельхоза РФ от 4 февраля 2009 г. N 37 "Об утверждении перечня лесорастительных зон и лесных районов Российской Федерации". -М., 2011.

[2]Лесной фонд России (по данным государственного учета лесного фонда по состоянию на 1 января 2007 г.). Справочник. -М.: Рослесинфорг, ВНИИЛМ. 2007. - 637 с.

[3]Замолодчиков, Д. Г., Уткин, А. И., Честных, О. В. 2003. Коэффициенты конверсии запасов в фитомассу для основных лесобразующих пород России. Лесная Таксация и Лесоустройство 1(32) 119-127.

[4]Уткин, Ф. И., Гульбе, Я. И., Гульбе, Т. А., Ермолова, Л. С. Биологическая продуктивность лесных экосистем. Компьютерная база данных. – М.: ИЛ РАН, ЦЭПЛ РАН. 1974.

[5]Ермолова, Л. С., Уткин, А. И. 1998. Удельная листовая поверхность основных лесобразующих пород России. Экология 3 178-183.

[6]Уткин, А. И., Ермолова, Л. С., Уткина, И. А. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование. – М. Наука - 2008. -292 с.

[7]Asner, G. P., Scurlock, J. M. O., Hicke, J. A. 2003. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. Global Ecology and Biogeography 12 191–205.

[8]Bonan, G. B., Levis, S., Kergoat, L., Oleson, K. W. 2002. Landscapes as patches of plant functional types: An integrating concept for climate and ecosystem models. Global Biogeochemical Cycles 16(2) 1-18.

- [9]Boussetta, S., Balsamo, G., Beljaars, A., Krala, T., Jarlan, L. 2013. Impact of a satellite-derived leaf area index monthly climatology in a global numerical weather prediction model. *International Journal of Remote Sensing* 34(9-10) 3520–3542.
- [10]Buermann, W., Wang, Y., Dong, J., Zhou, L., Zeng, X., Dickinson, R. E., Potter, C. S., Myneni, R. B. 2002. Analysis of a multiyear global vegetation leaf area index data set. *Journal of Geophysical Research* 107 D22 4646.
- [11]Chen, J. M., Mo, G., Pisek, J., Liu, J., Deng, F., Ishizawa, M., Chan, D. 2012. Effects of foliage clumping on the estimation of global terrestrial gross primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles* 26 GB1019.
- [12]Deng, F., Chen, J. M., Plummer, S., Chen, M., Pisek, J. 2006. Algorithm for global leaf area index retrieval using satellite Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44(8) 2219-2229.
- [13]Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., Roujean, J.-L., Jarlan, L., Los, S. O. 2006. Ability of the land surface model ISBA-A-gs to simulate leaf area index at the global scale: Comparison with satellites products. *Journal of Geophysical Research* 111 D18102 1-16.
- [14]Kergoat, L., Lafont, S., Douville, H., Berthelot, B., Dedieu, G., Planton, S., Royer, J.-F. 2002. Impact of doubled CO₂ on global-scale leaf area index and evapotranspiration: Conflicting stomatal conductance and LAI responses. *Journal of Geophysical Research* 107(D24).
- [15]Liu, Y., Liu, R., Chen, J. M. 2012. Retrospective retrieval of long-term consistent global leaf area index (1981–2011) from combined AVHRR and MODIS data. *Journal of Geophysical Research* 117(G04003).
- [16]Masson, V., Champeaux, J.-L., Chauvin, F., Meriguet, C., Lacaze, R. 2003. A global database of land surface parameters at 1–km resolution in meteorological and climate models. *Journal of Climate* 16 1261–1282.
- [17]Myneni, R. B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J. L., Glassy, J., Tian, Y., Wang, Y., Song, X., Zhang, Y., Smith, G. R., Lotsch, A., Friedl, M., Morisette, J. T., Votava, P., Nemani, R. R., Running, S. W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. NASA Publications. 2002. Paper 39.
- [18]NASA Earth Observations, <http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/Search.html?group=21>
- [19]Nikolov, N., Zeller, K. F. 2006. Efficient retrieval of vegetation leaf area index and canopy clumping factor from satellite data to support pollutant deposition assessments. *Environmental Pollution* 141 539-549.
- [20]Running, S. W., Baldocchi, D. D., Turner, D. P., Gower, S. T., Bakwin, P. S., Hibbard, K. A. 1999. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing and Environment* 70 108–127.
- [21]Zhu, Z., Bi, J., Pan, Y., Ganguly, S., Anav, A., Xu, L., Samanta, A., Piao, S., Nemani, R. R., Myneni, R. B. 2013. Global data sets of vegetation leaf area index (LAI)3g and fraction of photosynthetically active radiation (FPAR)3g derived from global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) normalized difference vegetation Index (NDVI3g) for the period 1981 to 2011. *Remote Sensing* 5(2) 927-948.

**Глава III/14: МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ СПЕЦИФИКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ
ПОЛОГА ПО ДАННЫМ LiDAR РАЗРЕШЕНИЯ 1 М И 1 КМ**
**Chapter III/14: Methods to Reveal Specific Features of Canopy Height Distributions Using LiDAR
Data of Resolutions 1 m and 1 km**

Петр А. Шарый*¹; Сергей И. Чумаченко²; Александр Ю. Агольцов²; Лариса С. Шарая³
DOI 10.25680/3298.2018.20.50.207

*Эл. Почта: p_shary@mail.ru

1. Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ул. Институтская д.2 142290 г. Пущино Московской области, Россия

2. Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, 141005 ул. 1-я Институтская д. 1г, г. Мытищи Московской области, Россия

3. Институт экологии Волжского бассейна РАН, ул. Комзина д.10, 445003 г. Тольятти Самарской области, Россия

РЕЗЮМЕ. Установлено, что по данным LiDAR высокого разрешения (1 м) для Ногинского лесного хозяйства Московской области распределение высот полога характеризуется тремя пиками. В то же время, подобное трехпиковое распределение характерно и для ряда лесных регионов России при разрешении 1 км, отражая, например, влияние на распределение полога средних высот холодных предгорных регионов окрестностей оз. Байкал. Использование этого явления в регрессионных моделях показывает, что оценки влияния особенностей распределения можно выразить с помощью двух индикаторных переменных, которые описывают многие характеристики растительности и позволяют находить тесные связи между изучаемым атрибутом леса и метриками LiDAR и характеристиками рельефа.

Abstract. We show that if high-resolution (1 m) LiDAR data for Noginsk forest stand in Moscow region are used, the distribution of canopy heights is characterized by three peaks. Meanwhile, similar three-modal distributions are characteristic also for a set of forested regions in Russia at spatial resolution of 1 km that reflect, for instance, the influence on the distribution of cold middle mountain slopes of the Baikal Lake surroundings. The use of this phenomenon in regression models demonstrate that this influence can be expressed by means of two dummy variables that describe numerous forest attributes and reveal close links between forest attribute of interest and LiDAR metrics and topographic attributes.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Лесные экосистемы, высота полога, LiDAR, рельеф, регрессия

Keywords: Forest ecosystems, canopy height, LiDAR, topography, regression

ВВЕДЕНИЕ

Данные дистанционного лазерного сканирования LiDAR (Light Detection And Ranging) вызывают в последние десятилетия возрастающий интерес [1], поскольку дают информацию о трехмерной структуре распределения высот лесного полога. В то же время, статистическое распределение ряда атрибутов полога оказывается необычным, и если оно существенно отклоняется от нормального, то это создает проблему нахождения связей между независимыми переменными, то есть метриками LiDAR, рельефом и наземно измеренными атрибутами леса. С помощью LiDAR находят объем промышленной древесины [2], пространственное распределение индекса площади листа [3], структуры нижних ярусов [4], подземной биомассы, некоторых свойств почв, доли мертвой древесины. Осуществляют также классификацию на виды или типы леса, изучают закономерности роста лесов; по данным разных лет оценивают изменение лесов. Съемка LiDAR обычно проводится на крупных масштабах с разрешением 1–5 м; глобальные измерения LiDAR со спутников пока ограничены разрешением 1 км [5].

При всем обилии исследований LiDAR, практически нет таких, которые анализируют статистические свойства распределения метрик LiDAR. В настоящей работе изучаются и сравниваются распределения этих метрик на крупном масштабе для участка «Ногинск» и для регионов России с разрешением 1 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для участка «Ногинск» размером 2 км ´ 6.5 км, расположенного на востоке Московской области, съемка LiDAR проводилась с вертолета (высота 600 м над землей) летом 2017 года с разрешением 14 точек/м². Участок подвергался антропогенному воздействию как при строительстве линии электропередачи, так и при заготовке древесины с вырубками в разных местах с последующим их восстановлением. Карта высот полого показана на Рис.1.

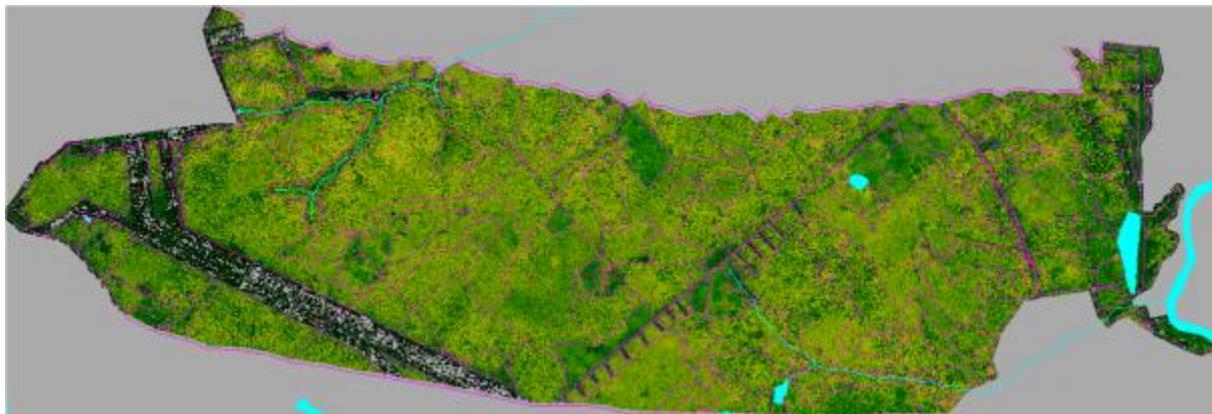


Рисунок 1. Карта высот полого по данным LiDAR. Чем светлее тона, тем выше полог.

Использовались 26 метрик LiDAR и 18 характеристик рельефа [6]. Для корректного определения этих метрик участки с максимальной высотой полого меньше 1 м исключались из рассмотрения. Для оценки тех значений метрик LiDAR, где происходит скачкообразное изменение их статистических свойств, в работе использовались кривые нормальной вероятности. Для этого использовали выборку 110 точек наблюдения, обозначенную ниже как A110. Нормальная вероятность есть величина, обратная кумулятивному стандартному нормальному распределению. Если ее откладывать по оси ординат, а по оси абсцисс откладывать упорядоченные по возрастанию значения изучаемой величины X , то при нормальном распределении X получаемая кривая нормальной вероятности должна быть прямой; отклонение ее от прямой дает информацию о характере отклонения X от нормального распределения, специфику которого легко интерпретировать по форме этой кривой [7].

Для сравнения результатов измерений в A110 с метриками LiDAR и рельефом мы использовали значения h высоты полого, полученные от предварительного анализа данных и существенно отклоняющиеся от метрик LiDAR. Использовалась множественная регрессия с h как зависимой переменной и метриками LiDAR и характеристиками рельефа – как независимыми переменными (предикторами). Скачкообразные изменения в распределении основных метрик LiDAR давали основания для введения индикаторных переменных и использования этих индикаторов как отвечающих за значительную часть пространственной изменчивости h .

Для больших регионов России использовались спутниковые данные разрешения 1 км. Эти данные [5] доступны на сайте <https://landscape.jpl.nasa.gov/>. В них отсутствуют метрики LiDAR; они представлены лишь одной величиной – высотой полого.

Свойства некоторых из метрик LiDAR таковы. Медианное значение Med мало чувствительно к выбросам в высоте полого, по сравнению со средней высотой полого Mean, Рис.2.

Отсюда виден трехгорбый характер распределения Med. Видимый в Med средний пик при 8.9 м в Mean сливается с правым. Однако это слияние не означает отсутствия среднего пика в данных. Например, другие метрики LiDAR демонстрируют более высокий средний пик, Рис.3.

Информацию о критических значениях высоты полого дают также изломы на кривой нормальной вероятности выборки A110, Рис.4.

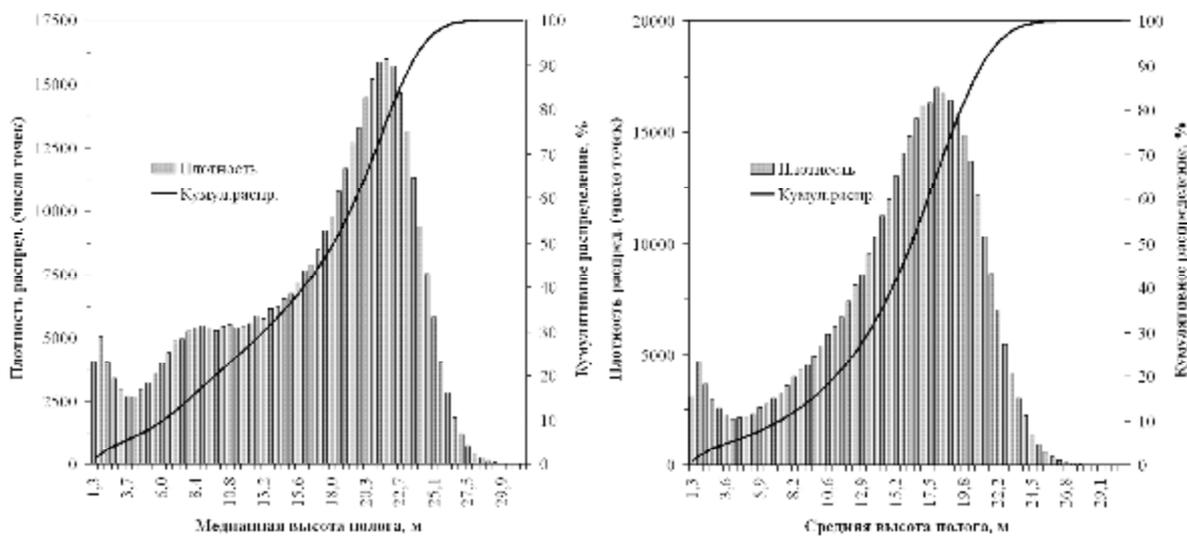


Рисунок 2. Гистограммы плотности распределения медианных значений высоты полога Med и график кумулятивной частоты Med (слева), а также средних значений высоты полога Mean и график кумулятивной частоты Mean (справа). Участок «Ногинск».

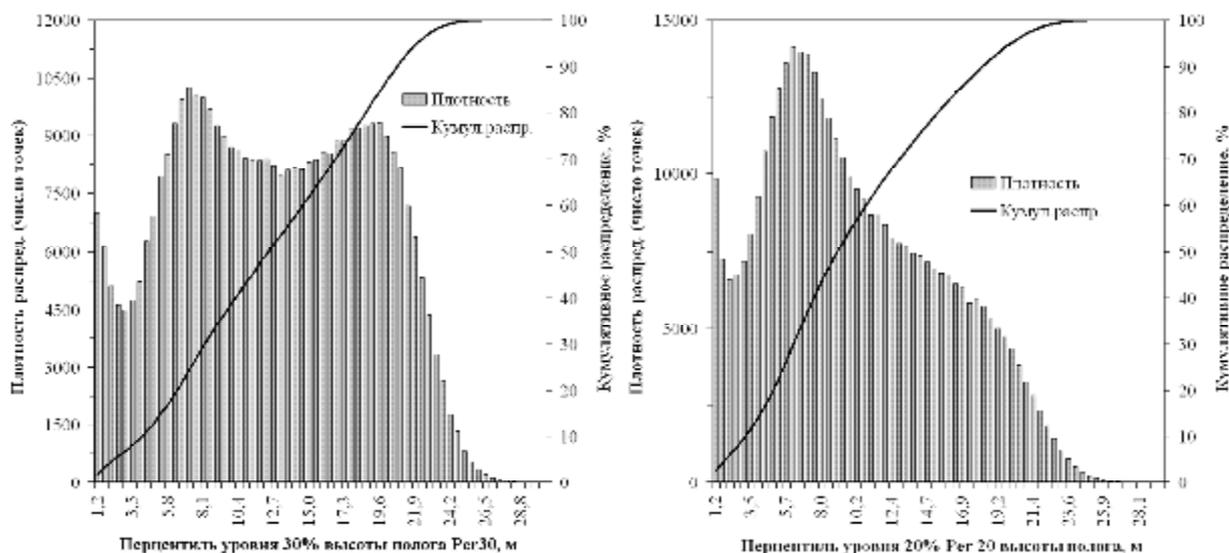


Рисунок 3. Гистограммы плотности распределения значений перцентиль уровня 30% Per30 высоты полога и график кумулятивной частоты Per30 (слева), а также значений перцентиль уровня 20% Per20 и график кумулятивной частоты Per20 (справа). Участок «Ногинск».

Для учета в моделях трехгорбого распределения введем индикаторные переменные, Табл.1.

Таблица 1. Выбор двух индикаторов для описания трех пиков высоты полога.

Индикаторы		Ситуация
SMALL	LARGE	
1	1	Средний полог (между 4 и 20 м)
2	1	Низкий полог (меньше 4 м)
1	2	Высокий полог (больше 20 м)

По таблице, SMALL = 2 описывает пик при низких высотах полога, LARGE = 2 при высоких, а SMALL = LARGE = 1 – при средних (полог не является ни низким, ни высоким). При использовании индикатора LARGE, рельефа и метрик LiDAR уравнение регрессии есть

$$h_{A110} = 0.1577 \times LARGE \times F(35^\circ, 90^\circ) + 0.4765 \times Per99 - 7.754 \times CV + 0.1013 \times LARGE \times Inter - 5.518; \\ R^2 = 0.893, P < 10^{-6}. \quad (1)$$

Эта модель объясняет 89% дисперсии h . Здесь метрики LiDAR есть $Per99$ (перцентиль уровня 99%), CV (коэффициент вариации) и $Inter$ (интерквартильный размах), $F(35^\circ, 90^\circ)$ есть освещенность склонов с востока. Модель выделяет три пика, Рис.5.

Связь h со $SMALL$, $LARGE$ и рельефом без учета метрик LiDAR описывается уравнением

$$h_{A110} = 0.1487 \times LARGE \times F(35^\circ, 260^\circ) - 0.2065 \times SMALL \times F(35^\circ, 210^\circ) + 0.001599 \times SMALL \times X - 0.001420 \times LARGE \times (X+Y)/2^{1/2} + 19.54; R^2 = 0.626, P < 10^{-6}. \quad (2)$$

Эта модель объясняет 63% дисперсии h при использовании *только рельефа и индикаторов*; $F(35^\circ, 260^\circ$ и $210^\circ)$ есть освещенность склонов с юго-запада, X – расстояние на север, $(X+Y)/2^{1/2}$ – расстояние на северо-восток.

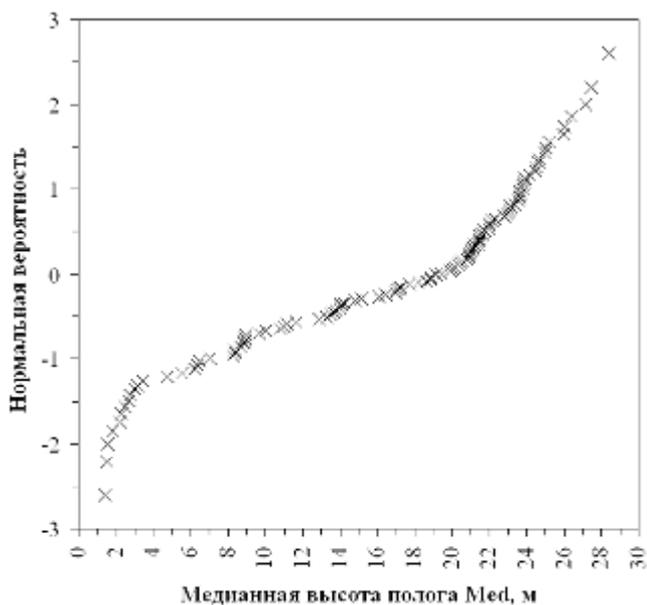


Рисунок 4. График нормальной вероятности для медианных значений высоты полога Med в выборке A110. Участок «Ногинск».

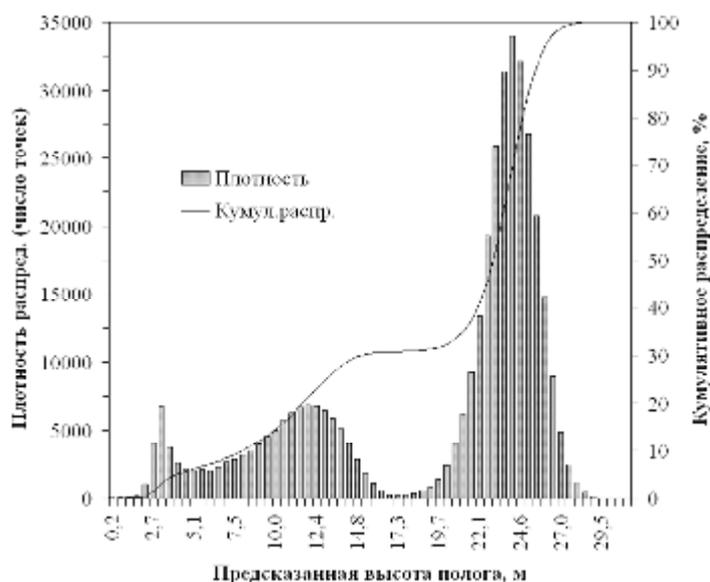


Рисунок 5. Гистограмма плотности распределения предсказанных моделью (1) значений высоты полога h и график кумулятивной частоты h для всей матрицы. Участок «Ногинск».

При рассмотрении LiDAR высот полога разрешения 1 км [5] для всей России можно видеть близкое к трехгорбому распределение. Причина здесь естественная, а не антропогенное воздействие. Действительно, левый пик в распределении высот полога для всей России обусловлен отсутствием лесов на севере в тундре и на юге в степной зоне, а средний, 14.2 м, и правый, 19.0 м – бореальными лесами и лесами умеренной зоны и предгорных областей. Левый пик от среднего разделяет хорошо выраженный минимум плотности распределения при высоте полога 4.5 м. Карта высот полога окрестностей оз. Байкал показана на Рис.6.

Распределение высот полого для этой местности также трехгорбое: средний пик (7.3 м) характеризует невысокие части горных склонов, занимающих здесь значительную долю площади, правый пик начинается около 20 м, как и в Табл.1.



Рисунок 6. Карта высоты полого для окрестностей оз. Байкал. Чем светлее тона, тем выше полог.

Приведенные выше трехпиковые гистограммы распределения высот полого на основе как измеренных данных, так и моделирования оценивают участок «Ногинск» в целом как участок с существенной антропогенной нагрузкой, для которого характерны три пика в графиках плотности распределения ряда параметров леса. Из-за этой трехпиковой структуры распределения высот полого при моделировании характеристик лесной растительности имеет смысл использование двух индикаторов. Это позволяет упростить моделирование различных характеристик лесной растительности путем замены многих метрик LiDAR двумя индикаторами, Табл.1.

В целом, наличие трех пиков в гистограмме распределения соответствующей метрики LiDAR, такой как Med или Per30 довольно типично как при детальной лазерной съемке высокого разрешения, так и при глобальной. Причины этого различны, и для некоторых регионов могут встречаться отклонения. Тем не менее, *двугорбое или трехгорбое распределение высот полого является определенным правилом*. В этом смысле правилом является и полезность использования предложенных в Табл.1 индикаторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Статистические распределения метрик LiDAR обычно являются трехгорбыми, характеризующими явления, типичные на крупных и мелких масштабах.
2. Учет этих особенностей с помощью индикаторных переменных позволяет находить более тесные связи с факторами окружающей среды.
3. У метода есть потенциал оценки характеристик лесов для различных масштабов.

4. Целесообразно использовать LiDAR в комбинации с локальными особенностями рельефа и распределения высоты полого.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Lim K., Treitz P., Wulder M., St-Onge B., Flood M., 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* 27(1): 88-106.
- [2]Maclean G.A., Krabill W.B., 1986. Gross-merchantable timber volume estimation using an air-borne LiDAR system. *Canadian Journal of Remote Sensing* 12(1): 7-18.
- [3]Hosoi F., Nakai Y., Omasa K., 2010. Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-D airborne and ground-based scanning lidar remote-sensing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48: 2215-2223.
- [4]Mund J.-P., Wilke R., Körner M., Schultz A., 2015. Detecting multi-layered forest stands using high density airborne LiDAR data. *Journal for Geographic Information Science* 1: 178-188.
- [5]Simard M., Pinto N., Fisher J.B., Baccini A., 2011. Mapping forest canopy height globally with space-borne lidar. *Journal of Geophysical Research* 116: G04021.
- [6]Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V., 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma* 107: 1-32.
- [7]Montgomery D.C., Peck E.A., 1982. *Introduction to Linear Regression Analysis*. New York: John Wiley & Sons. 504 p.

Глава III/15: КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ ПОДХОД В ЛАНДШАФТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРИ КАРТОГРАФИРОВАНИИ ЛЕСОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЯ **Chapter III/15: Quantitative Approach for Forest Mapping in Landscape Studies on the Base of Remote Sensing Data**

Владимир Н. Жердев, Денис А. Баранович, Наталья В. Полякова*

DOI 10.25680/5195.2018.40.49.208

*Эл. Почта: eco317@bk.ru

Воронежский государственный педагогический университет, Факультет естественно-географический, ул. Ленина, д. 86, 394000, Воронеж, Россия

РЕЗЮМЕ. Для своевременного выявления и прогнозирования процессов, оказывающих негативное влияние на геоэкологическое состояние качества лесного фонда, Федеральное агентство лесного хозяйства с 2005 года организует работы по непрерывному контролю ситуаций в области состояния и изменения лесного фонда Российской Федерации, которая обладает четвертью всех лесов мира. Осуществлять тщательный контроль и мониторинг таксационных или контурно- ландшафтных изменений в составе лесного фонда на сегодняшний момент без использования современных методов и последних достижений в области дистанционного зондирования Земли практически невозможно. Данные дистанционного зондирования Земли являются носителем зарегистрированной информации о качественном состоянии земель лесного фонда. Картографирование лесов связано с получением и обработкой большого массива данных ввиду наличия обширных площадей и необходимости их качественной характеристикой. Для этих целей широко используется дистанционное зондирование земли, позволяющее автоматизировать процесс съемки и постобработки данных. Съемка может осуществляться в различных диапазонах спектра в зависимости от исходных условий измерений и требуемых результатов, что непосредственно влияет и на камеральную обработку полученных материалов. В статье рассматриваются некоторые особенности методического подхода к интерпретированию данных аэро- и космических методов ландшафтного исследования земель лесного фонда для последующего их тематического картографирования. В настоящее время принцип количественного ландшафтного подхода является самым перспективным, развитие которого обеспечит повышение эффективности для целей и задач тематического картографирования, и находит широкое применение в прикладном картографировании для изучения мировых лесных ресурсов.

Abstract. To reveal and predict processes having negative impact on the geo-ecological state of forest land quality, the Federal Agency of Forestry organized work on continuous control of the state of forest land in Russia since 2005. The Russian Federation possesses one quarter of all forests of the world. Nowadays it is practically impossible to control and monitor taxation and contour-landscapes changes in the composition of forest lands without using up-to-date methods and latest achievements in remote sensing of the Earth. The data of remote sensing are the carrier for registered information of the qualitative state of forests. Forest mapping is connected with great data arrays due to vast areas and necessity for their qualitative characteristics. For such purposes the remote sensing is widely used which allows automating the process of survey and data processing. The survey may be done in different spectrum bands depending on original conditions for measuring and required results, which have a direct influence on processing of obtained data material. The article considers some specifics of a landscapes methodical approach for interpreting the data of aero- and cosmic techniques for studying forest lands for further thematic mapping. At the present time the principle of quantitative landscape approach is considered as the most promising. The development of this principle will provide the increasing of efficiency for aims and objectives of thematic mapping and find a wide use in applied mapping for studying of world forest resources.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционный метод исследования ландшафтов, космический снимок, тематическое дешифрирование, количественный подход.

Keywords: remote sensing of the landscapes, space image, thematic decoding, quantitative approach.

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционные методы ведения съемки земной поверхности можно разделить на два вида: аэро-методы и космические методы. К аэрометодам относятся все виды съемок или наблюдений, производящихся из атмосферы. К космическим методам относят виды съемок поверхности Земли, выполненных с космических летательных аппаратов [7]. До середины второй половины прошлого века распространенным видом исходной информации для ведения лесоустроительных и лесоинвентаризационных работ по составлению тематических карт была крупномасштабная аэрофото-съемка, производившаяся с борта самолета.

По полученным контактными отпечаткам составлялись фотосхемы, фотопланы, топографические планы и карты, которые использовались как для таксации лесов, так и при наземных съемочных работах с целью сокращения объема работ при одновременном повышении их качества. С началом массовых производственных аэрофотосъемочных работ возникли новые методы определения таксационных и дешифровочных показателей насаждений по аэрофотосъемочному материалу. Это дало развитие новому прикладному направлению в науке, получившему название лесотаксационного дешифрирования [8]. Лесное дешифрирование можно разделить на два вида: контурное, таксационное.

ЦЕЛЬ МЕТОДА

Одной из важных задач лесоинвентаризации и лесоустройства является разделение лесного фонда на однородные ландшафтные в таксационном отношении участки. Поэтому внедрение в производственный процесс лесоинвентаризации и лесоустройства цветных спектрально-зональных аэрофотоснимков позволило в значительной степени повысить точность установления контуров выделов. Считается, что аэрофотоснимок является носителем зарегистрированной информации очень большой емкости, обладающей измерительными свойствами, а основной вопрос всегда заключался в проблеме подхода к действенным методам извлечения информации и последующей верной ее интерпретации. Аэрофотоснимок стал рассматриваться как техническая основа любых лесоинвентаризационных и лесоустроительных работ. Первоначально процесс чтения информации на изображении назывался толкованием, но позднее прочно вошел в практику аэрофотосъемки и получил широкое распространение такой термин, как дешифрирование. Лесотаксационное дешифрирование является одним из наиболее сложных отраслевых видов дешифрирования аэрофотоснимков, включающего в себя элементы как общетопографического, так и лесохозяйственного и инженерного дешифрирования.

ПРИНЦИП И ПРОЦЕДУРА

В настоящее время лесной фонд Российской Федерации изучен недостаточно и площадь, описанная методом наземной таксации в сочетании с камеральным дешифрированием аэрофотоснимков

и организацией территории в натуре, составляет чуть более 64 % от общей площади лесных земель лесного фонда, покрытой лесами (Табл.1.)

Таблица 1- Изученность лесов Российской Федерации по данным на 1 января 2016 года.

Федеральные округа	Общая изученность, тыс. га	Лесоустройство, тыс.га	По срокам давности, тыс. га				Методом камерального дешифрирования	Лесинвентаризация (аэрометоды)	Неустроенные леса
			До 10 лет	11-15 лет	16-20 лет	21 год и более			
Центральный	22496	22496	14912	6640	698	246	0	0	0
Северо-Западный	107771	88674	40246	26982	18286	3160	19095	2	435
Южный	4472	4472	1666	2499	0	307	0	0	0
Приволжский	39189	39189	18241	13853	7060	35	0	0	165
Уральский	111715	54498	24738	26002	3499	259	57216	0	0
Сибирский	355377	152168	47526	21258	40171	43212	72933	130277	675
Дальневосточный	495800	133205	24753	21642	27529	59281	154368	208227	0
Россия	1136821	494703	172083	118877	97243	106499	303612	338506	1274
Процент	96	42	14	10	8	9	26	29	0,1

Российская Федерация обладает пятой частью всех лесов мира, поэтому осуществлять тщательный контроль и мониторинг таксационных или контурных изменений в составе лесного фонда на сегодняшний момент без использования современных методов и последних достижений в области дистанционного зондирования Земли практически невозможно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При выборе космического средства получения информации и соответствующего метода ее считывания, обработки и интерпретации решается основная практическая задача - получение максимально качественных, достоверных и современных данных дистанционного зондирования Земли. Подбирается существенно короткий интервал времени при значительно минимальной и менее трудоемкой затрате объема камеральных исполнительских работ для обработки и обсчета основного массива информации.

К основным характеристикам получаемого космического снимка относятся: величина пространственно-ландшафтного разрешения; временного разрешения; спектрального разрешения; радиометрического разрешения.

Вся информация, представленная на космическом снимке в виде пространственных данных, может быть подвергнута тематической обработке и представлена в виде системы, позволяющей производить сбор, анализ, хранение и визуализацию данных пространственно- распределенного исследуемого объекта лесного фонда.

Основная цель дешифрирования космического снимка - извлечение из него максимальной информации для последующего тематического интерпретирования. Для выполнения качественных работ и максимально приближенных к реальным результатам при лесотаксационном дешифрировании используют космические снимки высокого разрешения. В настоящее время сверхвысокое пространственное разрешение в панхроматическом режиме, получаемое с борта коммерческого искусственного спутника Земли GeoEye-1 (США), соответствует 0,41 м в пикселе [2].

В силу того факта, что данные зондирования Земли представляют собой огромный массив необработанных данных цифрового характера, перед тематическим дешифрированием космических снимков открылись новые возможности получения информации с использованием методов автоматизированной классификации космического снимка. Под классификацией понимается процесс присваивания объекту растрового цифрового изображения одного из классов из заранее утвержденных и определившихся тематических классов. В основе процесса классификации лежит теория распознавания образов, основанная на извлечении и анализе статистических данных по яркостным, спектральным, текстурным и геометрическим свойствам изображенных объектов, формирующая виртуальное пространство признаков, которые разделяются на определенные замкнутые полигональные области и соотносятся с уже определенными и существующими базовыми

классами или группами. Результатом процесса классификации является последующая сегментация космического снимка, которая формирует новое цифровое изображение в виде карты пространственного распределения участков лесного фонда. В связи, с чем подбирается классификатор анализируемых классов. Как правило, при классификации космического снимка в целях лесоустроительных или лесоучетных инвентаризационных работ тематическими классами выступают ландшафты лесных земель, имеющие насаждения с преобладанием различных древесных пород, групп возраста, классов бонитета, полноты и запаса. В результате обработки цифрового космического снимка с использованием определенной методической классификации дешифровщик в камеральных условиях с применением ГИС-технологии получает тематические карты категорий ландшафтов лесных земель как покрытых лесом, так и непокрытых лесом.

Наиболее высокую оценку можно дать концептуальной разработке методики проведения камерального дешифрирования космического снимка для целей тематического картографирования, разработанной зарубежными учеными Шерли М. Дэйвисом и Джоном С. Линденбаумом во второй половине 20 века [2]. Они дали концепцию и логическое обоснование своему комплексному направлению в дистанционном зондировании Земли. В основе их теоретического исследования лежит количественный подход к оценке анализа изменений структуры исследуемого участка земной поверхности, учитывающий все влияющие на него задействованные факторы - от электромагнитного излучения и техники измерений до сбора аналоговых и цифровых данных системами датчиков, установленных на борту космических спутников. Под количественным подходом подразумевается направление в камеральном дешифрировании, формирующее основное внимание не на изобразительный аспект космического снимка и метод анализа, основанный на процессе образования изображения, а на число и количественную природу данных. Этот подход развивается благодаря появлению цифрового способа формирования космического изображения и быстрому прогрессу в области развития аппаратного, программного и информационного обеспечения.

Эти исследователи провели камеральные работы по картографированию лесов горной местности Сан-Хуан (она расположена в юго-западной части штата Колорадо США) с использованием широкого спектрального диапазона многоспектральных сканированных данных, собранных космическим спутником Скайлэб (Skylab) 5 июня 1973 года [3]. По этому вопросу так же был накоплен значительный опыт в исследованиях русских ученых [1,3,4,5,6,7,8,9].

В качестве справочных данных для проведения обучения классификации использовались инфракрасные каналы космического снимка и подробные данные об исследуемом лесном районе, собранные при натурном подготовительном обследовании лесов исследуемой территории. Разработанная методика является подходящей для анализа спектрально сложных исследуемых областей и основывается на комплексном методе анализа, как контролируемого подхода, так и неконтролируемого. Для более эффективного взаимодействия с данными разработанный метод основан на пошаговых этапах и получил название «метод модифицированного кластерного анализа».

ВЫВОДЫ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДА

Метод включает: локализацию и определение предполагаемых обучающих областей в виде блоков данных, рассредоточенных по всему исследуемому участку; проведение кластерного анализа каждой предполагаемой обучающей области с сопоставлением справочных данных на корреляцию спектральных классов с исследуемыми информационными классами; объединение результатов кластерного анализа всех обучающих областей для получения единого множества обучающих статистик; классификацию обучающих областей с применением статистик и классификатора для предварительной проверки правдоподобности и адекватности обучающих статистик при сравнении данных со справочными данными для выявления ошибок; классификацию всей исследуемой области изучаемого ландшафтного природного комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При правильном использовании меры раздельности, которая была подвергнута преобразованной дивергенции, позволившей объединить спектрально одинаковые классы и, таким образом, уменьшить их число до минимума, а так же при использовании справочных данных число кластерных спектральных классов сводится к минимуму и позволяет получить доступную классификацию.
2. При качественной и количественной оценке результатов всей области карта классификации подверглась сравнению с картой лесного покрытия, выполненной мануальным способом. Таким образом, было выявлено, что при относительно больших исследуемых лесных районах

точных областей типов лесного покрытия можно достигнуть путем полуавтоматизированной обработки и компьютерного анализа многоспектрального космического снимка.

3. Полученные посредством примененного количественного подхода данные, представленные новыми основными цифровыми типами лесной классификации в виде вырубок, болот, пастбищ, водных объектов, покрытых лесом земель с преобладающими породами или территорий распределения насаждений по классам состояния, можно интерпретировать как цифровые тематические лесные карты.
4. Количественный подход в настоящее время является самым эффективным и перспективным для целей и задач тематического картографирования и широко применяется в прикладном картографировании для изучения мировых лесных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Виноградов, Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем/ Б.В.Виноградов. М.: Наука, 1984.-320 с.
- [2]Дейвис, Ш. М. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ш. М. Дейвис. - М.: Изд-во «Недра», 1983. -415 с.
- [3]Жердев, В.Н. Космический мониторинг лесных ресурсов как одно из ведущих направлений выявления и прогнозирования негативных геоэкологических факторов / В.Н. Жердев, Д.А. Баранович, В.Д. Постолов, И.В. Гусева// Вестник Воронежского аграрного университета, №1 (28). 2011.- С. 240-242.
- [4]Жердев, В.Н. Методический подход к обеспечению геоинформационного экологического картографирования на основе данных ДЗЗ на примерах таежной зоны/ В.Н. Жердев, Д.А. Баранович, В.Д. Постолов // Вестник Воронежского аграрного университета, №4 (31). 2011.- С. 128-132.
- [5]Жердев, В.Н. Организация дистанционного мониторинга лесов (на примере Архангельской области)/ В.Н. Жердев, Д.А. Баранович, В.Д. Постолов // Вестник Воронежского аграрного университета, №2 (33). 2012.- С. 292-294.
- [6]Полякова Н.В. Методические вопросы анализа ресурсного потенциала естественных дубрав Черноземья/ Н.В.Полякова, В.Н. Жердев//Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). ВГАУ, - Воронеж, 2016.-№3.- С. 87-92
- [7]Сухих, В. И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве / В. И. Сухих. - Йошкар-Ола: Изд-во «МарГТУ», 2005. - 392 с.
- [8]Сухих, В. И. Основные направления совершенствования методологии инвентаризации лесов на основе дешифрирования материалов аэрокосмических съемок / В. И. Сухих, М. Д. Гиряев, Е. М. Атаманкин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2007. - Вып. 4. - Т. 2. - С. 332-339.
- [9]Черепанов, А.С. Технология выявления медленных изменений в лесах по мультиспектральным космическим снимкам (на примере вымокания лесов)/ А.С. Черепанов // Геоматика.- 2009. №3. С. 66-75.

Глава III/16: МОНИТОРИНГ ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ, ВКЛЮЧЕННЫХ В КРАСНЫЙ СПИСОК МСОП, В ПРИМОРСКОМ КРАЕ
Chapter III/16: Monitoring Tree Species of the IUCN Red List in the Primorsky Region

Галина А. Гладкова*; Лидия А. Сибирина; Юрий И. Манько

DOI 10.25680/5724.2018.15.75.209

*Эл. Почта: Gladkova@biosoil.ru

Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии» Дальневосточного отделения Российской академии наук, проспект 100-летия Владивостока, 159, 690022 Владивосток, Россия

РЕЗЮМЕ. Леса в Приморском крае, занимающие более 70 % площади, имеют большое хозяйственное значение и выполняют выдающуюся экологическую роль. Разнообразие ландшафтов в переходной зоне от континента к океану обуславливает высокое биоразнообразие, проявляющееся на всех уровнях. К настоящему времени основные площади лесов Приморья вовлечены в хозяйственное использование, направленное в основном на получение древесины. Высокая степень пожарной опасности и промышленные рубки привели к сокращению площади лесных ландшафтов и явились причиной включения 20 древесных видов в Красный список (the IUCN Red List). Мониторинг динамики и состояния лесных формаций, проводимых на основе лесоучастительных материалов и данных, полученных на постоянных пробных площадях, показал, что за последние годы произошло снижение площадей под наиболее ценными и продуктивными лесными формациями, в состав которых входят *Pinus koraiensis*, *Picea jezoensis*, *Picea koraiensis*, *Abies holophylla* и другие породы. Основную роль в сохранении ценных древесных видов играют особо охраняемые природные территории (ООПТ), которые занимают в Приморье около 16 %.

Abstract. Forests in the Primorsky region, occupying more than 70% of the area, are of great economic importance and fulfill an outstanding ecological role. The diversity of landscapes in the transition zone from continent to the ocean is responsible for high biodiversity at all levels. By now, the main areas of Primorye forests are involved in economic use, mainly aimed at wood obtaining. A high degree of fire danger and industrial felling led to a reduction in the area of forest landscapes and led to the inclusion of 20 tree species in the IUCN Red List. Monitoring of the dynamics and condition of forest formations have been conducted based on forest management material and permanent data from sample plots. In recent years, there has been a decline in areas under the most valuable and productive forest formations, which include *Pinus koraiensis*, *Picea jezoensis*, *Picea koraiensis*, *Abies holophylla* and other species. The main role in the conservation of valuable tree species play specially protected natural areas, which occupy about 16% in the Primorye region.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ландшафт, древесные виды, лесные формации, Красный список МСОП
Keywords: landscape, tree species, forest formations, IUCN Red List

ВВЕДЕНИЕ

Приморский край расположен на юго-восточной окраине российского Дальнего Востока – в зоне перехода от материка к Тихому океану. Леса в Приморском крае, занимающие более 70 % площади, имеют большое хозяйственное значение и выполняют выдающуюся экологическую роль. Их состояние и динамика определяют устойчивость природных экосистем и биологическое разнообразие на всех уровнях организации растительного покрова. По разнообразию лесообразующих пород и лесных сообществ, богатству и видовому составу флоры и фауны дальневосточные леса уникальны. За последние 30–40 лет леса подверглись широкомасштабным природным и антропогенным воздействиям, которые нередко тесно связаны между собой (засухи, наводнения, усыхание лесов, вспышки насекомых-вредителей, промышленные рубки, неоднократные пожары, загрязнение окружающей среды). К настоящему времени основные площади лесов Приморья вовлечены в хозяйственное использование, направленное в основном на получение древесины. По этой причине 20 древесных видов были включены в Красный список (the IUCN Red List) Международного союза охраны природы (МСОП – IUCN) [1] и 8 в Красную книгу Российской Федерации [2].

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Главной целью лесного мониторинга является получение информации об изменениях, происходящих в лесном покрове вследствие антропогенных и естественных нарушений. В задачи исследований входило выявление тенденций в динамике основных лесообразующих пород.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Территория Приморского края занята преимущественно средневысотными горами, среди которых основная площадь приходится на горную страну Сихотэ-Алинь. На территории Приморского края, выделяют 3 экорегиона: Восточноманчжурский горный, Уссурийско-Ханкайский равнинный и Сихотэалинский горный [3]. Им свойственны следующие ландшафты: горно-тундровые, занимающие площадь около 600 км²; горно-таежные – 29 700 км²; горнолесные – 64 800 км²; лесные, лесостепные и степные – 69 100 км², долинные – 600 км² [4].

По схеме ботанико-географической зональности Дальнего Востока Б.П. Колесникова [5], на территории Приморского края представлена растительность, относящаяся к трем зонам: хвойных (таежных) лесов, смешанных хвойно-широколиственных лесов и лесостепной.

Зона хвойных (таежных) лесов на территории края представлена, прежде всего, темнохвойными лесами из *Picea jezoensis* Carst. и *Abies nephrolepis* Maxim., а также лесами из нескольких видов *Larix*, значительно уступающим темнохвойным лесам по площади.

Основными лесообразующими породами в зоне смешанных хвойно-широколиственных лесов являются *Pinus koraiensis* Siebold & Zucc., *Quercus mongolica* Fisch. ex Turcz., *Tilia amurensis* Rupr., *T. mandshurica* Rupr. & Maxim., *Betula costata* Trautv. и многие другие виды, участие которых в составе древостоев определяются зональными и высотными факторами.

В долинах рек распространены леса из *Fraxinus mandshurica* Rupr. и *Ulmus japonica* Siebold. В самой южной части края произрастают смешанные многовидовые леса с участием *Abies holophylla* Maxim.

Естественная растительность лесостепной зоны, которая находится на юго-западе Приморья, к настоящему времени изменена в результате хозяйственной деятельности, связанной, прежде всего, с земледелием. В пределах зоны имеются фрагменты вторичных лесов с господством *Quercus mongolica* и участием *Betula davurica* Pall., *Populus tremula* L. и других видов, а также кустарников *Corylus* и *Lespedeza*; рассеянно встречаются отдельные местонахождения *Pinus densiflora* Siebold & Zucc.

Границы между основными ботанико-географическими зонами на территории края имеют не широтное простирание, а почти меридиональное. Это связано как с географическим положением, так и с особенностями строения поверхности – горным рельефом, обуславливающим высотную дифференциацию природных условий, а также с влиянием моря. Зональность растительного покрова осложнена, прежде всего, высотной поясностью, в результате чего типичные для таежной зоны группировки растительности по горным хребтам глубоко внедряются в зону смешанных хвойно-широколиственных лесов.

В основу лесного мониторинга на региональном уровне положены материалы лесоустроительных работ, которые ведутся на территории края с 1898 года. Помимо этого, проводятся наблюдения за состоянием лесов на постоянных пробных площадях, заложенных в заповедниках и национальных парках, территория которых не подвергалась или подвергалась незначительно деятельности человека, а также в районах с широкомасштабным природным и антропогенным воздействием. При закладке пробных площадей использовались основополагающие методики, позволяющие получить характеристику всех компонентов растительного сообщества (древостой, подлесок, кустарничково-травяной ярус, подрост).

Латинские названия растений приводятся по сводке «Сосудистые растения советского Дальнего Востока» [6], а написание авторов видов дается по IPNI (The International Plant Names Index) [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно материалам лесоустройства Государственного лесного фонда, на территории Приморского края выделено 18 основных лесных формаций (Таблица 1) и 5 субформаций (елово-каменноберезовые, кедрово-еловые, лиственнично-еловые, чернопихтово-кедровые и лиственнично-кедровые леса). Наибольшую долю от общей площади занимают пихтово-еловые леса – 22,5 %, широколиственно-кедровые – 22,2 %, дубовые – 13,8 %, лиственничные – 11,7 %, кедрово-еловые

– 10,1 % и белоберезовые – 5,7 %. Доля каждой из остальных формаций и субформаций составляет менее 1,5 % [8].

В Красный список МСОП входит 20 древесных видов: 13 видов лесообразователей отнесено к категории – вызывающие наименьшее опасение (LC), 1 вид – *Chosenia arbutifolia* – уязвимый (VU), 2 вида находятся в состоянии близком к угрожаемому (NT) – *Abies holophylla* и *Larix gmelinii* subsp. *olgensis*. Такие виды как *Carpinus cordata*, *Juniperus rigida*, *Maackia amurensis*, *Taxus cuspidata*, включенные в Красный список, самостоятельных формаций не образуют и относятся к категории LC (Таблица 1). Из вышеприведенного Красного списка действительно редкими и малочисленными являются следующие виды: *Pinus densiflora*, *Juniperus rigida*, *Taxus cuspidata*, *Larix gmelinii* subsp. *olgensis* и *Quercus dentata*, которые включены в Красную книгу Российской Федерации [2], а также *Abies holophylla* и *Alnus japonica*. Заготовка всех вышеперечисленных видов за исключением *A. japonica* запрещена.

Таблица 1 – Основные лесные формации и категория охраны их основных лесообразователей

Формация	Преобладающая порода	Красный список МСОП, категория
Заросли кедрового стланика	<i>Pinus pumila</i> (Pall.) Regel	LC
Каменноберезовые леса	<i>Betula. ermani</i> var. <i>lanata</i> Regel = <i>B. lanata</i>	LC
Пихтово-еловые леса	<i>Picea jezoensis</i> = <i>Picea ajanensis</i>	LC
	<i>Picea koraiensis</i> Nakai	LC
	<i>Abies nephrolepis</i>	LC
Широколиственно-кедровые леса	<i>Pinus koraiensis</i>	LC
Лиственничные леса	<i>Larix gmelinii</i> (Rupr.) Kuzen.	LC
	<i>L. gmelinii</i> (Rupr.) Kuzen. subsp. <i>olgensis</i> (Henry) A.E. Murr.	NT
Чернопихтовые леса	<i>Abies holophylla</i>	NT
Дубовые леса	<i>Quercus mongolica</i>	–
	<i>Quercus dentata</i> Thunb.	LC
Липовые леса	<i>Tilia amurensis</i> , <i>T. mandshurica</i> , <i>T. taquetii</i> C.K. Schneid.	–
Белоберезовые леса	<i>Betula platyphylla</i> Sukaczew	–
Желтоберезовые леса	<i>Betula costata</i>	LC
Черноберезовые леса	<i>Betula davurica</i>	LC
Ивовые леса	<i>Salix</i> spp.	–
Чозениевые леса	<i>Chosenia arbutifolia</i> (Pall.) A. Skvorts.	VU
Топольевые леса	<i>Populus koreana</i> Rehd., <i>P. maximowiczii</i> Henry	–
Ясенево-ильмовые леса	<i>Fraxinus mandshurica</i>	–
	<i>Ulmus japonica</i>	–
Осиновые леса	<i>Populus tremula</i>	–
Ольховые леса	<i>Alnus hirsuta</i> Turcz.	LC
	<i>Alnus japonica</i> (Thunb.) Steud.	LC
Сосновые леса	<i>Pinus densiflora</i>	LC
Породы, не образующие самостоятельных формаций	<i>Carpinus cordata</i> Blume	LC
	<i>Juniperus rigida</i> Siebold & Zucc.	LC
	<i>Maackia amurensis</i> Rupr.	LC
	<i>Taxus cuspidata</i> Siebold & Zucc.	LC

В конце XX начале XXI века площади под ценными породами из-за рубок и пожаров стремительно сокращались (Таблица 2). Хозяйственное освоение территории края привело к обеднению по-

пуляционно-генетической структуры в первую очередь коммерческих видов (*Pinus koraiensis*, *Picea jezoensis*, *Picea koraiensis*, *Abies holophylla*, и др.) [9].

Реальная угроза окончательного истощения широколиственно-кедровых лесов привела к запрещению рубок *Pinus koraiensis* сначала в 1990 году (но в перестроечные годы *P. koraiensis* рубился под любыми предлогами), а затем в 2011 году. Однако восстановление наиболее продуктивной и ценной широколиственно-кедровой формации во многих случаях затруднено, так как площади, на которых некогда произрастали кедровники, заняты разнообразными производными древостоями – чаще всего вторичными более пожароустойчивыми дубняками, площади под которыми значительно увеличились (Таблица 2).

Снижение численности и площади под древесными видами может происходить по естественным причинам. Так мониторинг усыхания пихтово-еловых лесов на Нахтахинском базальтовом горном плато позволил сделать вывод, что деградация или гибель огромных лесных массивов происходит на фоне нестабильности погодно-климатической обстановки в зоне перехода от суши к океану [10]. Долговременный мониторинг девственных лесов в заповеднике «Уссурийский» показал, что наиболее ценные древесные виды *Pinus koraiensis* и *Abies holophylla* снижают свое участие в древостоях и без антропогенного влияния. Этому способствует наличие в древостоях видов с разной продолжительностью жизни, высокий возраст основных лесообразователей, конкуренция, ослабление семеношения пород, находящихся вблизи северных пределов своего распространения, и другие причины [11, 12].

Таблица 2 – Распределение площади лесов по преобладающим породам по годам

Преобладающие древесные породы	Площадь, тыс. га			
	1966 г.	2001 г.	2009 г.	2017 г.
<i>Picea jezoensis</i> , <i>Picea koraiensis</i>	2586,0	2557,8	2517,1	2538,5
<i>Pinus koraiensis</i>	2439,0	2144,8	2155,3	2128,6
<i>Quercus mongolica</i> , <i>Q. dentata</i>	1778,0	1982,9	2093,9	2126,9
<i>Larix gmelinii</i> , <i>L. gmelinii</i> subsp. <i>olgensis</i>	1090,0	1219,6	1228,2	1221,6
<i>Betula costata</i> , <i>B. davurica</i> , <i>B. ermani</i> var. <i>lanata</i>	–	699,7	681,8	690,4
<i>Abies nephrolepis</i>	212,0	424,0	423,0	422,6
<i>Pinus pumila</i>	–	45,8	45,8	45,8
<i>Tilia</i> sp.	396,0	396,8	403,8	360,80
<i>Betula platyphylla</i>	954	1112,5	1093,6	1088,1
<i>Salix</i> sp., <i>Chosenia arbutifolia</i>	–	34,3	48,5	47,5
<i>Populus</i> sp.	35	43,5	43,0	42,9
<i>Fraxinus mandshurica</i>	344	302,5	315,3	321,3
<i>Ulmus japonica</i>	–	114,0	128,4	127,6
<i>Populus tremuloides</i>	–	199,1	236,5	238,9
<i>Alnus hirsuta</i>	–	49,9	52,1	51,4
<i>Pinus densiflora</i>	–	3,7	4,0	3,8

Примечание. Прочерк означает отсутствие данных.

Сохранению ценных лесных видов и формаций способствуют государственные заповедники, занимающие 4,4 % от территории края [9] и 4 национальных парка – за счет организации которых площадь ООПТ в крае достигла 16 % [13].

Ведомственные ограничения ограничивают промышленную заготовку леса на участках с крутизной склона более 30 градусов и в защитных полосах лесов вдоль нерестовых рек, что делает эти территории особо защитными для таких видов как *Pinus pumila*, *Chosenia arbutifolia*, *Betula. ermani* var. *lanata* и *Alnus japonica*, *Picea koraiensis*, *Picea jezoensis* и *Abies nephrolepis*.

Важнейшим условием эффективного сохранения лесов на территории Приморского края является также улучшение охраны лесов от пожаров [9]. Фотографии в приложении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Резкое снижение площадей основных и наиболее ценных лесных формаций (широколиственно-кедровой, пихтово-еловой, чернопихтовой и других) из-за естественных и антропогенных (рубки, пожары) воздействий обусловило внесение основных древесных видов лесобразователей в Красный список МСОП.
2. Особо охраняемые и особо защитные территории вносят большой вклад в охрану и восстановление многих лесных формаций и редких лесных экосистем.
3. На основе долговременного мониторинга динамики хвойно-широколиственных лесов на постоянных пробных площадях заповедника «Уссурийский» сделан вывод, что снижение численности наиболее ценных древесных видов – *Pinus koraiensis* и *Abies holophylla* может быть обусловлено и естественными вековыми сменами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]The IUCN Red List of Threatened Species. 2017-1. URL: <http://www.iucnredlist.org/>
- [2]Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. – 855 с.
- [3]Мартыненко А.Б., Бочарников В.Н. Экологическое районирование Дальнего Востока // Природопользование и геоэкология. – 2008. – № 2. – С. 76–84.
- [4]Старожилов В.Т., Зонов Ю.Б. Исследование ландшафтов Приморского края для целей природопользования // География и природные ресурсы. – 2009.– № 2. – С. 94– 100.
- [5]Колесников Б.П. Растительность // Южная часть Дальнего Востока. М.: Наука, 1969. – С. 206–250.
- [6]Сосудистые растения советского Дальнего Востока / Отв. ред. С.С. Харкевич. – СПб.: Наука, 1985–1996.– Т. 1–8.
- [7]The International Plant Names Index. URL: <http://www.ipni.org>
- [8] A Biodiversity conservation strategy for the Sikhote-Alin / Bogatov V.V., Miquelle D.G., Rozenberg V.A., Voronov V.A., Krasnopeev S.M., Merrill T. Vladivostok.– 2000. – 135 p.
- [9]Манько Ю.И. Проблемы сохранения биоразнообразия в лесах Приморского края // Сибирский экологический журнал. – 2005. – № 4. – С. 589–596.
- [10]Манько Ю.И., Гладкова Г.А. Усыхание ели в свете глобального ухудшения темнохвойных лесов. Владивосток: Дальнаука, 2001. – 228 с.
- [11]Манько Ю.И., Кудинов А.И., Гладкова Г.А., Бутовец Г.Н., Жабыко Е.В. Мониторинг динамики хвойно-широколиственных лесов южного Приморья // Биологические ресурсы Дальнего Востока России: комплексный региональный проект ДВО РАН. М.: Тов-во научн. изд. КМК, 2007. – С. 45–84.
- [12]Леса заповедника «Уссурийский» (мониторинг динамики) / Манько Ю.И., Кудинов А.И., Гладкова Г.А., Жабыко Е.В., Бутовец Г.Н., Орехова Т.П. – Владивосток, Дальнаука, 2010. – 224 с.
- [13]Берсенев Ю.И., Христофорова Н.К. Особо охраняемые природные территории Приморского края. Владивосток: издательский дом Владивостока, 2016. – 68 с.

Приложение: Фотографии лесов некоторых редких древесных видов в Приморском крае (Фото: Гладковой Г.А., Сибириной Л.А., Манько Ю.И.)



Фото 1. Пихтово-еловый лес с лиственницей (*Picea jezoensis*, *Abies nephrolepis*, *Larix sp.*) на горном базальтовом плато (1095 м над ур. моря), для которого характерны округлые бессточные впадины с небольшими озерами, верховья р. Бикин, Приморский край.



Фото 2. Кедрово-елово-пихтовый лес (*Pinus koraiensis*, *Picea jezoensis*, *Abies nephrolepis*) в верховьях р. Амгу, Приморский край.

Фото 3. Кедрово-чернопихтово-широколиственный лес (*Pinus koraiensis*, *Abies holophylla*), заповедник "Уссурийский", Приморский край.

**Глава III/17: ДОЛГОСРОЧНЫЙ МОНИТОРИНГ НЕПАРНОГО ШЕЛКОПРЯДА
(*LYMANTRIA DISPAR*) В ОКРЕСТНОСТЯХ ХАБАРОВСКА
Chapter III/17: Long-Term Monitoring of the Gypsy Moth (*Lymantria Dispar*) Population in the
Vicinity of Khabarovsk, Russia**

Дмитрий К. Куренщиков

DOI 10.25680/2871.2018.99.63.210

Эл. Почта: dkurenschikov@gmail.com

Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук, ул. Дикопольцева 56, 680000 Хабаровск, Россия

РЕЗЮМЕ. Непарный шелкопряд (*Lymantria dispar*) – вид насекомых семейства Волнянки (*Lymantriidae*) из отряда Чешуекрылые (*Lepidoptera*). Гусеницы питаются листьями более восьмидесяти видов растений, включая ценные сельскохозяйственные и лесные породы. Популяции непарного шелкопряда способны увеличивать численность, формируя вспышки численности. Целью работы явился анализ многолетней динамики численности популяции непарного шелкопряда в восточном секторе Евразии. Во время полевых исследований на участке постоянного наблюдения использовались настольные пояса и феромонные ловушки. Сделаны выводы о зависимости динамики популяции этого филлофага от погодных условий. Выявлены многолетние параметры лёта самцов непарного шелкопряда, проведено сравнение вклада различных групп естественных врагов этого вида в популяционную динамику в различные периоды градации численности насекомого-хозяина.

Abstract. The Gypsy moth (*Lymantria dispar*) is a species of insects of the family *Lymantriidae* from the order *Lepidoptera*. Caterpillars feed on leaves of more than eighty species of plants, including valuable agricultural and forest species. Populations of gypsy moth are able to increase the number, forming outbreaks. The aim of the work was to analyze the long-term dynamics of the population of the gypsy moth in the eastern sector of Eurasia. During the field researches, the trunk belts and pheromone traps were used at the site of permanent observation. Conclusions are drawn about the dependence of the population dynamics of this phyllophagus on weather conditions. The long-term parameters of the male flight of the Gypsy moth have been determined, the contribution of various groups of natural enemies of this species to population dynamics at different periods of the insect host population gradation has been compared.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Дальний Восток России, *Lymantria dispar*, динамика популяций, феромонные ловушки.

Keywords: Russian Far East, *Lymantris dispar*, population dynamic, pheromone traps.

ВВЕДЕНИЕ

Непарный шелкопряд (*Lymantria dispar*) относится к семейству Волнянки (*Lymantriidae*) отряда Чешуекрылые (*Lepidoptera*). В настоящее время семейство насчитывает около 2700 видов, относящихся примерно к 350 родам. Волнянки встречаются практически во всех ландшафтах и в подавляющем большинстве природных зон. Наибольшее количество таксонов отмечено в тропиках и субтропиках Африки и Юго-восточной Азии.

Ареал *L. dispar* расположен в умеренной зоне Северного полушария. Попав в 19 веке в Северную Америку, непарный шелкопряд продолжает формировать свой ареал на этом континенте [6]. Во всех районах обширного ареала этот вид имеет одно поколение за сезон, имаго не питаются (что характерно для многих видов волнянок), зимовка проходит в стадии сформировавшейся гусеницы внутри яйца (фаратная стадия). Яйца сгруппированы в кладку, покрытую светло-желтыми волосками. В своем развитии гусеница проходит пять (самцы) или шесть (самки) возрастов. Перед окукливанием гусеницы собираются в кронах деревьев в группу и сооружают гнездо, в котором может находиться до восьми куколок (Рисунок 1).



Рисунок 1 - Гнездо непарного шелкопряда. Фото автора.

Различия в биологии проявляются в следующем. Самки американской популяции не способны к полёту, самки из Сибири летают слабо, их полет можно сравнить с полетом курицы. Самки дальневосточных популяций способны активно пролетать до нескольких километров. Вторым примером служат предпочтения в местах откладки яиц. На Алтае самки предпочитают откладывать яйца на скальных обнажениях, в Западной Сибири – в прикорневой части стволов деревьев, на Дальнем Востоке – на нижней стороне листьев деревьев листопадных пород.

Непарный шелкопряд является удобным и популярным объектом научных исследований в таких областях, как энтомология, популяционная биология, экология живых систем, систематика на основе генетики и молекулярной биологии и так далее. В настоящее время разработаны методики исследования природных популяций непарного шелкопряда на всех стадиях его жизненного цикла. Адаптированные для азиатской формы непарного шелкопряда методики были разработаны специалистами Дальневосточного научно-исследовательского института (г. Хабаровск) [3, 4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования сезонной динамики непарного шелкопряда проводились на участке постоянного наблюдения (УПН) в хвойно-широколиственном лесу, в окрестностях Хабаровска [1].

На основе данных ближайшей от УПН гидрометеостанции [2] определена сумма эффективных температур (СЭТ) [3].

СЭТ определяли по формуле:

$$СЭТ = \Sigma (t - t_0)$$

Где: t^0 – среднесуточная температура атмосферного воздуха более $+10^{\circ}C$, t_0 – температура биологического нуля, которая в случае непарного шелкопряда равна $+10^{\circ}C$.

Определение СЭТ проводилось для каждой фазы развития насекомого (кроме имаго): фаза фартатной гусеницы (для осеннего и весеннего периода развития отдельно); фаза гусеницы, вышедшей из яйца; фаза куколки (Таблица 1).

Таблица 1 - Значения СЭТ для фаз развития непарного шелкопряда в период исследований (в градусах по шкале Цельсия, $^{\circ}C$).

	2011	2012	2013	2014	2015
<i>Фартатные гусеницы, осень</i>	624	470	640	655	630
<i>Фартатные гусеницы, весна</i>	8,5	11	16	20	25
<i>Гусеницы, вышедшие из яйца</i>	300	580	400	400	365
<i>Куколки</i>	120	100	125	140	90

Учеты гусениц проводились методом стволовых ловушек. Мертвые гусеницы, обнаруженные в районе ловушек, регистрировались на месте. Причина гибели определялась в лабораторных усло-

виях. Живые гусеницы, собранные около ловушек, в дальнейшем содержались в лабораторных условиях.

Учеты имаго проводились при помощи феромонных ловушек. В качестве аттрактанта использовался цис-7,8-эпокси-2-метилоктадекан (диспарлюр) в концентрации 5 мкг (Рисунок 2). Ловушки располагались на высоте 150 см над уровнем почвы в 10-15 метрах от лесной просеки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Самки откладывают яйца фактически сразу после спаривания. Независимо от времени откладки, яйца шелкопряда зимуют с сформировавшимися (фаратными) гусеницами внутри. Эта стадия развития единственная, в которой насекомые получают различную СЭТ – отложенные в начале лета получают большую СЭТ по сравнению с кладками, отложенными в начале, а тем более в конце августа. Кроме того, прекращение развития гусениц и течение различных биохимических реакций в яйцах непарного шелкопряда происходит одновременно (для конкретной популяции) – при снижении температуры окружающей среды ниже 10 °С. Более того, именно стадия «фаратной гусеницы» жестко детерминирована в пространстве: отложенные на нижнюю сторону листовой пластинки, все кладки, в итоге, попадают в лесную подстилку. Во время остальных фаз развития насекомые способны активно выбирать наиболее комфортные станции пребывания. Это подтверждается суточными миграциями гусениц и имаго. Даже гнезда куколок расположены в оптимальных – по параметрам температуры и влажности – станциях.

Перезимовав, кладки получают весной примерно одинаковую СЭТ и выходят из яиц фактически одновременно – длительность вылупления составляет 50±5 часов. Таким образом, представляется, что состояние популяции непарного шелкопряда напрямую зависит от СЭТ, полученной фаратными гусеницами в весенний период. От этого показателя зависит и наличие фенологического аккорда – сопряжения во времени выхода гусениц и распускания листьев предпочитаемых кормовых пород деревьев.



Рисунок 2 - Феромонная ловушка, выставленная на УПН.

Согласно результатам исследований (2011 – 2015 годы) СЭТ, полученный фаратными гусеницами в весенний период, каждый год возрастает. В 2014 году весенние температуры были аномально высокими. Гусеницы, получив за короткий промежуток времени достаточную СЭТ, вышли из яиц примерно на десять дней раньше средней многолетней даты. В то же время дуб монгольский (*Quercus mongolica*, основная кормовая порода для гусениц непарного шелкопряда в районе исследований), как организм, значительно больший по объему, выпустил листья «вовремя». В результате произошел разрыв фенологического аккорда «вылупление гусениц непарного шелкопряда – распускание листьев дуба». В 2014 году такой разрыв составил около двух недель, а в 2015 – около 10 суток. Известно, что основная часть гусениц непарного шелкопряда первого возраста способна переносить отсутствие пищи в течение, примерно, пяти суток, после чего наступает голодная смерть. Высокая температура атмосферного воздуха весной 2014 и 2015 годов явилась факто-

ром, вызвавшим массовую гибель гусениц первого возраста и приведшим к купированию возможности реализации вспышки непарного шелкопряда в южной части Хабаровского края в этот период.

Учеты гусениц непарного шелкопряда методом стволовых ловушек проводились в 2007 году на УПН, во время эруптивной фазы градационного цикла. Основной причиной гибели гусениц в являлась смешанная, бактериально-вирусная инфекция (до 70% гибели гусениц). Вторым по значимости фактором гибели было заражение гусениц паразитоидами отр. *Diptera* (сем. *Tachinidae* и *Sarcophagidae*) – до 20 % гусениц в популяции. Исследования были повторены в 2014-2015 годах. В 2014 году гусеницы погибли (в процентах от общего количества отмеченных гусениц): от неизвестной инфекции, в результате которой гусеницы мумифицировались в течение суток (явление условно получило название «сухой труп» – 10%; от паразитоидов отр. *Diptera* – 10%; от паразитоидов отр. *Hymenoptera* (*Anapteleles* sp.) – 6 %. Из каждой зараженной гусеницы выходило по 23-25 коконов *Anapteleles*. В 2015 году отмечены следующие причины гибели гусениц от естественных врагов: «сухой труп» - 27%; от паразитоидов отр. *Diptera* – 3%; от паразитоидов отр. *Hymenoptera* (*Anapteleles* sp.) – 36%, от вироза – 21%. В 2013 и 2016 годах с помощью стволовых ловушек учтено менее 10 экземпляров.

На УПН лёт самцов непарного шелкопряда в большинстве случаев начинается во второй декаде июля, продолжаясь примерно 40 суток. «Аномальным» годом можно считать 2014: лёт самцов начался значительно раньше, чем в другие годы и закончился раньше обычного и продолжался дольше обычного (Таблица 2).

График учета самцов с помощью феромонных ловушек характеризуется резким возрастанием активности сразу после начала лёта, пиком активности, приходящимся примерно средину третьей декады июля и плавным снижением активности вплоть до окончания лёта (Рисунок 3). Во время учетов 2013 и 2014 годов график активности имел два пика, первый – более резкий – в середине третьей декады июля и второй, меньший по размерам, приходящийся на конец июля – начало августа. Можно предположить, что в 2013 и в 2014 годах на УПН присутствовали самцы двух различных популяций непарного шелкопряда. Однако, вопрос о возникновении двух пиков активности требует дальнейшего изучения. Минимальное количество насекомых, отмеченных в ловушках в 2014 и 2015 годах подтверждает предположение, что значительная часть популяции в эти годы погибла в результате разрыва фенологического аккорда «*вылупление фартных гусениц – распускание листьев кормовой породы растений*».

Таблица 2 - Параметры лёта самцов непарного шелкопряда в 2011-2015 гг. на УПН.

	Начало лёта	Завершение лёта	Продолжительность лёта (сутки)	Количество отмеченных самцов (экз./ловушка в среднем)
2011 г.	19 июля	30 августа	42	1037
2012 г.	20 июля	31 августа	42	658
2013 г.	12 июля	30 августа	39	1337
2014 г.	9 июля	28 августа	50	721
2015 г.	21 июля	1 сентября	42	472

В эти же годы в Приморском крае, по опросным данным, наблюдалась мощная вспышка численности непарного шелкопряда (разрыва фенологического аккорда на этой территории не было).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Аномально высокие температуры воздуха в весенний период могут привести к разрыву фенологического аккорда «*вылупление фартных гусениц – распускание листьев кормовой породы растений*», что приводит к голодной смерти большую часть популяции.
2. В эруптивный период градационного цикла численности основным фактором смертности гусениц непарного шелкопряда являются смешанные, бактериально-вирусные инфекции и паразитоиды из отр. *Diptera* (сем. *Tachinidae* и *Sarcophagidae*). В период спада численности наибольшая гибель гусениц наблюдалась от паразитоида отр. *Hymenoptera* (*Anapteleles* sp.) и от гибели в результате неопознанной инфекции, получившей предварительное название «сухой труп».
3. Период лёта самцов на УПН начинается, как правило, во втором квартале июля и продолжается примерно 40 суток. Максимальное количество самцов в феромонных ловушках отмечено в 2013 году, минимальное – в 2014 и 2015 годах. Предполагается, что резкое снижение численно-

сти популяции произошло в результате высоких атмосферных температур в весенний период фазной стадии жизненного цикла непарного шелкопряда.

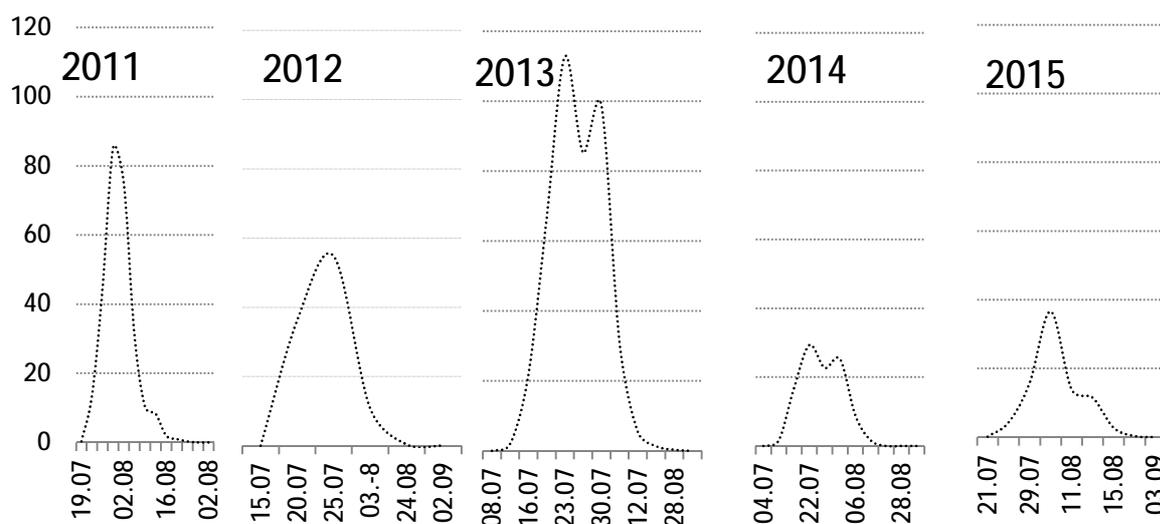


Рисунок 3 - Динамика активности лёта самцов непарного шелкопряда в период исследований.

Благодарности: Автор глубоко благодарен д.б.н. Ильиных А.В. (Институт систематики и экологии животных СО РАН, г. Новосибирск) за консультации и ценные советы. как во время полевых исследований, так и во время написания текста

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Ильиных А.В., Куренчиков Д.К., Бабурин А.А., Имранова Е.Л. 2011. Факторы, влияющие на продолжительность вспышки массового размножения непарного шелкопряда (*Lymantria dispar* L.). Экология. № 3. С. 211-217.
- [2]Погода и климат [Электронный ресурс] – режим доступа www.pogodaiklimat Дата обращений 22 сентября 2017.
- [3]Юрченко Г.И., Турова Г.И. 1988. Временные рекомендации по надзору за непарным шелкопрядом на Дальнем Востоке. Хабаровск: ДальНИИЛХ. 12 с.
- [4]Юрченко Г.И. Малоквасова Т.С., Турова Г.И. 2007. Рекомендации по мониторингу и мерам контроля численности непарного шелкопряда на Дальнем Востоке. Хабаровск: ДальНИИЛХ. 44 с.
- [5]Энтомология [Электронный ресурс] – режим доступа: www.enomologa.ru. Дата обращения: 22 сентября 2017.
- [6]Liebhold M.A., Halverson J.A., Elmes A.G. 1992. Gypsy Moth Invasion in North America: A Quantative Analysis // Journal of Biogeography. Vol. 19 - №5. PP 513-520.

**Глава III/18: МОНИТОРИНГ ГОРНЫХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ОСОБО
ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА**
**Chapter III/18: Monitoring of Mountain Forestry Ecosystems on Specially Protected Natural Ter-
ritories in the Northwest Caucasus**

Николай А. Битюков

DOI 10.25680/5283.2018.62.28.211

Эл. Почта: nikbit@mail.ru

ФГБУ «Сочинский национальный парк», ул. Московская, 21, 354000 Сочи, Россия

РЕЗЮМЕ. В статье приведен анализ экспериментальных материалов, полученных на комплексном лесогидрологическом стационаре с постановкой активного эксперимента по ведению лесного хозяйства на малых водосборах. Показаны изменения элементов водного баланса горных склонов на малых (элементарных) водосборах в формации буковых лесов в связи с рубками. В результате 40-летних наблюдений за элементами лесных экосистем, которые были изменены в результате проведения рубок главного пользования, установлено, что все элементы экосистем подвержены динамике. На водосборах с котловинной и добровольно-выборочной рубками наблюдается тенденция к стабилизации водного баланса в сравнении с контрольным водосбором.

Abstract. The article provides an analysis of experimental material obtained at a complex forest-hydrological research station including a running experiment on forest management in small watersheds. Changes in the elements of the water balance of mountain slopes in small (elementary) catchments in the beech forest formation in connection with tree logging are shown. As a result of 40 years of observations of elements of forest ecosystems that have been changed as a result of felling operations, it has been found that all elements of ecosystems are susceptible in their dynamics. In watersheds with hollow and voluntary-selective felling, there is a tendency to stabilize the water balance in comparison with the control catchment area.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Северо-Западный Кавказ, буковые леса, водный баланс, рубки главного пользования, водный режим, малые (элементарные) водосборы

Keywords: North-Western Caucasus, beech forests, water balance, final felling, water regime, small (elementary) watersheds

ВВЕДЕНИЕ: РАЙОН И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования элементов водного баланса в буковых насаждениях проведены на лесогидрологическом стационаре «Аибга» (ЛГС «Аибга»), который был организован ФГУ «НИИгорлесэкол» в 1963–1965 гг. в юго-восточной части Черноморского побережья Кавказа (в бассейне р. Мзымта – Южный отдел Сочинского национального парка). ЛГС «Аибга» располагается на водоразделе рек Псоу и Мзымта на высотах от 485 до 1150 м над ур. моря, на общем склоне юго-западной экспозиции со средней крутизной 25° и включает четыре водосбора размером от 5.7 до 19.9 га (рис.1). По условиям местопроизрастания его территория является репрезентативной для зоны буковых лесов (ПРИЛОЖЕНИЕ).

В настоящей статье приведены результаты мониторинга как не затронутых рубками буковых насаждений (в период 1963-1970 гг.), так и после проведения опытно-производственных рубок леса в 1972-73 гг. на трех из 4-х водосборов. Результаты воздействия рубок на элементы водного баланса были исследованы в течение последующих 40 лет. На водосборе №1 (рис. 1) была выполнена сплошнолесосечная рубка с тракторной технологией лесозаготовок и трелёвкой по горизонтальным пасечным волокам. На водосборе №2 проведена котловинная 3-х-приемная рубка с 5-летним периодом между каждым приёмом. На водосборе №3 выполнена добровольно-выборочная рубка с выборкой 16-32% по запасу. Водосбор №4 был оставлен в качестве контрольного, без хозяйственного воздействия.

МЕТОДЫ

Для мониторинга использованы общепринятые методы полевых микроклиматических, водно-балансовых и лесоводственно-таксационных исследований. Для корреляционного анализа ис-

пользован статистический метод. Также использованы методы сравнительно-географического и пространственно-временного анализа. Для обработки данных использовались продукты Microsoft Access, Microsoft Excel, StatSoft STATISTICA. Создана электронная база данных наблюдений за элементами баланса за период 1964-2010 гг. Доказана возможность использования склонового стока в качестве интегрального показателя климатических и антропогенных изменений на малых водосборах. [1-9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты мониторинга лесных экосистем на ЛГС «Аибга» позволяют охарактеризовать внутрисезонные изменения отдельных элементов водного баланса и рассчитать в целом водный баланс для элементарных бассейнов зоны буковых лесов. Для водотоков, представляющих собой притоки 1-го порядка и дренирующих только часть грунтовых вод своего бассейна, уравнение водного баланса может быть записано в следующем виде (Соколовский, 1968):

$$X = Y_{\text{пов}} + (k_1 * Y_{\text{под}} + k_2 * Y_{\text{под}}) + Z \pm \Delta I, \quad (1)$$

где: X - осадки; $Y_{\text{пов}}$ - поверхностный сток; $Y_{\text{под}}$ - подземный сток; k_1 - часть подземного стока, дренируемая данным водотоком; k_2 - часть подземного стока, дренируемая водотоком высшего порядка, причем $k_1 + k_2 = 1,0$; Z - суммарное испарение; ΔI - аккумуляция вод в бассейне.

В горных условиях величина $Y_{\text{пов}}$ включает не только поверхностный, но и дренажный сток, проходящий по крупным дренам верхнего почвенного слоя, т.е. целиком склоновый сток, поскольку гидравлические характеристики этих видов стока сопоставимы и разделить их очень трудно.

Инфильтрационная часть баланса определена как остаточный член, поэтому включает и ошибки определения каждого элемента баланса. Контролем служил водный баланс четвертого водосбора, где водоток дренирует почти весь сток (как и на основных реках региона). Для отдельных водосборов стационара коэффициент дренирования подземных вод до рубки изменялся от $K=0.0$ (для ручьев 1-го и 3-го водосборов) до $K=0.067$ (для ручья второго водосбора) и $K=0.823$ (для ручья 4-го водосбора) [Битюков, 2001].

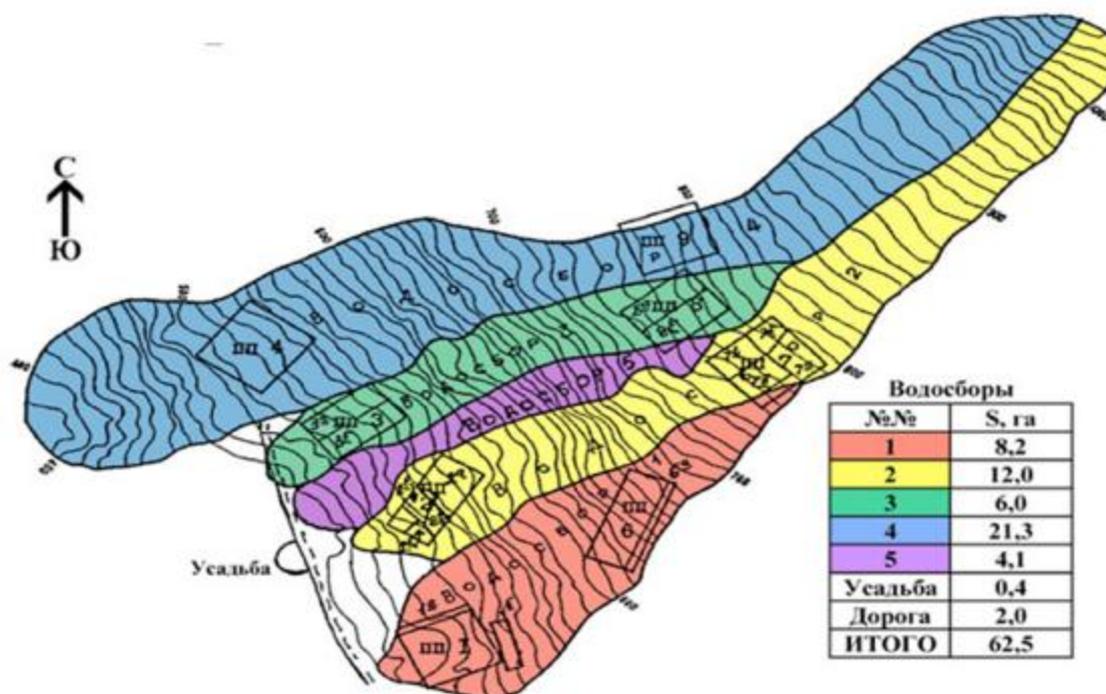


Рисунок 1 – Расположение водосборов и пробных площадей ЛГС «Аибга»

Соотношение между компонентами водного баланса зависит от приходной его части, т.е. от количества и режима осадков. Так, в засушливые годы относительная доля инфильтрации меньше (на 4-5%), склоновый сток также меньше (на 3%), а суммарное испарение увеличивается на 3-4%

в сравнении со средним по осадкам годом. Рисунок 2 Усредненный годовой водный баланс первого водосбора за периоды

При среднем соотношении элементов водного близко, когда годовая и сезонные суммы осадков которого почти совпадают с нормой, уравнение баланса до рубки можно записать в виде (в обозначениях формулы (1):

$$\text{в мм: } 2595 = 154 + (0.823 \cdot 1692 + 0.177 \cdot 1692) + 759 - 10 \quad (2)$$

$$\text{в \%: } 99.6 = 5.9 + (0.823 \cdot 65.0 + 0.177 \cdot 65.0) + 29.1 - 0.4 \quad (3)$$

Таким образом, в среднем годовом водном балансе склоновый сток составляет 5.9%, подземный сток – 65%, суммарное испарение – 29.1%. Для отдельных водосборов стационара коэффициент дренирования подземных вод изменяется от $k_1 = 0.0$ (для 1-го и 3-го ручьев) до $k_1 = 0.067$ (для 2-го) и $k_1 = 0.823$ (для 4-го ручья).

Анализ выявил не только количественные изменения стока в связи с рубками, но и время наступления таких изменений. В результате определились наиболее существенно отличающиеся три периода: калибровочный (1966-1973 гг.) и два периода после проведения рубок (1974-1979 гг. и 1980-2010 гг.). По результатам измерений и расчетов элементов водного баланса в табл.1 приведен баланс влаги водосборов с опытными рубками в усреднении за 9 периодов: до рубки (1966-1973 гг.), после рубки (1974-1979 гг.), спустя 5 лет после рубок (1980-1984 гг.), а также спустя 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 40 лет после рубки. Разбивка на периоды после рубок на несколько пятилетий обоснована сроком наиболее резких изменений элементов водного баланса во времени.

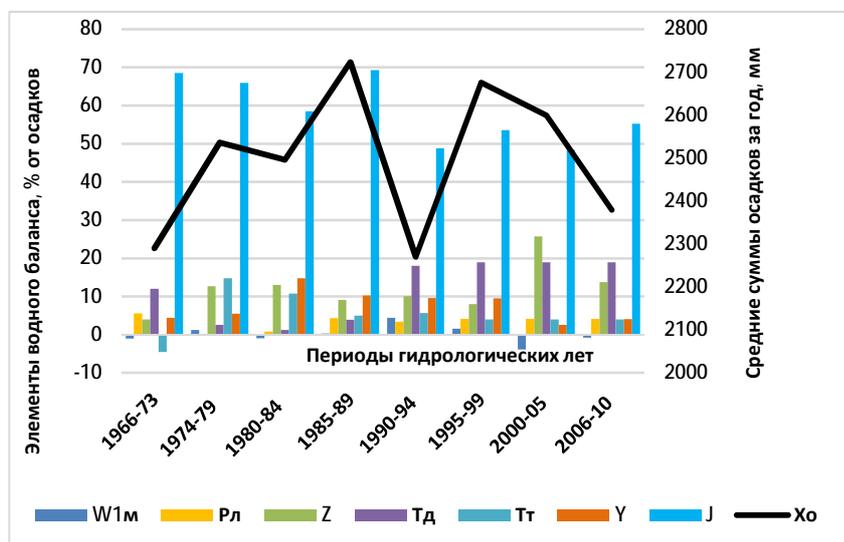


Рисунок 2- Усредненный годовой водный баланс первого водосбора за периоды

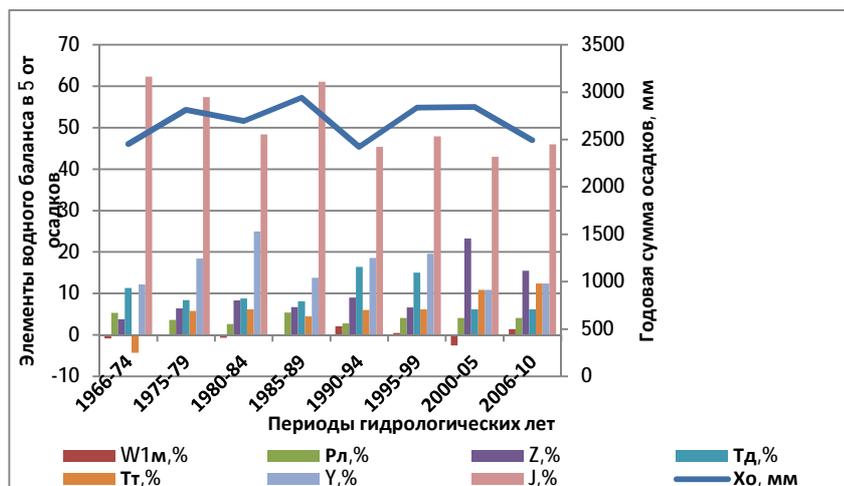


Рисунок 3- Усредненный годовой водный баланс второго водосбора за периоды

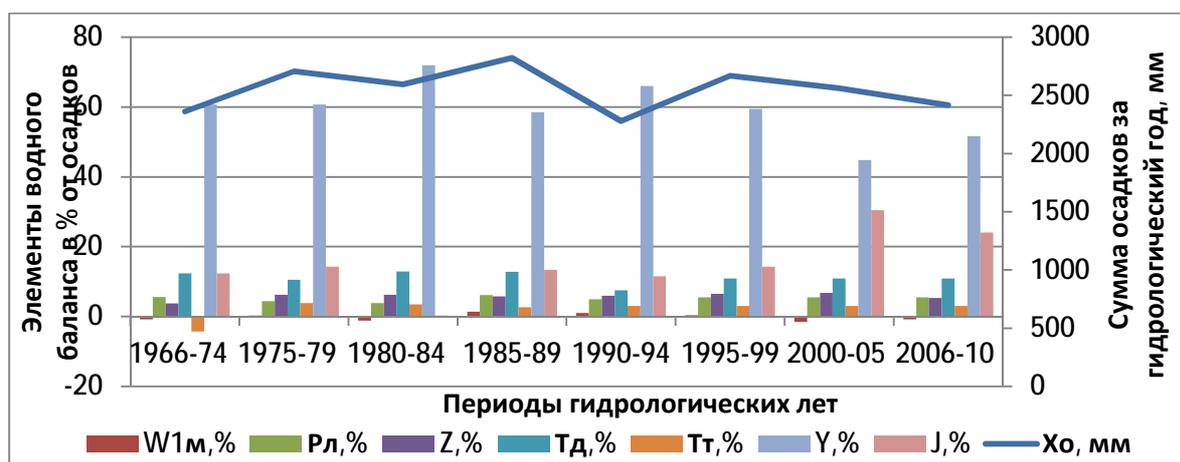


Рисунок 4- Усредненный годовой водный баланс четвертого (контрольного) водосбора за отдельные периоды наблюдений.

Обозначения в рисунках 2-4.: $W_{1м}$ - изменение влагозапасов в 1-метровом слое почвы; $P_{л}$ - перехват осадков пологом леса; Z - испарение с поверхности почвы; $T_{д}$ - транспирация древостоем; $T_{т}$ - транспирация травяным покровом; Y - сток; J - инфильтрация. $X_о$ - осадки на открытом месте.

В результате сплошной рубки на 1-ом водосборе несколько возросло (на 10-12 % за теплый сезон) суммарное испарение: от 26 до рубки до 28 % после рубки, в 3.4 раза увеличился сток (с 4.4 до 15 %) и уменьшилась инфильтрация (от 68 до 58 % после рубки). При этом происходило перераспределение составляющих суммарного испарения - взамен отсутствующих транспирации древостоем и перехвата осадков пологом леса на вырубке резко возросли испарения с почвы и транспирация травяным покровом. По мере формирования молодняков на вырубке происходит выравнивание всех составляющих суммарного испарения. Общая величина суммарного испарения в условиях переувлажненной зоны зависит от поступления солнечной радиации и адвективного тепла.

На 2-ом водосборе (с котловинной рубкой) суммарное испарение в годовом водном балансе изменяется незначительно (в пределах 24-26 %). возрастает сток (как склоновый, так и подземный) - до 25 против 12 % до рубки, уменьшается инфильтрация - до 48 против 62 % до рубки (рис. 3).

На 3-ем водосборе изменения водного баланса имели место только в первые 5 лет после рубки, что выражалось уменьшением суммарного испарения и увеличением инфильтрации.

Сопоставляя величины средних слоев стока до рубки и за каждый из двух периодов после рубки, можно отметить, что на водосборе со сплошнолесосечной рубкой суммарный сток увеличился (в 2,4 раза) только на 6-11-й год после рубки.

На 2-ом водосборе с четырех-приемной котловинной рубкой (первый прием - 8 котловин на 2.0 га в 1973-1974 гг., второй прием - 8 котловин на 2.6 га в 1981-1982 гг.), в среднем суммарный сток увеличился сразу после рубки в 1.35 раза и возрос в 1.92 раза на 6-11-й год после рубки.

На 3-ем водосборе (с добровольно-выборочной рубкой) суммарный сток за месяц связан с контрольным 4-ым водосбором уравнениями увеличения суммарного стока практически не наблюдалось. При $H_4 > 200$ мм разница в стоке до и после рубки существенна - в 1.5 раза.

Анализ сравнительного изменения стока за период после рубок по отношению к контрольному водосбору показал, что в первый пятилетний период после опытных рубок наблюдалось увеличение стока на всех водосборах: в 1.3 раза - на сплошной вырубке, в 1.5 - на котловинной, в 1.06 раза - на добровольно-выборочной.

В следующий пятилетний период увеличение стока составило: на сплошной вырубке - в 2.8 раза, на площади котловинной рубки - в 1.7 раза. На водосборе с добровольно-выборочной рубкой сток стабилизировался.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа водного баланса установлено, что на первом водосборе после сплошнолесосечной рубки суммарное испарение уменьшилось в первую пятилетку после рубок на 15, во вторую - на 25%; сток возрос соответственно в 1.25 и 2.8 раза.

2. На втором водосборе с котловинной рубкой суммарное испарение уменьшилось на 12-15%, сток в первую пятилетку возрос в 1.5 и во вторую - в 1.7-1.9 раза.
3. На третьем водосборе с добровольно-выборочной рубкой уменьшение испарения составило 13-16%, увеличение стока в первый период в 1.1 раза и уменьшение его на 13% - во второй период.
4. На водный баланс малых водосборов влияет также величина площади водосбора, что объясняется глубиной вреза русла, и как следствие - степенью дренирования глубоких подземных вод.
5. Следует отметить, что по результатам 40-летних исследований установлено, что после рубок главного пользования в буковых насаждениях не восстанавливаются первоначальные экологические системы, а формируются совершенно новые лесных экосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Битюков Н.А. Гидрологическая роль горных лесов Северо-Западного Кавказа // Лесоведение. 1996. № 4. С. 39-50.
- [2] Битюков Н.А. Итоги длительного мониторинга экосистем буковых насаждений Черноморского побережья Кавказа // Лесоведение. 2015. № 3. С. 202-207.
- [3] Битюков Н.А. Экология горных лесов Причерноморья. Монография / Сочи: ФГУ НИИгорлесэкол, 2007. 397 с.
- [4] Битюков Н.А. Мониторинг экосистем буковых лесов Сочинского Причерноморья: Монография // Научные труды Сочинского национального парка // Сочи: ФГБУ «СНП». 2013 с. – 391 с. с илл.
- [5] Битюков Н.А., Пестерева Н.М., Ткаченко Ю.Ю., Шагаров Л.М. Рекреация и мониторинг экосистем особо охраняемых природных территорий Северного Кавказа: Монография. Сочи: ФГБОУ ВПО СГУ, 2012. 456 с., с илл.
- [6] Битюков Н.А., Шагаров Л.М. Мониторинг атмосферных осадков в буковых лесах Черноморского побережья Кавказа // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2013. №5. С. 65-67.
- [7] Коваль И. П., Битюков Н. А. Количественная оценка водорегулирующей роли горных лесов Черноморского побережья Кавказа // Лесоведение. 1972. № 1. С. 3—11.
- [8] Коваль И.П., Битюков Н.А. Экологические основы пользования лесом на горных водосборах (на примере Северного Кавказа): Монография. Краснодар: Кубанский учебник, 2001. 480 с.
- [9] Коваль И.П., Битюков Н.А., Шевцов Б.П. Экологические основы горного лесоводства: Монография. Сочи: ФГБУ НИИгорлесэкол, 2012. 545 с.
- [10] Соколовский Д.Л. Речной сток 1 Л. Гидрометеиздат, 1968. – 527 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Фото 1. Горный ландшафт - долина реки Псезуапсе – зона произрастания буковых лесов на Черноморском побережье Кавказа



Фото 2,3. Изучение склонового стока в буковых насаждениях с помощью водосливного сооружения на лесогидрологическом стационаре «Аибга», Сочинский национальный парк
Изучение микроклимата в буковых насаждениях, не пройденных рубками. Лесогидрологический стационар «Аибга», котрольный водосбор. Сочинский национальный парк.

Глава III/19: ЛАНДШАФТНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ ЛЕСОУСТРОЙСТВА (НА ПРИМЕРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВЕДНИКА «АЗАС»)

Chapter III/19: Landscape Mapping based on Materials of Forest Planning (on the Example of the Azas State Natural Reserve)

Сергей К. Фарбер*, Наталья С. Кузьмик, Игорь М. Данилин, Елена В. Горяева

DOI 10.25680/8650.2018.58.24.212

*Эл. Почта: sfarber@ksc.krasn.ru

Институт леса им. В.Н.Сукачева СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Академгородок, 50/28, 660036 Красноярск, Россия

РЕЗЮМЕ. Традиционно ландшафтное картографирование предваряет дешифрирование структурных составляющих ландшафтов. Таксационные описания выделов – это наиболее точные и полные сведения о категориях земель объектов изучения, существующие на сегодняшний день. При ландшафтных построениях материалы лесоустройства позволяют не только избежать дублирования полевых и камеральных работ, но также наполняют их новым содержанием. При этом полигоны фации, урочища, ландшафты формируются в интерактивном режиме. Атрибутивная таблица таксационных выделов может быть расширена посредством введения дополнительных полей с данными, например, геологического строения, почвенно-грунтовых условий, режима увлажнения. Количество вариантов компоновки полигонов становится практически не ограниченным. Выбирается вариант, отвечающий решаемым задачам. Смысловое содержание фаций, урочищ и ландшафтов, представленное в настоящей работе, отвечает требованиям организации и ведения охотничьего хозяйства [1].

Abstract Traditionally, landscape mapping precedes the interpretation of the structural components of landscapes. Forest inventory descriptions of forest compartments are the most accurate and complete information on the categories of land of study objects that exist today. With landscape constructions, the materials of forest inventory allow not only to avoid duplication of field and office work, but also fill them with new content. At the same time polygons facies, tracts, landscapes are formed in an interactive mode. The attributive table of forest inventory compartments can be expanded by introducing additional fields with data, for example, geological structure, soil and soil conditions, moistening regime. The number of options for linking polygons becomes almost unlimited. The option is choose that meets the tasks to be solved. The semantic content of facies, tracts and landscapes presented in the present work meets the requirements of the organization and management of hunting facilities [1].

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ландшафтное картографирование, материалы лесоустройства, данные ЦМР SRTM

Keywords: landscape mapping, materials of forest planning, DTM SRTM

ВВЕДЕНИЕ

Ландшафт можно определить, как генетически единую геосистему, однородную по зональным и азональным признакам и заключающую в себя специфический набор сопряженных локальных геосистем [2]. Однако четкого понимания, что есть ландшафт, до сих пор нет [3]. Термин “ландшафт” можно применить не только к любым таксономическим единицам, но и в общем смысле, подобно понятиям “почва”, “климат”. Н. А. Солнцев и др. [4]. понимают под ландшафтом единицу определенного таксономического ранга. Не выработано у ландшафтоведов единого мнения относительно низшей иерархической ступени – предела дифференциации поверхности Земли. Г. Д. Рихтер [5], Н. А. Гвоздецкий, А. Г. Исаченко и др.[6]. считают, что это – район. Н. А. Солнцев [7] – ландшафт, дробящийся далее на морфологические части до фации. В. И. Прокаев [8], Е. Н. Калашников, Д. М. Киреев [9] – фация, В. Б. Сочава [10] – элементарный геомор (часть фации). Д. Л. Арманд [11] утверждает, что низшей границы районирования не существует. Э. Нееф [12] считает, что те понятия и определения ландшафта, которые предусматривают для него заданную характерную величину, не могут рассматриваться как объективные. Имеется принципиальное различие в понятии “комплексность” ландшафтного районирования. Н. А. Солнцев и др. [4]. признают, что можно учитывать комплекс признаков. Д. Л. Арманд [11] считает, что по комплексу признаков районировать вообще нельзя. Отсюда следуют принципиально отличающиеся подходы к вопросам районирования территории. В первом случае выстраивается каркас строго соподчиненных иерархических единиц, во втором – районирование индивидуально, в соответствии с целями решаемых задач. Использование новых методов обработки данных дистанционного зондирования Земли сути ландшафтного подхода не меняет.

С появлением материалов аэрокосмических съемок при составлении ландшафтных карт появилась возможность значительного сокращения объемов наземных исследований. Д. М. Киреев [13] формулирует принципы ландшафтного картографирования, основанные на дешифрировании фотографических изображений; В. Б. Сочава [14,15] - построения иерархической структуры геоморфов; В. А. Первунин [16] - геоботанического картографирования на ландшафтной основе. Интерпретация материалов аэрокосмических съемок в сочетании с наземными исследованиями позволила установить, что рельеф и геологический состав поверхностных отложений, являются решающими лесорастительными факторами [17]. Дальнейшее развитие ландшафтного картографирования связано с использованием ГИС [18].

В настоящее время программными средствами ГИС анализируются данные цифровых моделей рельефа (ЦМР) и мультиспектральных космических снимков. Следует признать достаточную для картографирования ландшафтной структуры точность оценок по ЦМР показателей рельефа. Что же касается характеристик растительного покрова, лесных и нелесных сообществ то их дешифрирование методами контролируемой и неконтролируемой классификации пикселей космических снимков зачастую сопровождается недопустимыми ошибками [19]. При этом существует альтернатива – данные лесоустройства. На сегодняшний день - это наиболее полные и точные сведения о лесных землях.

Таксация в заповеднике Азас выполнена по 3-му разряду лесоустройства дешифровочным методом при нормативном количестве наземных глазомерно-измерительных описаний. Год лесоустройства - 2015. Информация доступна не только в бумажном варианте, но и в виде векторного слоя таксационных выделов. Поэтому необходимые оценки местоположения на карте полигонов

фаций, урочищ и ландшафтов, а также выявление и анализ их характеристик, может производиться средствами ГИС. Цель настоящей работы – демонстрация последовательности ландшафтного картографирования на основе лесоустроительных данных. Работа выполнена на примере территории заповедника «Азас».

МЕТОДИКА

Атрибутивная таблица слоя таксационных выделов содержит более 200 полей. Далеко не все эти данные могут быть использованы для характеристики ландшафтных таксонов. Их смысловое содержание и величина полигонов будет напрямую зависеть от варианта комбинации данных. Выбор же определяется целями ландшафтного картографирования. Ландшафтные построения и их анализ помогают, а зачастую и являются основным инструментом для решения многих научно-практических задач. В рамках настоящей работы - это демонстрация возможности использования лесоустроительных данных. Принимается следующая иерархическая структура: ландшафт – урочище - фация.

В качестве фаций заповедника рассматриваются смежные таксационные выдела. Критерии объединения: для насаждений и редины – это преобладание в составе пород деревьев и равенство класса бонитета; для не покрытых лесом земель – это тождественность наименований. В таксационных описаниях выделов не предусматривалось определение коренной породы, поэтому погибшие насаждения (в заповеднике - гари) и производные лиственные насаждения, рассматриваются в качестве отдельных фаций.

В качестве урочищ заповедника также рассматриваются смежные таксационные выдела. Критерии объединения для насаждений и редины - принимается во внимание только преобладающая порода древостоя и равенство класса бонитета. Не покрытые лесом земли как отдельные урочища не выделяются.

В качестве ландшафтов заповедника рассматриваются высотно-поясные комплексы (ВПК): высокогорные, горно-таежные, лесостепные и подтаежные. Степные, луговые, кустарниковые и болотные сообщества в заповеднике встречаются фрагментарно, что не позволяет обособлять их в виде отдельных ландшафтов. В схеме типов леса и нелесных сообществ приведены верхние и нижние пределы абсолютных высот ВПК. Эти величины при оконтуривании ландшафтов используются как ориентировочные, с их последующей корректировкой на основе материалов лесоустройства.

Смысловое содержание таксационных выделов отвечает задачам организации и ведения лесного хозяйства. Смысловое содержание фаций, урочищ и ландшафтов, представленное в настоящей работе, отвечает требованиям организации и ведения охотничьего хозяйства [1].

Исходные материалы:

- данные массовой таксации заповедника в формате файлов ГИС ArcMap (11 739 описаний таксационных выделов);
- ЦМР, представленная данными SRTM;
- схема типов леса и нелесных сообществ.

Последовательность картографирования:

- пространственный анализ ЦМР, с получением раstra местоположений по входам абсолютная высота экспозиция уклон (поле ВЭУ);
- создание в атрибутивной таблице таксационных выделов полей *ВЭУ, ФАЦИИ, УРОЧИЩА, ЛАНДШАФТЫ*;
- слияние смежных одноименных фаций, урочищ и ландшафтов с образованием отдельных векторных слоев.

Результат выполнения этапов – ландшафтная карта заповедника. Легенда карты должна отвечать целям картографирования, в нашем случае легенда включает характеристику рельефа, описание типов леса и нелесных сообществ, основные таксационные показатели.

ЛАНДШАФТНАЯ КАРТА

Заповедник «Азас» расположен в пределах трапеции SRTM 56-02. Для индексации местоположений приняты входы: абсолютные высоты, градация 100 м; склоны северной экспозиции (0-90, 270-360) град.; склоны южной экспозиции (90-270) град.; плоские местоположения с уклонами (поймы водотоков и водоразделы); склоны средней крутизны с уклонами от 3-х до 20-ти град.; крутые склоны с уклонами более 20-ти град.

Первому высотному поясу отвечают высоты до 1000 м, второму от 1001 м до 1100 м и т.д. Северная экспозиция – 1, южная – 2. Уклоны до 3-х градусов обозначаются индексом 1, до 20 градусов – 2, более 20 градусов – 3. Две градации экспозиции и три градации уклонов образуют шесть типов местоположений. Поставим впереди индекс высотного пояса, далее следуют индексы экспозиции и уклона. Например, выражение 2-1-2 – отвечает абсолютным высотам от 1001 м до 1100 м, склонам северной экспозиции крутизной от 3 до 20 град.

Результатом анализа ЦМР является получение растровых поверхностей абсолютных высот, экспозиций и уклонов местности. Посредством их комбинирования создается общая растровая поверхность *Combine*. Атрибутивная таблица *Combine* дополняется полем *ВЭУ* (высота, экспозиция, уклон) со значениями индексов местоположений. Поле *ВЭУ* должно присутствовать также и в атрибутивной таблице слоя таксационных выделов. Для этого произведена конвертация раstra *Combine* в векторный слой с последующим его пространственным соединением со слоем таксационных выделов. Поле *ВЭУ* при выполнении этой операции сохраняется в атрибутивной таблице в качестве дополнительного.

Для насаждений и редин заполнение поля *ФАЦИИ* произведено посредством сцепления условных обозначений первых 3-х пород деревьев формулы состава. Например, насаждение 2-го класса бонитета с формулой породного состава 7Б1Ос1Л1С запишется как БОсЛ2. Для непокрытых лесом земель фация отождествляется с категорией земель таксационного выдела. Заполнение поля *УРОЧИЩА* произведено в соответствии с характеристикой фаций, посредством указания преобладающей породы древостоя и класса бонитета. Заполнение поля *ЛАНДШАФТЫ* произведено на основе поля *ВЭУ*, в соответствии с схемой типов лесов и нелесных сообществ заповедника. К высокогорным ландшафтам отнесены таксационные выдела расположенные на абсолютных высотах более 1800 м, к горно-таежным – от 1100 м до 1800 м, к перистепным, лесостепным и подтаежным – до 1100 м.

Полигоны одноименных фаций, урочищ и ландшафтов объединены с образованием отдельных векторных слоев. Ландшафтная карта на основе материалов лесоустройства сформирована посредством наложения слоев фаций урочищ и ландшафтов в ГИС проекте. Содержание карты при необходимости может редактироваться, т.к. связи фаций урочищ и ландшафтов с исходным слоем таксационных выделов сохранены. После редактирования карта представлена в виде растрового изображения (рис. 1).

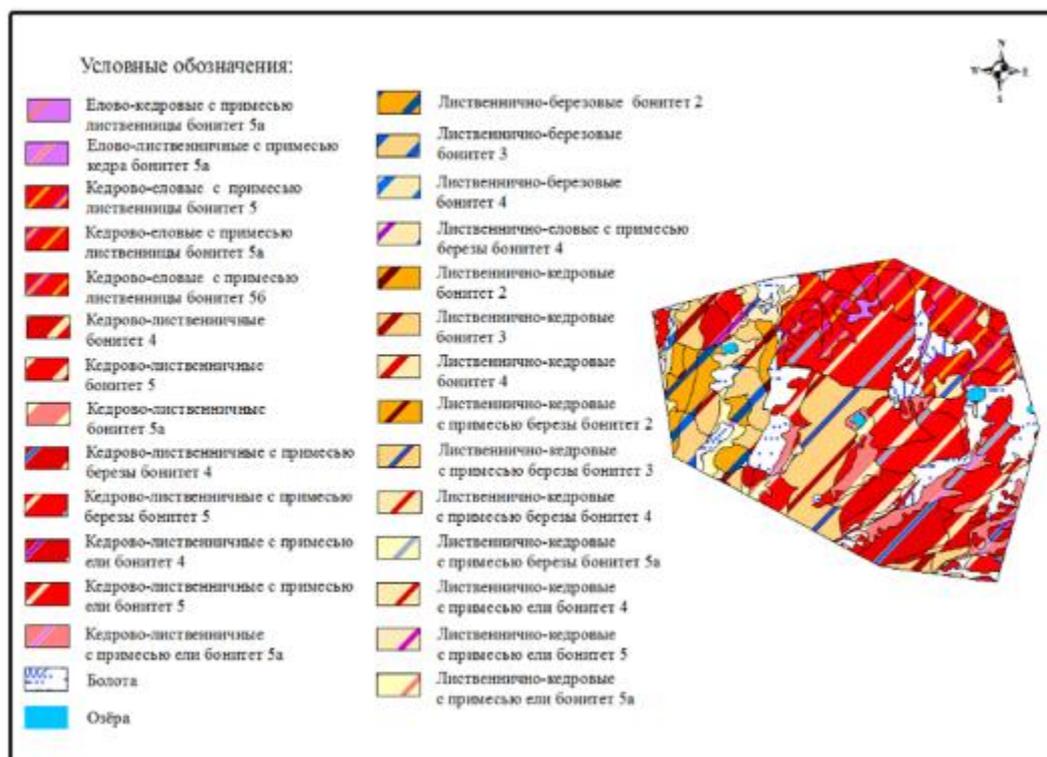


Рисунок 1 – Карта-схема горно-таежных формаций заповедника «Азас» (фрагмент)

ВЫВОД ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДА

Традиционное ландшафтное картографирование предполагает совместное рассмотрение тематических слоев. Основные из них «Геологическое строение», «Геоморфологическое районирование», «Растительность», «Почвы» [20]. При этом контурное дешифрирование выполняется с использованием данных дистанционного зондирования - аэросъемок и космических съемок и заключается в выявлении ландшафтной структуры территории. Аналитическое дешифрирование, т.е. наполнение ландшафтных структур (полигонов) тематическим содержанием производится посредством интерполяции известных данных. Дополнительные характеристики, которые могут понадобиться для решения определенных научно-практических задач, выявляются из других источников.

Таким образом ландшафтное картографирование на основе лесоустроительных материалов позволяет анализировать и обобщать не только таксационные данные, но также в полной мере использовать, накопленную к настоящему времени информацию о системной - ландшафтной организации территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Метод – позволяет значительно сократить наземные работы (цикл лесоустроительных работ предусматривает закладку пробных площадей и производство ходовой таксации).
2. В полной мере используется контурное и аналитическое дешифрирование таксационных выделов, выполненное в процессе лесоустройства.
3. Метод дает возможность формирования различных вариантов смыслового содержания ландшафтных таксонов, соответствующих задачам картографирования а также использования программных средств ГИС для редактирования, поскольку ландшафтная карта сохраняет связь с полигонами и атрибутивной таблицей таксационных выделов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шишкин А.С., Фарбер С.К. Инновационная технология охотустройства. /Экосистемы Центральной Азии: исследования, сохранение, рациональное использование. Материалы XIII Убсунурского Международного симпозиума, Кызыл, 4-7 июля 2016 г. С.241-244.
- [2] Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование / А.Г. Исаченко. – М., 1991. – 366 с.
- [3] Сукачев В. Н. Избранные труды в трех томах / под ред. Е. М. Лавренко. — Л.: Наука. Т. 1: Основы лесной типологии и биогеоценологии. — 1972. — 419 с.
- [4] Солнцев Н. А. История физико-географического районирования европейской части СССР // Физико-географическое районирование СССР. М., 1962. – С. 6-54.
- [5] Рихтер Г. Д. Основные факторы и закономерности территориальной дифференциации природы СССР и физико-географическое районирование. – Т. VIII. М.: Земледелие, 1969. – 36 с.
- [6] Гвоздецкий Н. А., Исаченко А. Г. К проблеме физико-географического районирования. – Изд-во В.Г.О., 1962, № 6. – С. 462.
- [7] Солнцев Н. А. О морфологии природного географического ландшафта / Вопросы географии, 1949, Вып. 16. – С. 61-86.
- [8] Прокаев В. И. Основы методики физико-географического районирования. – Л., 1967. – 119 с.
- [9] Калашников Е. Н., Киреев Д. М. Основы ландшафтно-статистического метода лесоинвентаризации. – Новосибирск: Наука, 1978. – 144 с.
- [10] Сочава В. Б. Учение о геосистемах. Современный этап комплексной физической географии. М.: Изд-во АН СССР, 1972, № 3. – С. 20.
- [11] Арманд Д. Л. Наука о ландшафте. – М.: Мысль, 1975. – 288 с.
- [12] Нееф Э. Теоретические основы ландшафтоведения. М: Прогресс. 1974. – 220 с.
- [13] Киреев Д. М. Методы изучения лесов по аэроснимкам. Новосибирск, «Наука», 1977. 221 с.
- [14] Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. — Новосибирск: Наука, 1978. — 318 с.
- [15] Сочава В. Б. Географические аспекты Сибирской тайги. — Новосибирск: Наука, 1980. — 256 с.
- [16] Первунин В. А. Принципы картографирования структуры растительного покрова таежных геоконплексов / Ландшафтные методы лесного картографирования. – Красноярск, 1987. – С. 62-72.

- [17] Седых В. Н. Аэрокосмический мониторинг лесного покрова. – Новосибирск: Наука, 1991. – 239 с.
- [18] Калашников Е.Н. Комплексное картографирование лесных ландшафтов. Автореф. Дисс. ... Докт. Биол. Наук. 2002. – 49 с.
- [19] Фарбер С. К., Кузьмик Н. С., Брюханов Н. В. Погрешности дешифрирования лесов приангарья методом классификации пикселей спутникового снимка / Сибирский лесной журнал. Красноярск, 2016 С. 56-67
- [20] Ермошин В.В., Ганзей К.С. Ландшафтное картографирование Российской части бассейна реки Амур. География Вестник ДВО РАН. 2012. № 3. С. 13-20.

Глава III/20: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОЗАИКИ ХАНСЕНА ДЛЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННО-ГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ
Chapter III/20: The Use of Hansen Mosaics for Geoinformation Cartography of Forest Landscapes in Western Siberia

Екатерина И. Кузьменко*, **Юрий М. Семенов**, **Антон В. Силаев**, **Александр А. Фролов**
DOI 10.25680/3453.2018.62.17.213

*Эл. Почта: kuzmenko48@mail.ru

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Россия, г. Иркутск.

РЕЗЮМЕ. Представлены результаты изучения пространственно-временной организации таежных геосистем Западной Сибири. Разработана методика геоинформационного картографирования лесных геосистем с использованием программного обеспечения GIS Multispec и Quantum GIS для отражения динамических ландшафтных классификаций таежных территорий с целью составления ландшафтных и лесных карт. Синтез классических методов структурно-динамического ландшафтоведения в учении о геосистемах и классификации лесных геосистем с использованием современных ГИС-технологий, включающих многоуровневое автоматизированное дешифрирование космических снимков на основе использования Мозаики Хансена, позволил составить электронную ландшафтную карту изучаемой территории, учитывающую пространственно-временную дифференциацию лесных регионов. Автоматизированная обработка космических снимков дает возможность не только определить ландшафтную структуру геосистем, но и рассчитать площади различных классов фаций, антропогенно-нарушенных территорий (вырубок, гарей), соотношение лесных и заболоченных ландшафтов, а также вычислить площади натечного увлажнения в пойменных комплексах, которые существенно меняются в течение весенне-летнего периода.

Abstract. We present study results about the spatio-temporal organization of taiga geosystems in Western Siberia. A methodology for geoinformation mapping of forest geosystems using the GIS Multispec and Quantum GIS software was developed to reflect the dynamic landscape classifications of taiga territories for the purpose of compiling landscape and forest maps. A synthesis of classical methods of structurally-dynamic landscape studies and the classification of forest geosystems using modern GIS technologies, including multi-level automated decoding of space images based on the use of Hansen Mosaics, made it possible to compile an electronic landscape map of the study area, taking into account the spatio-temporal differentiation of forest regions. Automated processing of space images enabled not only to determine the landscape structure of geosystems, but also to calculate the areas of different classes of facies, anthropogenically disturbed areas (felling areas, bogs), the ratio of forest and marsh landscapes, and also to calculate the areas of inundation in floodplain complexes that vary significantly during the spring-summer period.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лесные геосистемы, структурно-динамическое ландшафтоведение, антропогенное воздействие, автоматизированное дешифрирование и классификация космических снимков, геоинформационное картографирование.

Keywords: forest geosystems, structurally-dynamic landscape studies, anthropogenic impact, automated interpretation and classification of space images, geoinformation mapping.

ВВЕДЕНИЕ

На таежных территориях Западной Сибири с высокой антропогенной нагрузкой важно сохранение природоохранных функций с выделением защитных участков лесных ландшафтов, которые составляют основу экологического каркаса региона путем установления в них щадящего режима природопользования.

Изучение пространственно-временной организации геосистем позволяет получить представление об их типологической структуре, динамике и региональных изменениях таежных ландшафтов Западной Сибири для создания основы природоохранного зонирования и районирования территории.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применение ГИС-технологий чаще используется при составлении карт лесной растительности. Для картографирования на региональном уровне особенно интересен аспект обработки мозаики LANDSAT по Хансену, являющейся разработкой Мерилендского университета (США) при создании карты «Global Forest Change 2000-2013» [1]. Одна сцена мозаики представляет собой набор совмещенных снимков на территорию 4 x листов топографических карт миллионного масштаба в системе координат WGS-84. Оперативные карты лесных регионов планеты, составленные на основе снимков Landsat, позволяют определять убыль лесных площадей за счет вырубок, гарей, вымывания и т. д. и прибыль за счет облесения вырубок, гарей и других нарушенных площадей за определенный интервал времени.

Для картирования современного состояния структуры лесов выбрана территория Приобья в рамках мозаики Хансена (60^0-70^0 с.ш. - 60^0-70^0 в.д.). В нашем примере она охватывает территорию Западной Сибири в рамках средней, северной тайги и лесотундры от среднего Приобья до впадения реки Обь в Обскую губу, куда входят регионы: Нижнее Приобье, Кондо-Сосьвинское Приобье, Белогорский материк, Казым-Обское междуречье, Кондинская низменность, Нижнее Прииртышье Приполярный и Полярный Урал.

Особенностью карты «Global Forest Change 2000-2013» является отсутствие структурной дифференциации лесных регионов по типам леса, или классификационным единицам ландшафтного или геоботанического картографирования. При создании карты учитывались только лесные и не лесные площади. Следовательно, статистика динамики площадей не отвечает на важный вопрос: каких лесов (например, сосновых, еловых или кедровых) стало больше или меньше на картографируемой территории, какова их ресурсная ценность относительно занимаемой площади, и на какие лесные комплексы акцентировать внимание на восстановление. С этой точки зрения особенно актуальна оценка лесотипологической и ландшафтной пространственно-временной организации лесных территорий на основе классификаций лесной типологии и структурно-динамического ландшафтоведения на региональном и глобальном уровне. При этом с сохранением сукцессионной и восстановительной динамики лесов при оценке переменных состояний геосистем [2].

Для предварительной оценки структуры лесного покрова и географической привязки лесных комплексов использовалась обработка мозаики Хансена пакетом ЕСНО с обучающими выборками сигнатур [2]. Детальная обработка мозаики Хансена проведена в программе Multispec частично по методике, используемой для автоматизированного дешифрирования отдельных снимков LANDSAT и с выделением классификационных единиц по классам типов леса (рис.1). Это характеризует геомерные структуры как на топологическом уровне, так и на высоком иерархическом уровне регионально-планетарного масштаба за счет генерализации в мелком масштабе. Для уточнения ландшафтной структуры территории в системе WGS-84 снимок совмещался с векторными слоями (рельефа, гидросети и др.) и электронной топоосновы Роскартографии (СК-42).

Особенностью методического подхода является следующее:

- Поскольку поле снимка охватывает значительную территорию и несколько природных зон, проекции используемые в мозаике Хансена и снимках Landsat различаются. При переносе выборок возникают сложности в результате сопоставления изображений, поэтому на первом этапе необходимо было перенести с LANDSAT уже существующие выборки с учетом координат и геометрически точно по эталонным участкам в программе Multispec.

На втором этапе, после переноса всех известных выборок, необходимо было добавить новые эталонные участки по лесам северотаежной подзоны и лесотундры в связи с увеличением территории исследования. Добавление новых, уточняющих участков с использованием растровых слоев на основе лесных карт и планов лесонасаждений позволило достоверно определить типы растительности и нанести обучающие выборки.

Легенда к карте биомов:

1. Реки, озера, протоки, соры, ручьи.
2. Антропогенные объекты: города, поселки, трассы газонефтепроводов, железные и автомобильные дороги.
3. Свежие гари, вырубки.
4. Скалы, останцы, песчаные пустыни, каменистые россыпи гольцового пояса Урала.
5. Лишайниковые тундры в сочетании с каменистыми россыпями горно-тундрового пояса.
6. Вейниково-канареечниковые пойменные луга и болота средней Оби.
7. Евтрофные болота приозерных и приречных местоположений на водоразделах.
8. Сосновые сфагновые ямы и олиготрофные болота водораздельных понижений.
9. Травяно-моховые болота.
10. Елово-березовые травяно-зеленомошные производные леса водоразделов и склонов.
11. Кедрово-еловые, елово-кедровые травяно-зеленомошные леса водоразделов и склонов.
12. Сосновые водораздельно-склоновые зеленомошные леса.
13. Молодые и средневозрастные сосновые леса, восстанавливающиеся на местоположениях сосновых лишайниковых лесов.
14. Сосновые лишайниковые боровые водораздельно-склоновые леса.
15. Лиственнично-сосновые и лиственничные кустарничково-лишайниковые северотаежные леса плоскоувалистых равнин.
16. Березово-сосновые сфагновые леса приболотных и придолинных местоположений.
17. Сосново-кедровые лишайниково-зеленомошные леса возвышенных водоразделов.
18. Зарастающие вырубки, гари.
19. Осоковые влажные пойменные луга и низинные болота нижней Оби.
20. Лиственничные лишайниково-кустарничковые редколесья в сочетании с плоскобугристыми болотами и ерниковыми тундрами.
21. Плокобугристые и крупнобугристые сфагново-лишайниково-кустарничковые болота.
22. Грядово-мочажинные болота.
23. Лиственнично – еловые зеленомошно-лишайниковые и кустарничково-моховые редкостойные леса в сочетании с кедровыми редколесьями.

- Далее проводилась корректировка классов типов леса и их обобщение в файле GIS, использовалась новая цветовая палитра.
- Разрабатывалась легенда к классифицированному изображению мозаики на уровне классов типов леса с учетом их размещения, рельефа, характера увлажнения, других лесорастительных свойств, наносился масштаб, координатная сетка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

- В процессе обработки одного снимка выделялись группы и классы типов леса. При переходе к региональному обобщению в рамках изучаемой территории они объединялись в биомы по морфоструктурным элементам мезорельефа с учетом его высотных ярусов, характеристик растительности, а также макрорегиональных ландшафтно-географических закономерностей (подзональных, провинциальных). Анализ лесотипологической структуры таежных комплексов позволил выявить их структуру в региональном аспекте. Среднетаежная бореальная темнохвойная тайга дренированных возвышенных и плакорных водоразделов (Печорско-Зауральская и Зауральская) представлена ядром кедрово-еловых, елово-кедровых, березово-кедрово-еловых мелкотравно-, бруснично-зеленомошных лесов в районе южной части Белогорского материка и фрагментами небольших площадей тайги на водоразделах среди олиготрофных болот Кондо-Сосьвинской возвышенности и возвышенностей Северо-Сосьвинского свода. При этом березовые и темнохвойно-березовые: кедрово-елово-березовые, сосново-елово-березовые с кедром леса водоразделов, являются восстановительными стадиями (преимущественно в 1-2 стадии формирования) кедрово-еловых и елово-кедровых лесов. Темнохвойно-сосново-березовые, сосново-березовые вос-

становительные стадии сосновых лесов также выделяются отдельными классами. Таким образом, сохраняется тенденция структурно-динамического подхода в обобщенном виде при автоматизированной классификации на довольно высоком иерархическом уровне.

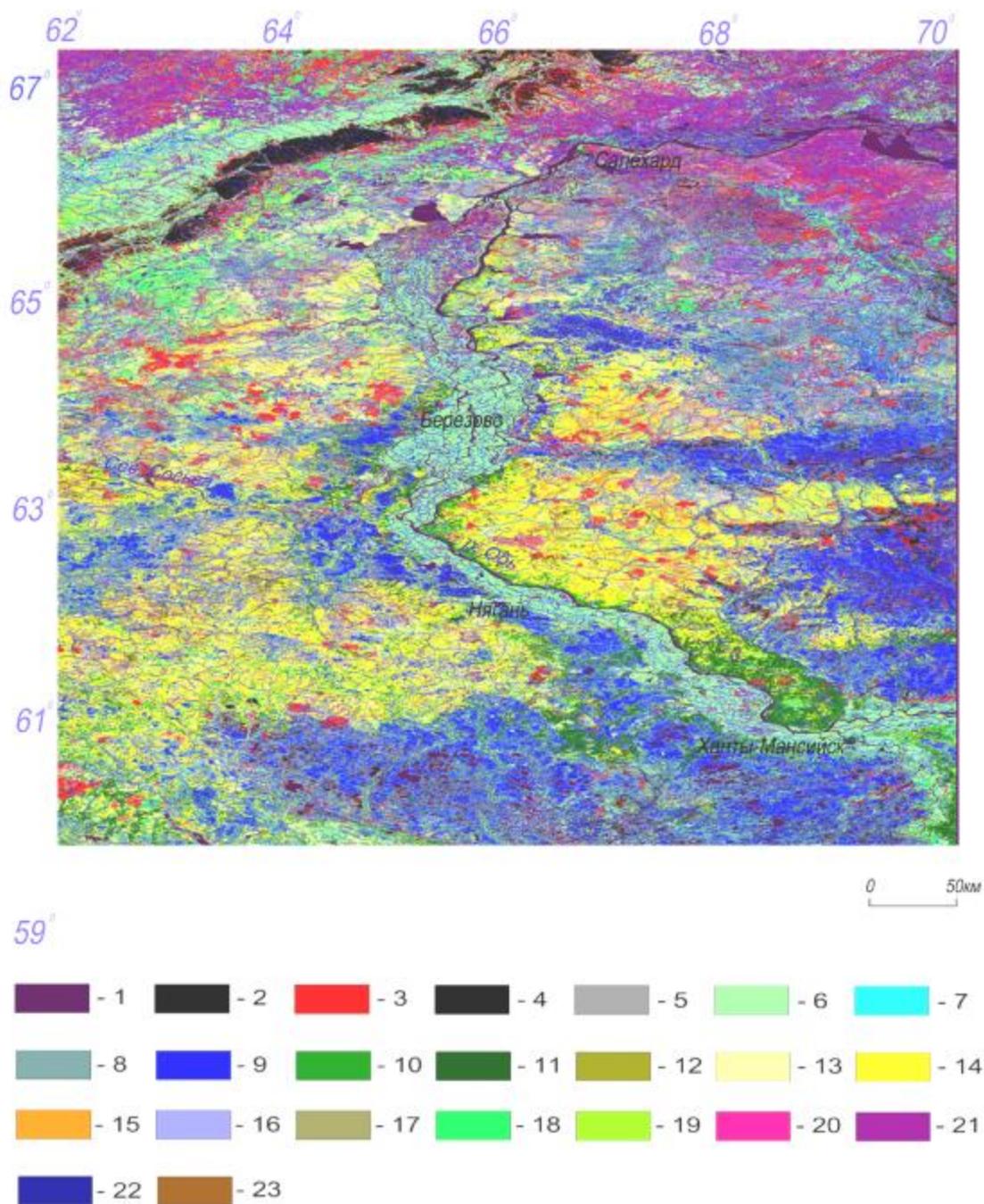


Рис. 1- Карта биомов как результат обработки мозаики Хансена на территорию северо-запада Западной Сибири и Приполярного и Полярного Урала с использованием обучающих выборок и алгоритма ЕСНО в GIS Multispec (сцена 70 N 060).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Автоматизированная обработка космических снимков позволяет быстро определить ландшафтную структуру на топологическом уровне, осуществить синтез типов леса в биомы на более высоком иерархическом уровне и рассчитать площади различных типов леса, антропогенно-нарушенных территорий (вырубок, гарей), соотношение лесных и заболоченных ландшафтов, а

также вычислить площади натежного увлажнения в пойменных комплексах, которые существенно меняются в течении весенне-летнего периода.

2. Использование данной методики позволяет осуществлять мониторинг изменений антропогенной нагрузки на геосистемы, связанной преимущественно с трансформацией их растительного компонента.

ЛИТЕРАТУРА

[1]Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend. 2013. "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change." *Science* 342 (15 November): 850–53. Data available on-line from: <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>.

[2]Кузьменко Е.И., Фролов А.А., Силаев А.В. Картирование лесных ландшафтов северо-запада Западной Сибири с использованием ГИС // География и природные ресурсы. - № 4, 2015. - с. 151 - 161.

Часть 9 Функции и взаимодействия животных в ландшафтах Part 9 Functions and Interactions of Animals in Landscapes

Основная глава 9.1 Беспозвоночные и рыбы Main Chapter 9.1 Invertebrates and Fish

Глава III/21: ПОЧВЕННЫЕ ПАНЦИРНЫЕ КЛЕЩИ (ОРИБАТИДЫ) КАК БИОИНДИКАТОРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ЭКОСИСТЕМЫ (ОБЗОР) Chapter III/21: Soil Oribatid Mites as Bioindicators of Human Impacts on Ecosystems (Review)

Владислав С. Андриевский, Павел А. Барсуков*

DOI 10.25680/2583.2018.30.49.214

*Эл. Почта: go2siberia@gmail.com

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева 8/2, 630090, Новосибирск, Россия

РЕЗЮМЕ. Сделан обзор основных публикаций по использованию панцирных клещей (орибатид – *Oribatida*) в биоиндикации пяти типов антропогенных нарушений в различных экосистемах Азиатской и Европейской частях России: промышленное загрязнение, нефтезагрязнение, горные разработки (отвалы и карьеры), антропогенные воздействия в пахотных агроэкосистемах, радиационное загрязнение. Для всех типов антропогенных нарушений биоиндикация проводится путем отслеживания изменений количественных (общая численность и видовое богатство) и качественных (видовой состав, соотношение доминантных видов и экологических групп) параметров сообществ панцирных клещей, а также выявления видов-индикаторов конкретных типов антропогенного воздействия. С помощью биоиндикации по орибатидам возможно оценить характер и степень нагрузки на экосистемы, а также этапы и скорости их восстановления после нарушения.

Abstract. The paper represents a review of the main publications on the use of oribatid mites (*Oribatida*) in bioindication of five types of anthropogenic disturbances in various ecosystems of the Asian and European parts of Russia: industrial pollution, oil pollution, mining (dumps and quarries), and different man-made impacts in arable agroecosystems, and radiation pollution. Bioindication is carried out for all types of anthropogenic disturbances by monitoring the changes in quantitative (total number of individuals and species richness) and qualitative (species composition, ration of dominant species and of ecological groups) parameters of communities of oribatid mites, as well as identifying species-indicators of specific types of anthropogenic impact. It is possible with the use of bioindication on oribatids to evaluate the nature and degree of anthropogenic impacts on ecosystems, as well as the stages and rates of their recovery after the disturbance.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: биоиндикация, панцирные клещи, орибатиды нарушенные ландшафты, типы антропогенных воздействий, параметры сообществ, виды-индикаторы.

Keywords: bioindication, oribatid mites, disturbed landscapes, types of anthropogenic influence, community parameters, indicator species.

ВВЕДЕНИЕ

Биоиндикация – это выявление и определение биологически и экологически значимых антропогенных нагрузок на основе реакций на них живых организмов и их сообществ. В полной мере это относится ко всем видам антропогенных влияний. В почве, как аккумулятивной среде, населенной жизнью во всех ее формах, перспективно искать организмы-индикаторы [1]. Одной из самых репрезентативных для биоиндикации групп среди почвенных животных можно считать микроартропод, а среди последних – панцирных клещей (орибатид - *Oribatida*). Индикационная ценность орибатид определяется присутствием представителей этой таксономической группы во всех типах почв, географических регионах и ландшафтных зонах (от Арктики до Антарктики), высокой численностью, систематическим и экологическим разнообразием, способностью выживать в экстремальных условиях, быстрой реакцией на изменения среды обитания, а также простотой сбора и выгонки из почвенных образцов [2].



Рисунок 1 - В качестве примера почвенных панцирных клещей на рисунках А и В представлены фотографии двух распространенных видов орибатид – представителей подстильно-верхнепочвенной экологической группы: **Belba compta** и **Pergalumna willmanni**, соответственно. Морфологически эти виды отличаются по многим признакам, но наиболее контрастно – по наличию хорошо развитых выступов на переднем боковом крае тела (так называемых птероморф) у вида **Pergalumna willmanni** и их отсутствием у вида **Belba compta**. Фотографии любезно предоставлены и печатаются с разрешения г-жи Riikka Elo, Zoological museum, University of Turku, Finland (https://www.researchgate.net/profile/Riikka_Elo).

Благодаря указанным качествам орибатиды используются в качестве «модельной группы» для биоиндикации. Широкой аудитории известны обзоры по этой теме, опубликованные на английском языке [3, 4, 5, 6]. Результаты исследований на русском языке менее доступны, в том числе из-за их публикаций в периферийных изданиях (материалы конференций, региональные сборники с

мизерными тиражами пр.). В нашей статье приводится обзор основных публикаций русских исследователей по использованию орибатид как биоиндикаторов антропогенных нарушений в природных экосистемах / ландшафтах Азиатской и Европейской частей России.

ПРОМЫШЛЕННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

В городских биотопах города Новосибирска, расположенного в лесостепной зоне Западной Сибири, изучали влияние загрязнения почв тяжелыми металлами и мышьяком от выбросов промышленных предприятий на сообщество панцирных клещей [7]. Отмечено в целом негативное воздействие промышленного загрязнения на орибатид: вблизи источников загрязнения количественные показатели (общие численности и видовое богатство) орибатид – были наименьшие, а на удалении от источника загрязнения они возрастают. Изменяется сообщество панцирных клещей и на качественном уровне: ряд видов, характерных для естественных экосистем, в нарушенных полностью исчезает, а другие виды демонстрируют снижение своей численности. Такие виды можно назвать «индикаторами чистоты экосистем». Представители другой категории видов, наоборот, увеличивают долю своего участия в составах нарушенных сообществ. Их можно назвать «индикаторами промышленного загрязнения», причем, некоторые из них индицируют разные уровни такого загрязнения.

Влияние загрязнения от объектов газодобывающей промышленности (газы, аэрозоли и пр.) изучалось в южно-тундровой подзоне Западной Сибири [8]. Были выявлены весьма специфические взаимосвязи между уровнем загрязнения атмотехногенными поллютантами и панцирными клещами. Видовое богатство сообщества орибатид почти не меняется, а их суммарное обилие даже возрастает вблизи источников выбросов. Однако, при этом меняется качественный состав сообщества: вблизи источника загрязнения превалирует группа мелких видов, адаптированных к нарушениям среды обитания, а доля крупных подстилочно-верхнепочвенных видов составляет лишь 11-17%. По мере удаления от источника загрязнения соотношение этих экологических групп меняется на противоположное. Таким образом, в условиях сравнительно «мягкого» загрязнения от объектов газодобывающей промышленности в тундровых экосистемах орибатиды несомненно могут являться биоиндикаторами промышленного загрязнения. При этом параметром индикации является качественный показатель - соотношение экологических групп видов, а не количественные – численности и видовое богатство.

В условиях «жесткого» загрязнения тяжелыми металлами в зоне техногенного воздействия предприятий «ГМК Норильский никель» в лесотундровой зоне Средней Сибири для сообщества панцирных клещей характерна та же закономерность: превалирование мелких видов над крупными подстилочными видами. Количественные показатели (видовое богатство и численности) дают обычную картину при значительных нарушениях среды: они малы вблизи источника загрязнения, и возрастают по мере удаления от него [9].

НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЕ

Влияние загрязнения нефтью на сообщество панцирных клещей исследовалось в подзоне северной тайги Западно-Сибирской равнины [10]. Было выявлено, что орибатиды весьма устойчивы к действию нефтезагрязнения: они полностью не исчезают даже в непосредственной близости от скважины, где уровень загрязнения максимален, хотя их численности и видовое богатство весьма малы. Уже на некотором удалении (100-200 метров) от скважины эти показатели заметно возрастают. Показатель числа видов здесь приближается к таковому в ненарушенной контрольной (естественной) экосистеме – верховом грядомочажинном болоте. Численность же, увеличиваясь более чем на порядок по сравнению с участком рядом со скважиной, тем не менее, почти в 20 раз уступает таковой в контрольной экосистеме. Это свидетельствует о слабой степени восстановления сообщества на таком небольшом расстоянии от источника загрязнения. Таким образом, сообщество орибатид при нефтезагрязнении природных экосистем может индицировать степень загрязнения и удаленность от его источника.

Сходные результаты получены на Европейском Севере России (Республика Коми) в условиях крайнесеверной тайги. [11]. Выявлено, что панцирные клещи здесь очень чувствительны к нефтезагрязнению. Они полностью отсутствуют на первых этапах (непосредственно после загрязнения), появляются на поздних его стадиях и изменяются количественно и качественно с течением времени в ходе восстановления экосистемы после нефтезагрязнения. Итак, сообщество орибатид при нефтезагрязнении может индицировать как степень нарушения экосистем, так и стадии их восстановления после нарушения.

ОТВАЛЫ И КАРЬЕРЫ ГОРНЫХ РАЗРАБОТОК

Сообщества панцирных клещей изучали на отвалах горных пород, образованных при добыче бурого угля на трех территориях, географически значительно удаленных друг от друга: (1) в лесной зоне Европейской части России (Тюльская область) [12], (2) в лесостепной зоне Средней Сибири (Красноярский край, Назаровская котловина) [13] и (3) в подзоне северной тайги Западно-Сибирской равнины [14]. Все изученные отвалы и карьеры относились к трем возрастным категориям: «молодые» (от 1 года с момента образования отвала), «средневозрастные» (3-12 лет) и «старые» (25-30 лет). Несмотря на существенные отличия исследуемых объектов, изменение сообществ панцирных клещей в разновозрастных отвалах демонстрировало некоторые общие закономерности. Заселение орибатидами нарушенных горными разработками участков начинается сразу после отсыпки отвалов. На начальной стадии восстановительной сукцессии после отсыпки отвалов и карьеров все исследователи отмечают «крайнюю бедность» видового состава орибатидных сообществ. На средних стадиях сукцессии происходит увеличение видового богатства и численности орибатид, но с разной скоростью. В лесной зоне Европейской части России видовое богатство с возрастом отвала нарастает медленнее, чем в лесостепной зоне и в северной тайге Сибири. Даже на «старых» отвалах сообщества орибатид (по обилию видов) значительно беднее таковых в соответствующих фоновых (естественных) экосистемах. Численности орибатид, наоборот, на «старых» отвалах превосходят таковые в фоновых экосистемах. В лесостепи и северной тайге Сибири приближение сообщества орибатид к фоновым экосистемам по численностям и видовому богатству выражено более явно. По видовому составу сообщества орибатид отвалов всех исследованных регионов значительно отличаются друг от друга. Объединяет их то, что на «старых» отвалах набор видов значительно отличается от такового в фоновых экосистемах. Это говорит о восстановлении сообществ только в количественном отношении, но не в качественном. В отвалах и карьерах каждого региона выявлены свои характерные виды-индикаторы нарушений при горных разработках в целом, а также виды-индикаторы, соответствующие разным стадиям восстановления нарушенных экосистем.

АНТРОПОГЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ В ПАХОТНЫХ АГРОЭКОСИСТЕМАХ

В целом ряде публикаций, посвященных трансформации естественных экосистем в пахотные агроэкосистемы, показано, что, несмотря на некоторые различия регионального характера, а также различия, связанные с особенностями обработки почв и возделываемых культур, в пахотных почвах складывается фаунистически резко обедненный комплекс орибатид, отдельные виды которого могут достигать значительной численности [15, 2]. Заселяют пахотную почву преимущественно виды «глубокопочвенной» (эуэдафической) экологической группы, тогда как виды другой экологической группы – крупные подстильно-верхнепочвенные орибатиды – почти исчезают. Численность и видовое разнообразие панцирных клещей сокращается в несколько раз в пахотных почвах по сравнению с почвами естественных экосистем. Сообщество орибатид пахотных почв по-разному реагирует на вид выращиваемой сельскохозяйственной культуры и способ ее возделывания. Население орибатид в почве под разными сельскохозяйственными культурами отличается по численности, видовому богатству и составу видов. Численности панцирных клещей под разными культурами различаются в 1.5 – 7.0 раз. В монокультуре численность, как правило, ниже, чем в севообороте. Количество видов и видовое разнообразие орибатид заметно варьируют в зависимости от возделываемой сельскохозяйственной культуры и региона ее возделывания. Выявлены виды орибатид, доминирующие в любых агроценозах и виды, избирательно относящиеся к различным культурным растениям [16]. Суммируя имеющиеся данные разных авторов, можно считать установленной индикационную ценность таксоцена панцирных клещей (орибатид) для оценки различных антропогенных воздействий в агроэкосистемах. По изменению численных параметров сообщества и соотношения видов орибатид разной экологической природы, а также по обнаружению видов-индикаторов можно индцировать различные антропогенные воздействия (преимущественно возделываемые сельскохозяйственные культуры, интенсивность землепользования и пр.) в пахотных агроэкосистемах.

РАДИАЦИОННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

Действие радиоактивного загрязнения на сообщество панцирных клещей изучалось в различных битопах под мелколиственной лесной (березы) и луговой растительностью [17, 18, 19, 20]. Было установлено, что средняя численность орибатид при радиоактивном загрязнении уменьшалась почти вдвое. Видовое разнообразие тоже уменьшилось, но в меньшей степени. При этом радиоактивное загрязнение оказывало различное влияние на разные экологические группы панцирных клещей. Если на обилие подстилочно-поверхностных форм орибатид загрязнение заметно не сказывается, то глубокопочвенные виды теряют при загрязнении от 25 до 50 % численности. Особую значимость приобрели исследования действия радиационного загрязнения на сообщества панцирных клещей после аварии на Чернобыльской Атомной Электростанции (ЧАЭС) 26 апреля 1986 года [20], где уровень воздействия на сообщество орибатид оказался заметно сильнее, чем было выявлено ранее в экспериментальных работах. Было отмечено, что видовое разнообразие сообществ орибатид снизилось более чем вдвое, а их численности – более чем в четыре раза. Особо уязвимыми оказались виды подстилочно-поверхностной экологической группы. Представители другой экологической группы – глубокопочвенных видов – были подвержены влиянию загрязнения в меньшей степени. Уже через 2-2.5 года после аварии сообщество панцирных клещей полностью восстановилось на расстоянии более 3 км от ЧАЭС. Таким образом, при радиационном загрязнении изменения в сообществах орибатид могут индцировать степень загрязнения экосистем на начальном его этапе и скорость их восстановления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Таксоцен панцирных клещей (орибатид), благодаря своим свойствам, используется в качестве биоиндикатора разных типов антропогенных воздействий на экосистемы.
2. С помощью такой биоиндикации устанавливаются характер и степень нарушений экосистем, а также отслеживаются этапы и скорость их восстановления после нарушения.
3. Биоиндикация заключается в фиксации изменений основных параметров сообществ орибатид: количественных (общая численность и видовое богатства) и качественных (видовой состав, соотношение доминантных видов и экологических групп).
4. В ряде случаев выявляются конкретные виды и группы видов орибатид – индикаторов определенных типов антропогенных нарушений экосистем, степени нарушения и стадии их восстановления.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Криволицкий, Д.А. 1994. Почвенная фауна в экологическом контроле. Наука, Москва, 272 с.
- [2]Криволицкий, Д.А. 1978. Панцирные клещи как индикаторы почвенных условий. – Итоги науки и техники. Серия зоология беспозвоночных. Почвенная зоология. Москва, Т. 5, 70-134.
- [3]Lebrun, Ph., van Straalen, N.M. 1995. Oribatid mites: prospects in their use in ecotoxicology – *Experimental & Applied Acarology* 19: 361-379.
- [4]Behan-Pelletier, V.M. 1999. Oribatid mite biodiversity in agroecosystems: role for bioindication. – *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74: 411-423.
- [5]Gulvik, M.E. 2007. Mites (Acari) As Indicators of Soil Biodiversity and Land Use Monitoring: a Review. – *Pol. J. Ecol.* 55(3): 415-440.
- [6]Gergocs, V., Hufnagel, L. 2009. Application on Oribatid mites as indicators (review). – *Applied ecology and environmental research* 7(1), 79-98.
- [7]Андреевский, В.С., Сысо, А.И. 2012. Влияние разных типов антропогенного изменения почв на сообщества панцирных клещей в городских экосистемах. – *Сибирский экологический журнал* 6: 811-818.
- [8]Andrievskii, V.S., Barsukov, P.A., Bashkin, V.N. 2015. Application of Soil Oribatid Mites as Bioindicators in Impact Areas of the Gas Industry in the West Siberian Tundra. – *The Open Ecology Journal* 8: 32-39.
- [9]Безкоровайна, И.Н. 2014. Комплексы почвенных беспозвоночных лесотундры в условиях техногенного загрязнения. – *Сибирский экологический журнал* 6: 1017-1024.
- [10]Мордкович, В.Г., Андреевский, В.С., Березина, О.Г., Любечанский, И.И., Марченко, И.И. 2004. Животное население как индикатор экологического состояния почв западно-сибирского севера под влиянием нефтезагрязнений. – *Сибирский экологический журнал* 4: 467-474.
- [11]Мелехина, Е.Н. 2007. Влияние нефтяных загрязнений на почвенную микрофауну тундровых сообществ крайнесеверной тайги. – *Экология человека* 1: 16-23.

- [12]Бабенко, А.Б. 1980. Некоторые закономерности формирования комплекса почвенных микроартропод на отвалах открытых горных разработок. – Зоологический журнал LIX: 43-54.
- [13]Стебаева, С.К., Андриевский, В.С. 1997. Ногохвостки (Collembola) и панцирные клещи (Oribatei) на буроугольных отвалах Сибири. – Зоологический журнал 76 (9): 1004-1015.
- [14]Андриевский, В.С. 2003. Динамика сообщества панцирных клещей (орибатид) в естественных и нарушенных экосистемах северной тайги Западной Сибири. – Вестник Томского государственного университета Приложение № 7: 7-15.
- [15]Чернова, Н.М., 1977. Экологические сукцессии при разложении растительных остатков. Наука, Москва, 200 с.
- [16]Алейникова, М.М., 1976. Животное население почв и его изменение под влиянием антропогенных факторов. – Pedobiologia 16 (3): 195-205.
- [17]Гиляров, М.С., Криволицкий, Д.А. 1971. Радиоэкологические исследования в почвенной зоологии. – Зоологический журнал L(3): 329-342.
- [18]Криволицкий, Д.А., Кожевникова, Т.Л., 1972. Действие радиоактивного загрязнения на комплексы почвенной микрофауны луговых почв. – Экология 2: 69-74.
- [19]Криволицкий, Д.А., Федорова, М.Н. 1973. Действие загрязнения почвы плутонием-239 на фауну полей. – Зоологический журнал LII(4): 601-603.
- [20]Криволицкий, Д.А., Покаржевский, А.Д., Усачев, В.Л., Шеин, Г.Н., Надворный, В.Г., Виктор, А.Г. 1990. Влияние радиоактивного загрязнения среды на фауну почв в районе Чернобыльской АЭС. – Экология 6: 32-42.

**Chapter III/22: ANALYSING DISTRIBUTION PATTERNS OF SPRING HABITATS OF
INVERTEBRATE COMMUNITIES IN GERMANY**

Глава III/22: Анализ закономерностей распределения местообитаний беспозвоночных сообществ в ручьях Германии

Martin Reiss

DOI 10.25680/7375.2018.71.16.215

Email: reissm@geo.uni-marburg.de

Philipps-Universität Marburg, Department of Geography, Deutschhausstr. 10, 35037 Marburg, Germany

ABSTRACT. Microhabitat heterogeneity within an entire spring ecotone is determined by a spatial based arrangement of individual substrate types. Microhabitat presence and its coverage determining hydro-morphological structures and substrate diversity in springheads. The latter has a directly impact on biodiversity. Specific taxa substrate preferences must have an effect on the distribution of invertebrates in springhead communities. A new method of a multi-habitat sampling is briefly described here to introduce a practicable approach to quantify substrate preferences in springs within a fauna-habitat relationship. It combines fauna sampling and microhabitat mapping of springs as ecotones, whereby aquatic, semi-aquatic and terrestrial transition zones are integrated. The method was developed and tested within a comprehensive study of forest springs of the German low mountain ranges in Hesse and Thuringia in Central Germany. Test results showing high substrate preferences for some taxa of all transition zones within the entire springhead. The importance of substrate types can be characterized by quantifying fauna preferences and microhabitat traits can be qualitatively analyzed by autecological information of found taxa.

Резюме. Неоднородность микросред обитания во всем экотоне родников определяется пространственной структурой отдельных типов субстратов. Наличие микросред и их пространственное распределение, определяются гидроморфологическими структурами и разнообразием почв в истоках рек. Последнее оказывает непосредственное влияние на биоразнообразие. Специфические предпочтения субстрата таксонами должны влиять на распределение беспозвоночных в сообществах родников. В данной работе кратко описан новый метод отбора проб из нескольких местообитаний для внедрения практического подхода к количественной оценке предпочтений субстратов родников в рамках взаимосвязи фауна-среда обитания. Он сочетает в себе отбор образцов фауны и картографирование микросред обитания родников в виде экотонов, в которые включены водные, полуводные и наземные переходные зоны. Метод был разработан и испытан в рамках всестороннего изучения лесных родников низких горных хребтов в Гессе и Тюрингии в Центральной Германии. Результаты исследований показывают значительное предпочтение субстрата некоторыми таксонами во всех переходных зонах в пределах всего родника. Важность типов субстратов может быть охарактеризована путем количественной оценки предпочтений фауны, а характеристики микросред обитания могут быть качественно проанализированы с помощью автоэкологической информации о найденных таксонах.

KEYWORDS: springhead, microhabitat, fauna sampling, substratum, eucrenal, eucrenon, patchiness

Ключевые слова: исток реки, микросреда обитания, отбор образцов фауны, субстрат, весенняя фауна, пятнистость

INTRODUCTION

Springs are places where groundwater is flowing naturally from the bedrock or soil onto the land surface or into a body of surface water [1] (Fig. 1). The springhead (eucrenal) forms a particular biocenosis called a eucrenon [2]. The eucrenal is an ecotone at the groundwater-surface water and the aquatic-terrestrial habitat interfaces, which is relevant for environmental abiotic habitat conditions and the occurrence and composition of the invertebrate community. Spring water discharging from non-geothermally heated groundwater shows mostly low water temperature regimes with low amplitudes [3]. The resulting hydrochemical conditions are characterized by oligotrophic water quality within low dissolved matter content depending on the groundwater conditions of the aquifer [4]. Therefore, springs are considered physicochemically stable but complex and taxa rich as they have a mosaic structure, a high degree of individuality, and an azonal character [5]. The faunistic composition and biodiversity are controlled by spatial heterogeneity [6] and determine the composition of the substrate types [7,8]. However, the fauna-microhabitat relationship within substrate types of springheads has not been studied sufficiently and no adequate quantifying method has been performed for spring fauna substrate preferences. Here, a methodical approach is used to fill that gap to quantitatively describe and qualitatively assess substrate preferences of invertebrates in springheads as an ecotone.

AIM OF THE METHOD

The method characterizes invertebrate distribution patterns in spring ecotones by quantifying substrate preferences to analyze taxa presence within a microhabitat-fauna relationship.

PRINCIPLE AND PROCEDURE

Principle: The method is based on a hierarchical spatial framework for spring habitats [9] whereby the mosaic structure of the entire springhead is viewed as a complex structure built up by different mineral (e.g., silt or gravel) and organic (e.g., leaf litter or woody debris) substrate types that are microhabitats in their own right. A substrate type is the smallest habitat unit (or a patch) and a relatively homogeneous minor area where species occur. The assessment approach is an integrative field method combining microhabitat mapping within an estimation method (area coverage of substrate types) and limnological fauna sampling techniques, depending on the representativeness of substrate types. It is a multi-habitat sampling technique with a 2-layer approach (Fig. 2), which involves taking the area of the whole springhead ecotone [5] as a reference surface (normally between 5 and 10 square meters). Mineral and organic substrate types are considered as individual layers of microhabitats. Substrate type nomenclature follows the limnological classification of microhabitats used to assess habitat preferences within the EU Water Framework Directive [10,11].



Figure 1 – Springs as integrative habitats within the landscape. A: Subarctic Spring in the Highlands of Iceland; B: Temperate Spring in the Low Mountain Ranges of Germany. Photos: Martin Reiss.

Procedure: 1) Microhabitat mapping: The procedure is similar to the STAR/AQEM method [11] and is configured for sampling substrate types in proportion to their presence within a springhead. A sample consists of 20 sub-samples taken from all microhabitat types at each layer with a share of at least 5% coverage (mineral and organic layer separately). A comparison tablet was used to estimate the coverage of substrate types [12] and all mapped data was documented in a project specific prepared protocol and database [13]. 2) Fauna sampling: For each sub-sample, a substrate-specific sampling technique is performed for 2 minutes over a 10 cm by 10 cm reference area for each micro habitat. For example, if a substrate type covers 20% of the plot, sampling procedure (2 minutes) should be repeated four times for each 5% coverage class (8 minutes in total). An accurate and small handheld net sampler was used with a mesh width of 100 μm for aquatic organisms as surber samplers for kick sampling are not practicable. Spring steel tweezers were used to collect invertebrates in semi-aquatic and terrestrial parts of the spring ecotone. Fauna was preserved in ethanol alcohol (90 %) and stored in small (6 ml) Wheaton polyethylene jars for each microhabitat. Determination must take place in the lab because of the complex taxonomic richness and because on-site identification with the naked eye is not possible, especially for meiofauna organisms (body size between 0,30 mm and 1 mm). The organisms were taxonomically ordered and archived. The relative frequency (f_i) was calculated ($f_i = n_i/N$; n_i : absolute frequency; N : total number of samples) to compare the habitat type occurrence of the different substrate types.

This novel approach of a multi-habitat sampling for springhead ecotones is an integrative part of a comprehensive spatial-functional based mapping and assessment concept for springs [9].

TEST RESULTS

One hundred fifty-two (152) forest springs (mostly helocrenes) were investigated. These springs emerge diffusely in a marshy, wet substrate setting rather than having a discrete source) located in the central area of the German low mountain ranges were mapped and analyzed. A detailed characterization of individual substrate types of, mostly undisturbed, pristine springheads was performed. Regarding the coverage of the mineral substrate layer, fine mineral microhabitats dominate slightly. The organic substrate types are dominated by microhabitats like leaf litter, emergent macrophytes, and woody debris. The results about the substrate preferences of the fauna reflect the most highly covered microhabitats within a very high frequency of specific taxa. The results also characterize qualitative aspects, like choosing a specific food source. In oligotrophic springheads, organic matter is an important substrate as a food basis and organic substrate types are the most preferred microhabitats within the spring ecotone. Furthermore, substrate types were aggregated to build clustered groups of microhabitats. The most dominant aggregated microhabitat type is the organic-dominated, fine-material-abounded type with a significant fauna preference of specific taxa. In comparison to pristine springs, degradation of hydro-morphological structures within artificial substrate types shows very low biodiversity. Possible dynamic changes in the coverage of substrate types have been shown in another one-year study of assorted springheads (helocrenes). Here, very small parts of the substrate types changed and coverage dynamics might be marginal (without knowledge from long term studies). Nevertheless, this method provides results of the coverage on substrate type distribution as a temporal snapshot. Detailed results are given by the author in [13].

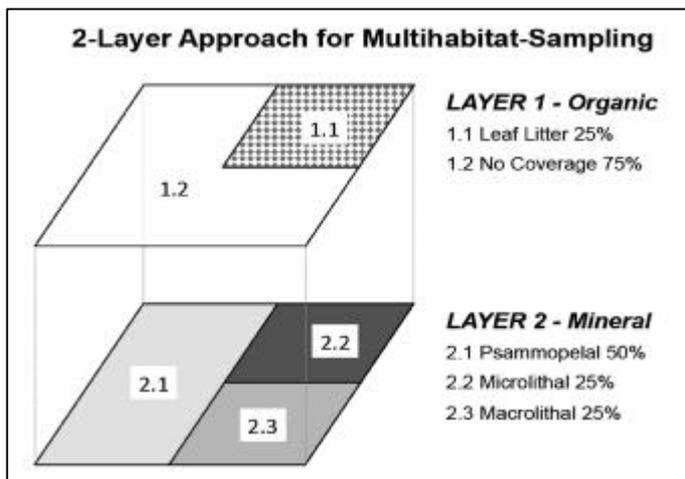


Figure 2 – The 2-Layer-Approach for springhead ecotones.

APPLICATION

The method of a multi-habitat sampling for springhead ecotones is applicable for quantifying substrate preferences of invertebrates and to characterize important autecological information of habitat parameters, which are often missing for spring-dwelling taxa. Standardization for practical use in water management to assess springheads in headwater regions is still lacking. The method is a promising complement for existing spring assessment programs, especially to map and quantify microhabitats and substrate richness and to evaluate the substrate preferences of the fauna.

CONCLUSIONS

The method characterizes invertebrate distribution patterns in spring ecotones by quantifying substrate preferences to analyze taxa presence within a microhabitat-fauna relationship.

Specific taxa substrate preferences for microhabitats in springheads can be ascertained which allows for quantitative eco-limnological-hydro-morphological assessment for springs.

Negative effects on structural degradation can be measured within a comparison of pristine and artificial substrate types and its substrate specific inhabitants (number of taxa occurrences and individuals).

The method is supported and has potential for application in and adaption for water management and nature conservation management programs. However, further research is recommended for long-term studies in more hydrodynamic springhead systems, especially for rheocrenic springs with a higher and temporally stable discharge.

REFERENCES

- [1] Wilson, W. E., Moore, J. E. 2003. Glossary of Hydrology. Springer, Berlin et al. 249 p.
- [2] Illies, J., Botosaneanu, L. 1963. Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologique des eaux courantes, considérées surtout du point de vue faunistique. Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie, Mitteilungen, 12. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. 57 p.
- [3] von Fumetti, S., Nagel, P., Baltes, B. 2007. Where a springhead becomes a springbrook – a regional zonation of springs. *Fundamental and Applied Limnology/Archiv für Hydrobiologie*, 169(1), 37-48.
- [4] van der Kamp. 1995. The Hydrogeology of Springs in Relation to the Biodiversity of Spring Fauna: A Review. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 68(2), 4-17.
- [5] Cantonati, M., Gerecke, R., Bertuzzi, E. 2006. Springs of the Alps – sensitive ecosystems to environmental change: from biodiversity assessments to long-term studies. *Hydrobiologia*, 562(1), 59-96.
- [6] Cantonati, M., Füreder, L., Gerecke, R., Jüttner, I., Cox, E.J. 2012. Crenic habitats, hotspots for freshwater biodiversity conservation: toward an understanding of their ecology. *Freshwater Science*, 31(2), 463-480.
- [7] Hahn, H.J. 2000. Studies on classifying of undisturbed spring in Southwestern Germany by macrobenthic communities. *Limnologica*, 30(3), 247-259.
- [8] von Fumetti, S., Nagel, P., Scheifhacker, N., Baltes, B. 2006. Factors governing macrozoobenthic assemblages in perennial springs in north-western Switzerland. *Hydrobiologia*, 568, 467-475.

- [9]Reiss, M. 2013. An integrative hierarchical spatial framework for spring habitats. *Journal of Landscape Ecology*, 6(2), 65-77.
- [10]Schmedtje, U., Colling, M. 1996. *Ökologische Typisierung der aquatischen Makrofauna*. München: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft. 548 p.
- [11]Hering, D., Moog, O., Sandin, L., Verdonshot, P. F. 2004. Overview and application of the AQEM assessment system. *Hydrobiologia*, 516, 1-20.
- [12]Gehlker, H. 1977. Eine Hilfstafel zur Schätzung von Deckungsgrad und Artmächtigkeit. *Mitteilungen der Florist.-Soziol. Arbeitsgemeinschaft N.F.*, 19/20, 427-429.
- [13]Reiss, M. 2011. Substratpräferenz und Mikrohabitat-Fauna-Beziehung im Eukrenal von Quellgewässern. <http://dx.doi.org/10.17192/z2011.0108>. Philipps-Universität Marburg, Germany. 244 p.

Chapter III/23: COMMUNITY ECOLOGY OF AQUATIC INSECTS: A LANDSCAPE PERSPECTIVE

Глава III/23: Экология сообществ водных насекомых: ландшафтная перспектива

Viktor Baranov¹; Gregor Kalinkat^{*2}

DOI 10.25680/2816.2018.71.88.216

*Email: gkalinkat@gmail.com

1.Dept. of River Ecology and Conservation, Senckenberg Research Inst. and Natural History Museum Frankfurt, Clamecystraße 12, 63571 Gelnhausen, Germany

2.Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries (IGB), Dept. Ecology and Biology of Fishes, Müggelseedamm 310, 12587 Berlin, Germany

ABSTRACT. Aquatic insect communities fulfil several important ecological functions – within aquatic habitats and across landscapes – affecting ecosystem processes in various ways. Summarizing some of the most prominent processes we hereby provide a short overview of recent advances in aquatic insect ecology. First we focus on how landscape features shape communities and meta-communities of aquatic insects through their effects on insect dispersal and we highlight some management implications of these insights. We then discuss the role of insects that are connecting ecosystem processes at the landscape scale by providing a major pathway of energy and matter transfer between aquatic and terrestrial ecosystems within and across landscapes. Finally, the role of aquatic insects (e.g. Chironomids) as ecosystem engineers (i.e. bioturbators) that are able to maintain vital ecosystem functions within aquatic ecosystems is highlighted.

Резюме. Сообщества водных насекомых выполняют несколько важных экологических функций, как внутри водных биотопов, так и на более высоком ландшафтном макроуровне - они различными способами влияют на экосистемные процессы. Суммируя наиболее важные из этих функций, мы представляем краткий обзор последних достижений в области экологии сообществ водных насекомых. В первую очередь мы сосредоточимся на том, как ландшафтные особенности формируют сообщества и мета-сообщества водных насекомых посредством их влияния на расселение насекомых и выделим некоторые последствия этих процессов для менеджмента водно болотных угодий и прилегающих ландшафтов. Во вторую очередь обсудим роль насекомых как связующего звена между экосистемными процессами в ландшафтном масштабе, обеспечивающих основной путь передачи энергии и материи между водными и наземными экосистемами внутри и между ландшафтами. В заключение подчеркнем роль водных насекомых (например, хирономид) в качестве экосистемных инженеров (например биотурбаторов), способных поддерживать жизненно важные функции экосистем в водных биотопах.

KEYWORDS: ecosystem engineering, dispersal, ecosystem connectivity, cross-habitat linkage

Ключевые слова: экосистемная инженерия, рассредоточение, сопряженность экосистем, меж-биотопные связи

INTRODUCTION

Aquatic insects are one of the most prominent representatives of freshwater biota, often making up the vast majority of freshwater macrofauna in both density and species richness (Lancaster & Downes, 2013). Aquatic insects are distributed worldwide, with all but several insect orders having at least some modern aquatic representatives [1]. Among approximately 54,000 species of aquatic insects worldwide, over 42% belong to the order Diptera (flies and midges), 14% to Coleoptera (beetles), 15% to Trichoptera (caddisflies), 9% to Odonata (damselflies and dragonflies) with the rest of the species distributed among the score of smaller orders, some of which, most notably Ephemeroptera (mayflies) and Plecoptera (stoneflies), contain almost exclusively species with aquatic preimaginal (non-adult) life stages [1].

In this short chapter we give an overview of the main facets of relationships between aquatic insect (meta-)communities and the landscapes they inhabit. Interactions of aquatic insect communities with both the in-water body and terrestrial landscapes are complex and manifold. Here, we focus on three features that have emerged as key processes to understand aquatic insect—landscape linkages during the last decades: 1) dispersal and breeding of aquatic insects are determined by the landscape features of adjacent areas [2,3]; 2) aquatic insects increase within-the-landscape ecological connectivity by providing cross-habitat matter and energy linkages [4,5]; and, 3) some taxa of aquatic insects are serving as ecosystem engineers shaping benthic landscapes within the water bodies, via the sum of their physical activities, most commonly burrowing (bioturbation [6,7]).

HOW LANDSCAPES AND LANDSCAPE FEATURES SHAPE INSECT COMMUNITIES

Dispersal is one of the key processes shaping insect communities and meta-communities at the landscape scale. Therefore we start our overview on the complex interactions between aquatic insect communities and landscapes with a look at the controls that landscape features may exert onto dispersal capabilities and behaviour of the adult aquatic insects [2,3,8]. From an insect's perspective, dispersal capabilities depend strongly on the body size, wing-length to body-length ratio, physiological conditions, weather conditions, habitat availability and landscape features [9,10,11,12]. These landscape features can roughly be divided into two groups – corridors and barriers [8,9]. Corridors are the areas of the highest connectivity for particular organisms, providing them with conditions that facilitate dispersal, while barriers are features of the landscapes which are hampering the dispersal of particular taxa [8,12]. Corridors are particularly important in heterogeneous landscapes [3], as landscape heterogeneity on itself could act as a barrier. In this vein, Delettre & Morvan [3] have shown that in agricultural landscapes dominated by hedge roses, dispersal of the terrestrial and semiaquatic Chironomidae is heavily influenced by the distribution of these hedges, gaps in between them, and the presence of wet soil as essential habitat. In these landscapes, some species (e.g. *Smittia pratorum*) have been found to be very weak dispersers, only found in the close proximity of the emergence site, while others (e.g. *Gymnometriocnemus brumalis*) were able to colonize numerous, relatively distant (200–400 m) sites from the single site of emergence [3]. Presence of the barriers is significantly hampering dispersal capabilities of the aquatic insects. As it was shown by Sondermann et al. [8], the caddisfly *Hydropsyche dinarica* was able to reach 81% of all suitable habitats within its geographic range when dispersal barriers are absent, but only 67%, when such barriers are present. Similarly, Sundermann et al. [9] have shown that most aquatic insects are capable of dispersing within five kilometres from the emergence site within single generation. Moreover, landscape features can be of paramount importance in creating and resolving human-ecosystem conflicts: at many lakeshores and riversides with high benthic productivity (i.e. Lake Tahoe, urban ponds of Singapore, Everglades etc.) high numbers of emerging aquatic insects are often becoming a nuisance for local occupants [13,14]. Accounting for the common dispersal corridors of emerging aquatic insects at the stage of the property development planning could help to avoid such conflicts.

INSECTS AS KEY COMPONENTS OF AQUATIC-TERRESTRIAL ENERGY FLUXES

Mass emergence of aquatic insects is also often acting as a key link between aquatic and terrestrial habitats, by transferring biomass through the infall of aquatic insects into the riparian zone [15, Figure 1]. Modern ecology is normally viewing water bodies such as lakes and rivers as integral parts of the landscape, connected by the reciprocal aquatic-terrestrial cross-habitat linkages with its surroundings [15]. While most of the research investigating energy and organic matter fluxes in freshwaters focusses on autochthonous production, it is becoming increasingly evident that exclusion of allochthonous input could lead to the severe underestimation of the existing fluxes [15,16].

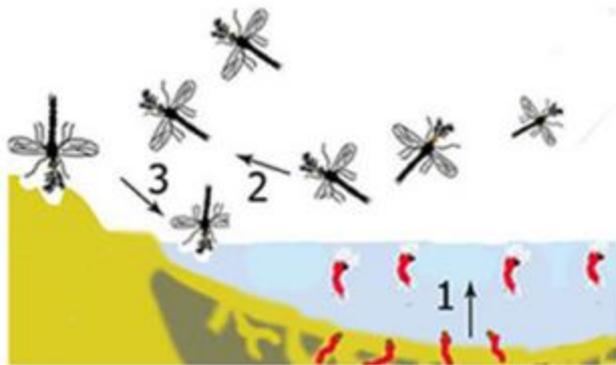


Figure 1 – Role of aquatic insects (as represented by chironomids (Diptera, Chironomidae)) in cross-habitats links establishment. Flying adults transfer (2) organic matter and various elements from aquatic to terrestrial ecosystems and back (3), while larvae are contributing into benthic landscapes reshaping (1) (From [7]).

In this vein, adult aquatic insects that emerge from the water bodies are one of the main vectors of matter and energy transfer from aquatic to terrestrial ecosystems [17]. Emerging aquatic insects, such as non-biting midges (Chironomidae, Diptera) are known to deposit up to 1200–2500 kg of biomass per ha⁻¹ yr⁻¹ at the riparian ecosystems [15]. On a landscape scale, the impact of the emerging insect’s biomass deposition decreases with increasing distance from the shorelines of aquatic habitats [4]. Notably, this deposition is one of the main sources of nitrogen and phosphorous in some riparian ecosystems, bordering especially productive water bodies [15]. Some striking examples of such systems are Lake Myvatn in Northern Iceland and Lake Wisconsin (USA), with mass emergence of non-biting midges (Chironomidae), Lake Malawi with mass emergence of phantom midges (Chaoboridae) as well as Lake Michigan and the Tisza river, with mass emergence of mayflies [13,14,15]. This cross-habitat input of organic matter is strong enough to change a isotopic composition of the terrestrial herpetobiotic predators, such as spiders, as well as to increase riparian primary productivity in comparison to the non-enriched areas [5].



Figure 2 – *Diamesa tonsa* is one of the few aquatic insects emerging during the winter in the central-European streams, thus providing cross –habitat linkage and nutrition for the numerous high order consumers (photo courtesy of Valentyna Inshyna)

AQUATIC INSECTS’ ROLE AS ECOSYSTEM ENGINEERS

Before they are ready to emerge from the water bodies, many aquatic insects’ larvae are acting as ecosystem engineers and help to create in-waterbody benthic landscapes at scales ranging from square decimetres to hectares [18]. Ecosystem engineers are organisms, which change the availability of resources for other species by altering the biotic and abiotic environment [19]. All ecosystem engineers are by definition keystone species in their respective communities, as they have impact on the community functioning, disproportional to their biomass [20,21]. Ecosystem engineer aquatic insects, such as Chironomidae larvae (bloodworms), have diverse impacts on the benthic landscapes and their biogeochemistry [6, Figure 1].

Burrowing activity of the bloodworms is modifying benthic landscapes via building of the burrows and their layering with the silk, as well as via ejection of the sediment from burrows [18]. Sediment burrowed by the bloodworms is known to increase in the physical cohesion as well as in water content and surface

features roughness [18,22]. Effects of such “sediment reworking” are exceeding the lifespan of the single larvae, since the burrows covered from inside by the durable silk proteins, produced by the larva’s salivary glands are normally persisting for at least several weeks after its builder’s emergence [18]. Sediment “landscaped” by larvae is known to release more phosphorous into the water, as well as being more permeable for the hydraulic fluxes, drastically [7]. For example, a volume equivalent to the whole shallow Lake Müggelsee (Berlin, Germany) can be pumped through the Chironomidae burrows in that lake within one week [23].

CONCLUSIONS

1. Recently, we have started to drastically rethink the role of aquatic insect communities in landscape and ecosystem ecology.
2. Our perception is shifting from simply looking at aquatic insects communities at the level of aquatic food chains and food webs to seeing them as a crucial link between aquatic and terrestrial habitats, as well as connecting communities and ecosystems of water bodies separated by terrestrial dispersal barriers, by the flux of matter and energy and gene flux.
3. Overall, current progress in community ecology of aquatic insects, if moving far beyond the confines of traditional aquatic entomology, is helping to shape numerous fields of environmental science.

REFERENCES

- [1] Lancaster, J., & Downes, B. J. (2013). *Aquatic Entomology*. OUP Oxford, United Kingdom.
- [2] Cranston, P.S., & Armitage, P.D. (1995). *The Chironomidae: Biology and Ecology of Non-biting Midges*. Springer, Netherlands.
- [3] Delettre, Y. R., & Morvan, N. (2000). Dispersal of adult aquatic Chironomidae (Diptera) in agricultural landscapes. *Freshwater Biology*, 44(3), 399-411.
- [4] Paetzold, A., Schubert, C. J., & Tockner, K. (2005). Aquatic terrestrial linkages along a braided-river: riparian arthropods feeding on aquatic insects. *Ecosystems*, 8(7), 748-759.
- [5] Baxter, C. V., Fausch, K. D., & Carl Saunders, W. (2005). Tangled webs: reciprocal flows of invertebrate prey link streams and riparian zones. *Freshwater biology*, 50(2), 201-220.
- [6] Hölker, F., Vanni, M.J., Kuiper, J.J., C. Meile, C., Grossart, H.-P., and others (2015). Tube-dwelling invertebrates: tiny ecosystem engineers have large effects in lake ecosystems. *Ecological Monographs* 85(3), 333–351.
- [7] Baranov, V., Lewandowski, J., Romeijn, P., Singer, G., & Krause, S. (2016). Effects of bioirrigation of non-biting midges (Diptera: Chironomidae) on lake sediment respiration. *Scientific Reports*, 6, 27329.
- [8] Sondermann, M., Gies, M., Hering, D., Schröder, M., & Feld, C. K. (2015). Modelling the effect of in-stream and terrestrial barriers on the dispersal of aquatic insect species: a case study from a Central European mountain catchment. *Fundamental and Applied Limnology/Archiv für Hydrobiologie*, 186(1-2), 99-115.
- [9] Sundermann, A., Stoll, S., & Haase, P. (2011). River restoration success depends on the species pool of the immediate surroundings. *Ecological Applications*, 21(6), 1962-1971.
- [10] Sacchi, R., & Hardersen, S. (2013). Wing length allometry in Odonata: differences between families in relation to migratory behaviour. *Zoomorphology*, 132(1), 23-32.
- [11] Kalinkat, G., Jochum, M., Brose, U., & Dell, A.I. (2015). Body size and the behavioral ecology of insects: linking individuals to ecological communities. *Current Opinion in Insect Science*, 9:24-30.
- [12] Tonkin, J.D., Altermatt, F., Finn, D.S., Heino, J., Olden, J.D., Pauls, S.U., & Lytle, D.A. (2017). The role of dispersal in river network metacommunities: Patterns, processes, and pathways. *Freshwater Biology*, *online early*, doi: 10.1111/fwb.13037
- [13] Ali, A. (1995). Nuisance, economic impact and possibilities for control. In *The Chironomidae* (pp. 339-364). Springer Netherlands.
- [14] Cranston, P. S., Ang, Y. C., Heyzer, A., Lim, R. B. H., Wong, W. H., Woodford, J. M., & Meier, R. (2013). The nuisance midges (Diptera: Chironomidae) of Singapore’s Pandan and Bedok reservoirs. *Raffles Bulletin of Zoology*, 61(2).
- [15] Gratton, C., Donaldson, J., & Vander Zanden, M. J. (2008). Ecosystem linkages between lakes and the surrounding terrestrial landscape in northeast Iceland. *Ecosystems*, 11(5), 764-774.
- [16] Scharnweber, K., Syväranta, J., Hilt, S., Brauns, M., Vanni, M. J., & others. Whole-lake experiments reveal the fate of terrestrial particulate organic carbon in benthic food webs of shallow lakes. *Ecology*, 95(6), 1496-1505.

- [17]Gratton, C., & Zanden, M. (2009). Flux of aquatic insect productivity to land: comparison of lentic and lotic ecosystems. *Ecology*, 90(10), 2689-2699.
- [18]Ólafsson, J., & Paterson, D. (2004). Alteration of biogenic structure and physical properties by tube-building chironomid larvae in cohesive sediments. *Aquatic Ecology* 38:219–229.
- [19]Meysman, F.J.R., Middelburg, J.J., & Heip, C.H.R. (2006). Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea. *Trends in Ecology and Evolution* 21(12), 688-695.
- [20]Wright, J.P., & Jones, C.G. (2006). The Concept of Organisms as Ecosystem Engineers Ten Years On: Progress, Limitations, and Challenges. *BioScience* 56(3), 203-209.
- [21]Paine, R. T. (1966). Food Web Complexity and Species Diversity. *The American Naturalist* 100(910), 65–75.
- [22]Webert, K. C., Herren, C. M., Einarsson, Á., Bartrons, M., Hauptfleisch, U., & Ives, A. R. (2017). Midge-stabilized sediment drives the composition of benthic cladoceran communities in Lake Mývatn, Iceland. *Ecosphere*, 8(2), e01659.
- [23]Roskosch, A., Hupfer, M., Nützmann, G., & Lewandowski, J. (2011). Measurement techniques for quantification of pumping activity of invertebrates in small burrows. *Fundamental and Applied Limnology/Archiv für Hydrobiologie*, 178(2), 89-110.

**Глава III/24: АНАЛИЗ РАЗНООБРАЗИЯ ИХТИОФАУНЫ В ГОРНЫХ ЛАНДШАФТАХ
БАСЕЙНА АМУРА**
**Chapter III/24: Analysis of the Ichthyofauna Diversity in Mountain Landscapes of the
Amur Basin**

Александр Л. Антонов

DOI 10.25680/6083.2018.77.80.217

Эл. Почта: antonov@ivep.as.khb.ru

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, ул. Дикопольцева, 56, 680000, Хабаровск, Россия

РЕЗЮМЕ. В период с 1975 г. по 2017 г. исследовано ихтиологическое разнообразие рек и озер, расположенных в горных ландшафтах бассейна р. Амур. Таксономическое разнообразие включает один вид миног и 38 видов рыб, относящихся к семи отрядам, девяти семействам и 24 родам. Ценогическое разнообразие представлено семью основными природными типами ихтиоценозов. Рыбы, обитающие в горных ландшафтах, относятся к девяти фаунистическим комплексам; наибольшее число видов (14) относятся к бореальному предгорному комплексу. В составе ихтиофауны встречаются представители трех экологических групп. В российской части бассейна Амура горные ландшафты и их ихтиологическое разнообразие представлены в 9 заповедниках, 5 национальных парках и 5 федеральных заказниках. Большинство их, из-за сезонности обитания видов в горных ландшафтах, не могут обеспечить круглогодичную охрану ихтиофауны. В связи с этим, необходима оптимизация этих охраняемых природных территорий и, в целом, системы охраны ихтиофауны в горных ландшафтах бассейна Амура.

Abstract. Between 1975 and 2017, the ichthyological diversity of rivers and lakes, located in the mountainous landscapes of the basin of the Amur river was investigated. Taxonomic diversity includes one species of lamprey and 38 species of fish belonging to seven orders, nine families and 24 genera. The cenotic diversity is represented by the seven main natural types of the ichthyocenosis. Fishes living in mountain landscapes belong to nine faunistic complexes; the greatest number of species (14) belong to the boreal foothill complex. Within the ichthyofauna there are representatives of three ecological groups. In the Russian part of the Amur basin mountain landscapes and their fish diversity in 9 reserves, 5 national parks and 5 federal sanctuaries are represented. Most of them, because of the seasonal nature of the species habitation in mountain landscapes, can not provide year-round protection of the fish. In connection with this it is necessary to optimize these protected natural areas and, in general, the ichthyofauna protection systems in the mountain landscapes of the Amur basin.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ихтиофауна, таксономическое разнообразие, фаунистические комплексы, экологические группы, ценотическое разнообразие, охрана, горные ландшафты, бассейн Амура.

Keywords: ichthyofauna, taxonomic diversity, faunistic complexes, ecological groups, cenotic diversity, conservation, mountainous landscapes, Amur basin.

ВВЕДЕНИЕ

Река Амур является одной из крупнейших рек мира и самой богатой среди рек России по ихтиофауне - не менее 123 аборигенных видов [1]. Горные ландшафты занимают в бассейне Амура около 60% (рис.1) [2]. Они расположены, в основном, в верхней части водосбора, а также у его границ; наиболее высокие горы достигают высоты 2500 м (г. Сохондо, на водоразделе рек Онон и Ингода). До недавнего времени реки и озера в горных районах бассейна оставались почти не исследованными в ихтиологическом отношении. Между тем, горная ихтиофауна, по сравнению с равнинной, более специализирована и менее устойчива к изменениям среды [3], в связи с чем познание разнообразия рыб горных водосборов имеет фундаментальное и природоохранное значение.

МАТЕРИАЛ, МЕТОДИКА И РАЙОНЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материал собран в период с 1975 г. по 2017 г. в горной части бассейна Амура от притоков р. Онон на западе до рек, впадающих в Амурский лиман на востоке. Было обследовано более 110 рек и 29 озер. Рыб отлавливали спортивной снастью, сачком, сетями, а также наблюдали. Всего было отловлено около 2000 экземпляров 36 видов. Таксономия и названия таксонов приводятся согласно [4,5]. Состав фаунистических комплексов дан по [6,7], с учетом анализа ареалов и экологических особенностей видов.



Рисунок 1 – Горные ландшафты преобладают в бассейне Амура. Озеро Перевальное на хребте Меванджа; здесь обитают четыре вида рыб.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе проведенных исследований и анализа публикаций выявлено таксономическое разнообразие рыб горных ландшафтов бассейна Амура, которое включает 38 видов рыб, относящихся к семи отрядам, девяти семействам и 24 родам, а также один вид бесчелюстных:

Отряд Petromyzontiformes - миногаобразные

Семейство Petromyzontidae – миноговые

- 1) *Lethenteron reissneri* (Dybowski, 1869) – дальневосточная ручьевая минога
Отряд Сурпинiformes – карпообразные
Семейство Сурпинidae – карповые
Род *Leuciscus*
- 2) *Leuciscus waleckii* (Dybowski, 1869) – амурский язъ, чебак
Род *Tribolodon*
- 3) *Tribolodon brandtii* (Dybowski, 1872) – мелкочешуйная красноперка-угай
Род *Phoxinus*
- 4) *Phoxinus phoxinus* (Linnaeus, 1758) – речной голянь
Род *Rhynchocypris*
- 5) *Rhynchocypris lagowskii* Dybowski, 1869 – голянь Лаговского
- 6) *Rh. oxycephalus* (Sauvage et Dabry de Thiersant, 1874) – китайский голянь
- 7) *Rh. czecanowskii* Dybowski, 1869 – голянь Чекановского
- 8) *Rh. percunurus* (Pallas, 1814) – озерный голянь
- 9) *Rh. mantschuricus* (Berg 1907) – маньчжурский озерный голянь
Род *Gobio*
- 10) *Gobio cynocephalus* Dybowski, 1869 – обыкновенный амурский пескарь
Род *Ladislavia*
- 11) *Ladislavia taczanowskii* Dybowski, 1869 – ладиславия
Род *Carassius*
- 12) *Carassius gibelio* (Bloch, 1782) – серебряный карась
Род *Pseudaspius*
- 13) *Pseudaspius leptocephalus* (Pallas, 1776) – амурский плоскоголовый жерех
Род *Rhodeus*
- 14) *Rhodeus sericeus* (Pallas, 1776) – амурский обыкновенный горчак
Семейство Cobitidae – вьюновые
Род *Cobitis*
- 15) *Cobitis melanoleuca* Nichols, 1925 – сибирская щиповка
Род *Misgurnus*
- 16) *Misgurnus mohoity* (Dybowski, 1869) – змеевидный вьюн
Семейство Balitoridae – балиторы
Род *Barbatula*
- 17) *Barbatula toni* (Dybowski, 1869) – сибирский голец
Отряд Esociformes – щукообразные
Семейство Esocidae – щуковые
Род *Esox*
- 18) *Esox reichertii* Dybowski, 1869 – амурская щука
Отряд Salmoniformes – лососеобразные
Семейство Salmonidae – лососевые
Род *Coregonus*
- 19) *Coregonus chadary* Dybowski, 1869 – сиг-хадары
- 20) *C. ussuriensis* Berg, 1906 – амурский сиг
Род *Thymallus*
- 21) *Thymallus grubii* Dybowski, 1869 – амурский хариус
- 22) *Th. flavomaculatus* Knizhin, Antonov et Weiss 2006 – желтопятнистый хариус
- 23) *Th. tugarinae* Knizhin, Antonov, Safronov et Weiss 2007 – нижеамурский хариус
- 24) *Th. burejensis* Antonov, 2004 – буреинский хариус
- 25) *Th. baicalolenensis* Matveev, Samusenok, Pronin et Tel'pukhovskiy, 2005 – байкало-ленский хариус
Род *Brachymystax*
- 26) *Brachymystax lenok* (Pallas, 1773) – острокрылый ленок
- 27) *Br. tumensis* Mori, 1930 – тупорылый ленок
Род *Hucho*
- 28) *Hucho taimen* (Pallas, 1773) – обыкновенный таймень
Род *Oncorhynchus*
- 29) *Oncorhynchus keta* (Walbaum, 1792) – кета
- 30) *O. masou* (Brevoort, 1856) – сима
- 31) *O. gorbuscha* (Walbaum, 1792) – горбуша

- 32) *O. kisutch* (Walbaum, 1792) – кижуч
 Род *Salvelinus*
 33) *Salvelinus curilus* (Pallas, 1814) – южная мальма
 34) *S. leucomaenis* (Pallas, 1814) – кунджа
 Отряд Gadiformes – трескообразные
 Семейство Lotidae – налимовые
 Род *Lota*
 35) *Lota lota* (Linnaeus, 1758) – налим
 Отряд Gasterosteiformes – колюшкообразные
 Семейство Gasterosteidae – колюшковые
 Род *Pungitius*
 36) *Pungitius sinensis* (Guichenot, 1869) – китайская колюшка
 Отряд Scorpaeniformes – Скорпенообразные
 Семейство Cottidae – рогатковые
 Род *Cottus*
 37) *Cottus szanaga* Dybowski, 1869 – амурский подкаменщик
 Род *Mesocottus*
 38) *Mesocottus haitej* (Dybowski, 1869) – амурская широколобка
 Отряд Perciformes
 Семейство Odontobutidae – головешковые
 Род *Perccottus*
 39) *Perccottus glenii* Dybowski, 1877 – головешка-ротан

В горных ландшафтах встречается 31,7% от общего количества видов, обитающих в бассейне Амура. По числу видов лидируют семейства Salmonidae (16 видов) и Cyprinidae (13); Cobitidae и Cottidae представлены двумя видами, остальные семейства - одним видом.

К числу эндемиков бассейна Амура относятся всего два вида – *Thymallus burejensis* (рис. 2) и *Pseudaspius leptcephalus*. 16 видов являются субэндемиками, остальные имеют сравнительно широкое распространение в Азии.



Рисунок 2 – Буреинский хариус – локальный эндемик бассейна верхнего течения р. Буря, левого притока Амура.

Для пресноводных рыб бассейна Амура и для Дальнего Востока России по генезису, характеру распространения и экологическим особенностям видов выделено несколько ихтиофаунистических комплексов (групп) [6,7]. Анализ ареалов и экологии видов показал, что в реках и озерах горных ландшафтов преобладают представители бореального предгорного комплекса – 14 видов (табл.1). На основе анализа видового состава рыбных сообществ и соотношению возрастных групп выделено 7 основных типов ихтиоценозов: 1) верховьев рек, 2) их средних участков, 3) нижних участков, 4) малых горных притоков равнинных рек, 5) пойменных озёр, 6) озёр надпойменных террас и плато, 7) горных озёр. По числу видов среди речных ценозов лидирует третий тип (19-29 видов, в зависимости от географического положения участка); минимальное число видов отмечено для верховий (5-6 видов). Для горных и полугорных рек бассейна Амура это общая схема, в целом характерная для летнего периода. Вместе с тем, в зависимости от условий водности и температуры воды в составе речных ценозов происходят изменения. Зимовка почти всех видов происходит в средних и нижних частях рек. В озерных ценозах наибольшее число видов (7-9) отмечено в пятом

типе, наименьшее – в шестом (1-4 вида) и седьмом (2-4 вида). Видовой состав озерных ценозов более стабилен, чем речных.

Экологическая классификация рыб Амура включает четыре группы видов [8]; из них в горных ландшафтах встречаются представители трех экологических групп: 1) типичные реофилы (всего 23 вида); 2) виды, свойственные руслу Амура, но проникающие и в горные притоки (10 видов); 3) обитатели стоячих и медленных вод (6 видов).

В настоящее время в российской части бассейна Амура горные ландшафты и их ихтиологическое разнообразие охраняются в 9 заповедниках (Сохондинский, Зейский, Норский, Хинганский, Буринский, Бастак, Большехецирский, Сихотэ-Алинский, Комсомольский), 5 национальных парках (Алханай, Анюйский, Бикин, Зов тигра, Удэгейская Легенда) и 5 федеральных заказниках (Хингано-Архаринский, Баджалский, Ольджиканский, Удыль, Хехцир). Большинство их, из-за сезонности обитания видов, не могут обеспечить круглогодичную охрану ихтиофауны. Лишь в национальных парках Анюйский и Бикин, которые занимают большие участки бассейнов, большая часть видов охраняется круглый год. В связи с этим, необходима оптимизация системы этих охраняемых территорий – увеличение их площадей, организация сезонной охраны на сопредельных территориях, в местах зимовок и на путях миграций.

Табл. 1- Видовой состав фаунистических комплексов в горных ландшафтах бассейна Амура

Комплекс	Состав комплекса	Число видов (%)
бореальный предгорный	<i>Phoxinus phoxinus, Rhynchocypris lagowskii, Rh. oxycephalus, Barbatula toni, Thymallus grubii, Th. flavomaculatus, Th. tugarinae, Th. burejensis, Th. baicalolenensis, Brachymystax lenok, Br. tumensis, Hucho taimen, Cottus szanaga, Mesocottus haitej</i>	14 (35,9)
бореальный равнинный	<i>Leuciscus waleckii, Tribolodon brandtii, Rhynchocypris czecanowski, Rh. percnurus, Rh. mantschuricus, Carassius gibelio, Gobio cynocephalus, Cobitis melanoleuca, Esox reichertii</i>	9 (23,1)
арктический пресноводный	<i>Coregonus chadary, C. ussuriensis, Salvelinus curilus, S. leucomaenis, Lota lota</i>	5 (12,8)
древний верхнетретичный	<i>Lethenteron reissneri, Pseudaspius leptcephalus, Rhodeus sericeus, Misgurnus mohoity</i>	4 (10,3)
бореальный палеарктический	<i>Oncorhynchus keta, O. masou, O. gorbuscha</i>	3 (7,7)
китайский предгорный	<i>Ladislavia taczanowskii</i>	1 (2,6)
китайский равнинный	<i>Pungitius sinensis</i>	1 (2,6)
индийский равнинный	<i>Percottus glenii</i>	1(2,6)
бореальный неарктический	<i>Oncorhynchus kisutch</i>	1 (2,6)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Таксономическое разнообразие ихтиофауны в горных ландшафтах бассейна Амура включает не менее 38 видов рыб, относящихся к 24 родам, девяти семействам и семи отрядам, а также один вид миног.
2. По числу видов доминирует бореальный предгорный комплекс – 14 видов.
3. Эндемиками бассейна являются два вида, субэндемиками -16.
4. Ценотическое разнообразие в летний период в реках представлено 4 основными типами ихтиоценозов, в озерах - тремя.
5. Ихтиоценозы рек динамичны, озер – относительно стабильны.
6. Среди экологических групп, выделенных для бассейна Амура, в горных ландшафтах доминирует группа видов-реофилов (23 вида).
7. Необходима оптимизация системы охраны ихтиофауны горных ландшафтов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bogutskaya N.G., Naseka A.M., Shedko S.V., Vasil'eva E.D., Chereshev I.A. 2008. The fishes of the Amur River: updated check-list and zoogeography // Ichthyol. Explor. Freshwaters. Vol. 19. № 4. P. 301-366.
- [2] Никольская В.В. Морфоскульптура бассейна Амура. М.: Наука, 1972. — 296 с.
- [3] Никольский Г.В. 1953. Основные закономерности формирования и развития речной ихтиофауны // Очерки по общим вопросам ихтиологии. Г.У. Линдберг (ред.). М.-Л.: АН СССР. С. 77-90.
- [4] Eschmeyer W. N., Fricke R., van der Laan (eds). Catalog of Fishes: genera, species, referances (<http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp>). Electronic version accessed 20.12. 2017.
- [5] Богуцкая Н.Г., Насека А.М. Каталог бесчелюстных и рыб пресных вод России с номенклатурными и таксономическими комментариями. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004.— 389 с.
- [6] Никольский Г.В. Рыбы бассейна Амура. М.: Изд-во АН СССР 1956. — 551 с.
- [7] Черешнев И.А. Биогеография пресноводных рыб Дальнего Востока России Владивосток: Дальнаука, 1998. — 131 с.
- [8] Таранец А.Я. 1938. К зоогеографии Амурской переходной области на основе изучения пресноводной ихтиофауны // Вестн. ДВФ АН СССР. № 32 (5). с. 99-116.

Основная глава 9.2 Орнитологические исследования Main Chapter 9.2 Ornithological Studies

Chapter III/25: EFFECT OF HUMAN-INDUCED FOREST EDGES ON THE BIRD COMMUNITY IN HYRCANIAN FORESTS IN IRAN: IMPLICATION FOR CONSERVATION AND MANAGEMENT

Глава III/25: Влияние антропогенно сформированных опушек леса на сообщества птиц в Гирканских лесах Ирана: значение для сохранения и управления

Saleh Mahmoudi¹, Sayyad Sheykhi Panloo^{2,3*}, Aqil Keyvanloo Shahrestanaki³, Negin Valizadegan⁴, Masoud Yousefi²

DOI 10.25680/3436.2018.29.75.218

*Email: sayyad.sheykhi@ut.ac.ir; sayyad.bird@gmail.com

1. Payame Noor University (PNU), Nakhil St, Tehran, Iran

2. University of Tehran, 16 Azar St, Tehran, Iran

3. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Shahid Beheshti St, Gorgan Iran

4. University of Illinois at Urbana Champaign, 607 S. Mathews Ave, Urbana, USA

ABSTRACT. To understand bird species responses to edge effect, we studied changes in diversity, density and abundance of bird communities and environmental variables along an edge-interior gradient in Iran's Hyrcanian forests and observed significant differences in Simpson diversity index, Shannon diversity index, N1 and N2 indices. Bird community analysis divided bird species into two main bird groups that were either positively or negatively correlated with environmental variables. The first group included Pheasant (*Phasianus colchicus*), Nightingale (*Luscinia megarhynchos*), Jay (*Garrulus glandarius*) and Blackbird (*Turdus merula*) with a positive response to edge effect and had a high correlation with variables such as ground cover and temperature. The second group consisted of Tree Creeper (*Certhia familiaris*), Great Spotted Woodpecker (*Dendrocopos major*), Green Woodpecker (*Picus viridis*), and Nuthatch (*Sitta europaea*) with a negative response to edge effect and a positive correlation with variables such as diameter at breast trees both living and dead. Results obtained from this study could be important in conservation and management of bird communities in the Hyrcanian forests.

Резюме. Чтобы понять реакцию видов птиц на краевой эффект, мы изучили изменения в разнообразии, плотности и численности сообществ птиц и переменных окружающей среды вдоль градиента краевого внутреннего пространства в иранских горах и наблюдали значительные различия в индексе разнообразия Симпсона, индексе разнообразия Шеннона, N1 и N2. Анализ сообщества птиц разделил виды птиц на две основные группы, которые были либо положительно, либо отрицательно коррелированы с переменными окружающей среды. Первая группа включает Фазана (*Phasianus colchicus*), Соловья (*Luscinia megarhynchos*), Сойку (*Garrulus glandarius*) и Черного дрозда (*Turdus merula*), которые показали положительный отклик на краевой эффект и имели высокую корреляцию с такими переменными, как почвенный покров, количество деревьев и температура. Вторая группа состояла из Пищухи (*Certhia familiaris*), Большого Пёстрого Дятла (*Dendrocopos major*), Зеленого Дятла (*Picus viridis*) и Поползня (*Sitta europaea*), которые показали отрицательный отклик на краевой эффект и положительную корреляцию с диаметром ствола живых и мертвых деревьев. Полученные результаты могут иметь важное значение для сохранения и управления сообществами птиц в Гирканских лесах.

KEYWORDS: Environmental variable, Edge effect, Forest, Iran

Ключевые слова: Экологическая переменная, краевой эффект, лес, Иран

INTRODUCTION

Edge effect is one of the most important topics in ecology since it can dramatically affect the abundance and distribution of wildlife in the landscape [1, 2]. Based on the previous studies on edge effect, species abundances could either increase, decrease or stay unchanged due to edge effects [3, 4]. Hyrcanian forests are among the oldest forests in the world that are the remnant of the Tertiary period [5]. Recent studies have shown that Hyrcanian forests were used as refuge for animals during Pleistocene climatic oscillations [6]. Despite having high conservation value, these forests are rapidly diminishing. A rate of decrease estimate for these forests has shown that 1000 hectares of trees are cut down annually, decreasing the Hyrcanian forests from 3.6 million hectares to 1.8 million hectares in the last few decades [7]. Clear-cutting for agricultural purposes is found to be the most important factor in decreasing the boundaries of these forests in Golestan Province [8] and leading to habitat fragmentation and edge effect [9] (Figure 1). Edge areas can directly affect bird community composition and diversity in forest ecosystems. We hypothesized that we will observe the same effect in birds inhabiting Hyrcanian forests. Due to the importance of the issue, we decided to study edge effect in a portion of Hyrcanian forest in Golestan Province in Iran. In this study, we aimed to explore bird responses to an edge-interior gradient and their relationship with environmental variables at the species and community levels.



Figure 1- Hyrcanian forests and the effect of forest edges on biodiversity

MATERIAL AND METHODS

We conducted our study in the Saadabad-Naharkhoran forest, located 6 kilometers far from the southwest of Gorgan city and is a part of Hyrcanian forests in Iran. The area of the study region is 4232 hectares. We collected our data from April 2011 to April 2012 using the point-count sampling method [10] using 81 plots with a radius of 25m for each. We selected the sampling plots by systematic random sam-

pling method. We considered 5 buffers with 25m, 225m, 425m, 625m and 825m distance from the edge of the forest. We sampled twenty environmental factors that were important in bird habitat selection. At the same bird sampling points, we sampled these factors in a 25-meter radius from the center of each plot [11].

To study the significant differences in bird species abundance in buffers and to study the significant changes in environmental variables in different buffers, we used SPSS and Minitab software packages. We used the Kolmogorov–Smirnov test to verify normal distribution of the data. We used General Linear Model (GLM) in Minitab for normal distribution variable. We also used Kruskal-Wallis (K-W) test in SPSS to study significant differences in data without a normal distribution. In order to measure bird diversity indices, we used Ecological Methodology v5.1 software [12]. To show changes of species diversity in relation to environmental factors, we drew bi-plot graphs with environmental factors and iso-lines of species diversity indices based on species present in the region. We used RDA to explain the relationship between bird species distribution and environmental factors. To estimate bird species density, we used DISTANCE 6 software. We used ANOVA analysis to compare the two groups separately between buffers. We considered species as repeats for each buffer in our analysis.

RESULTS

During our survey, we observed and recorded 1428 individual birds in 81 sampling plots and we identified 35 bird species in the region. In our study, we divided birds into two groups of bark gleaning insectivore and arboreal foliage gleaning insectivore birds (Figure 2). Measuring diversity indices for both groups showed that all diversity indices are significant along the edge-center gradient for bark gleaning group (Simpson diversity, $F= 8.22, P\leq 0.001$; Shannon diversity, $F= 7.83, P\leq 0.001$; Number of species, $F= 8.28, P\leq 0.001$; N_2 , $F= 8.37, P\leq 0.001$; Camargo evenness, $F= 8.26, P\leq 0.001$; Simpson evenness, $F= 8.12, P\leq 0.001$) but for the arboreal group, only Simpson ($F= 11.33, P\leq 0.001$) and Shannon ($F= 12.82, P\leq 0.001$) indices were significantly different.

We tested the relationship between birds and environmental variables using RDA (Redundancy Analysis). The results demonstrated that there is a high correlation between birds and environmental variables. As shown in the figure 1, RDA analysis divided birds to two main groups. The first group includes Pheasant, Nightingale, Robin (*Erithacus rubecula*), Song thrush (*Turdus philomelos*), Jay, Common Magpie (*Pica pica*) and Blackbird which showed positive responses to edge effect and had a high correlation with variables such as rock cover, ground cover, tree with diameter at breast height (DBH) of 12 to 20cm, temperature, and shrub cover. The second group consists of Blue Tit (*Cyanistes caeruleus*), Great Tit (*Parus major*), Coal Tit (*Periparus ater*), Chaffinch (*Fringilla coelebs*), Treecreeper, Great Spotted Woodpecker, Lesser Spotted Woodpecker (*Dryobates minor*), Green Woodpecker, Common Cuckoo (*Cuculus canorus*), Tawny owl (*Strix aluco*), Nuthatch and Jay that showed a negative response to the edge effect and a positive correlation with snag and log (stood and fallen dead trees) DBH, snag and log height, the number of trees with DBH 100-300 cm, canopy cover, life litter depth and DBH of the trees.

Distance from the edge had impacts on the abundance of two forestry bird species. These species include Great Spotted Woodpecker ($F=22.93, P\leq 0.000$) and Nuthatch ($F=22.22, P\leq 0.000$). Other species did not show significant differences at different distances from the edge.

DISCUSSION

Edge effect is a key factor for understanding the effect of landscape on habitat quality [13, 1]. Defining variables that can affect the presence of insectivorous birds in a habitat could be important in distinguishing threats to these species in the edge to center gradient. Therefore, results obtained from this study can be important in conservation and management of the remnant Hyrcanian forests. Our results demonstrated that bark gleaning species revealed negative response to the edge effect. Due to an increase in the destruction rate of Hyrcanian forests in the recent years, edge areas became larger. Due to the importance of Hyrcanian forests and the sensitivity of insectivores to the edge effect, protecting forest areas is helpful in conserving biodiversity in these forests. Choosing protected areas in some parts of Hyrcanian forests where birds could roam in their native habitats without any danger of destruction or exploitation would be helpful in increasing bird richness in these valuable habitats. According to our results, choosing these regions can be based on environmental variables with a positive correlation with edge-avoiding species. Edge specialists are mostly species that also occur in the matrix surrounding the patch [14]; conserving them may not be necessary, and if some of these species are declining or endangered, they can perhaps be managed better in the matrix surrounding the forest patches.

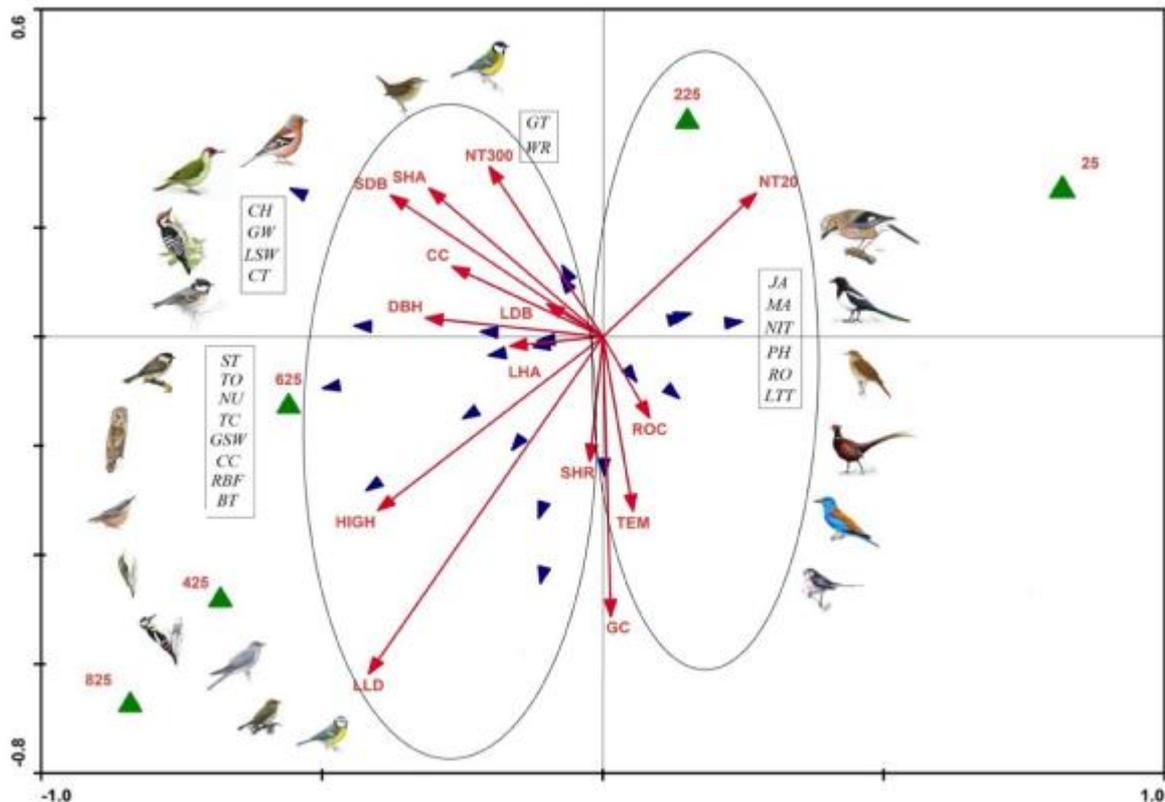


Figure 2– Ordination diagram of the first two axes of RDA for insectivorous birds and the most important environmental variables in Saadabad-Naharkhoran forest. Bird species: BT: Blue tit, TC: Tree Creeper, WR: Wren (*Troglodytes troglodytes*), GSW: Great Spotted Woodpecker, NU: Nuthatch, CC: Common Cuckoo, CT: Coal Tit, CH: Chaffinch, BLK: Blackbird, GW: Green Woodpecker, LSW: Lesser Spotted Woodpecker, ST: Sombre Tit, TO: Tawny Owl, RBF: Red-breasted Flycatcher (*Ficedula parva*), LTT: Long-tailed Tit (*Aegithalos caudatus*), STH: Song Thrush, MA: Magpie, NIT: Nightingale, Environmental variables: TEM: Temperature, CC: Canopy cover, LLD: Life litter depth, GC: Ground cover, SHC: Shrub cover, NT20: The number of tree with DBH 12-20 cm, NT300: The number of trees with DBH100-300 cm, SHE: Snag height, LDB: Log DBH, SDB: Snag DBH LHE: Log height, DBH: Diameter at breast height , HIGH: Height of trees.

CONCLUSIONS

1. Hyrcanian forests are under the edge effect and their area is significantly declining.
2. Edge effect has reduced the bird species richness, especially for the bark gleaning birds.
3. Presence of large trees and sufficient moisture are some of the important factors in habitat selection for birds in Hyrcanian forests.

REFERENCES

- [1]Ries, L., Fletcher, R.J., Battin, J., Sisk, T.D., 2004. Ecological responses to habitat edges: mechanisms, models, and variability explained. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 35, 491-522. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.112202.130148>.
- [2]Ewers, R.M., Didham, R.K., 2006. Confounding factors in the detection of species responses to habitat fragmentation. *Biological Reviews.* 81, 117-142.
- [3]Sisk, T.D., Battin, J., 2002. Habitat edges and avian ecology: geographic patterns and insights for western landscapes. *Studies in Avian Biology.* 25, 30-48.
- [4]Ries, L., Sisk, T.D., 2004. A predictive model of edge effects. *Ecology.* 85, 2917-2926.
- [5]Etemad, V., 1994. Estimating of quantity and quality of conclusion forestry project. M.Sc. Thesis, University of Tehran, Tehran, Iran.

- [6]Naderi, G., Kaboli, M., Koren, T., Karami, M., Zupan, S., Rezaei, H.R., Krystufek, B., 2013. Mitochondrial evidence uncovers a refugium for the fat dormouse (*Glis glis* Linnaeus, 1766) in Hyrcanian forests of northern Iran. *Mammalian Biology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mambio.2013.12.001>.
- [7]Akhani, H., Djamali, M., Ghorbanalizadeh, A., Ramezani, E., 2010. Plant biodiversity of Hircanian relict forests, N Iran: an overview of the flora, vegetation, paleoecology and conservation, *Pak. J. Bot., Special Issue*. 42, 231-258.
- [8]Poorzady M, Bakhtiari F, 2009. Spatial and temporal changes of Hyrcanian forest in Iran. *iForest*. 2, 198-206.
- [9]Harper, K. A., Macdonald, S. E., Burton, P. J., Chen, J., Brososke, K. D., Saunders, S. C., Euskirchen, E. S., Roberts, D., Jaiteh, M. S. Esseen, P.A., 2005. Edge influence on forest structure and composition in fragmented landscapes. *conservation biology*. 19, 768-782. doi: 10.1111/j.1523-1739.2005.00045.x
- [10]Buckland, S.T., Anderson, D.R., Burnham, K.P., Lakke, J.L., Borchers, D.L., 2001. Introduction to distance sampling: Estimating abundance of biological populations. Oxford University Press, Oxford.
- [11]Castelletta, M., Thiollay, J.M., Sodhi, N.S., 2005. The effects of extreme forest fragmentation on the bird community of Singapore Island. *Biol. Conserv.* 121, 135-155.
- [12]Krebs, C.J, 1999. Ecological methodology. Version 5.1. Department of Zoology, University of British Columbia. Available at: <http://www.nhsbig.inhs.uiuc.edu/wes/krebs.html>.
- [13]Varasteh Moradi, H. and Zakaria, M., 2009. Insectivorous bird community changes along an edge-interior gradient in an isolated tropical rainforest in peninsular Malaysia. *Malay Nat J.* 61, 48-66.
- [14]Zakaria, M., Rajpar, M.N., Varaste-Moradi, H., Rasoli, Z., 2013. Comparison of understory bird species in relation to edge–interior gradient in an isolated tropical rainforest of Malaysia, *Environ Dev Sustain*, DOI 10.1007/s10668-013-9482-9.

Глава III/26: ТРОФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ УШАСТОЙ (*ASIO OTUS*) И БОЛОТНОЙ (*A. FLAMMEUS*) СОВ В ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ
Chapter III/26: Food Chain of the Long-Eared (*Asio otus*) and the Short-Eared Owls (*A. flammeus*) in the Forest-Steppe Zone of Western Siberia

Тамара А. Дупал*, Вячеслав М. Чернышов

DOI 10.25680/7385.2018.66.92.219

*Эл. Почта: dupalgf54@gmail.com

Институт систематики и экологии животных СО РАН, ул. Фрунзе, 11, 630091 Новосибирск, Россия

РЕЗЮМЕ. Методом анализа костных остатков в погадках изучено питание двух близких видов сов с перекрывающимися ареалами на юге Западной Сибири. Показано, что в южной части Барабинской низменности для ушастой и болотной сов характерна сходная стратегия использования кормовой базы. Отличия заключаются в том, что у болотной совы зона охоты, по-видимому, более ограничена: в период гнездования птицы занимают более влажные местообитания по берегам озер и защищают свои охотничьи участки. Ушастая сова гнездится в колках в умеренно увлажненных местах и способна расширять кормовую базу за счет бурозубок и степных видов грызунов. В рационе обоих видов сов преобладают виды мышевидных грызунов, являющиеся доминантами либо субдоминантами в сообществе мелких млекопитающих Барабинской лесостепи. Отмечена сезонная и межгодовая изменчивость спектров их питания.

Abstract. Diets of two closely related owl species with overlapping ranges is studied by analyzing bone remains in pellets of owls in the south of Western Siberia. It is shown that in the southern part of the Barabinsk Lowland the Long-Eared and Short-Eared Owl have similar strategies of food supply usage. These strategies differ in the apparently more restricted feeding area of the Short-Eared Owl: during the nesting period, owls of this species occupy more humid habitats along riverbanks and protect their feeding areas, whereas the Long-Eared Owl nests in habitats of moderate humidity in small forested areas surrounded by open landscapes and is capable of expanding its food supply by incorporating shrews of the genus *Sorex* and steppe rodent species. The rations of both species are dominated by murine rodent species, which are dominant or subdominant in the small mammal community of the Barabinsk Forest-Steppe. Seasonal and interannual variations in the feeding spectra of both species are recorded.

Ключевые слова: мелкие млекопитающие, ушастая и болотная совы, рацион, ландшафт, Западная Сибирь.

Key words: small mammals, Long-Eared Owl, Short-Eared Owl, ration, landscape, Western Siberia.

ВВЕДЕНИЕ

Ушастая (*Asio otus*) и болотная (*A. flammeus*) совы – два близких широко распространенных вида с перекрывающимися ареалами, нередко обитающие в одних и тех биотопах и часто имеющие сходные спектры питания. Во многих районах это исключительно миофаги, питающиеся, как правило, наиболее массовыми видами мелких млекопитающих [1,2,3,4]. Гнездовые территории и критерии выбора охотничьих участков у ушастой и болотной сов различны. Ушастая сова при выборе участка ориентируется на наличие на прилегающей местности умеренно увлажненного местообитания с одиночными деревьями и кустарниками с обилием основного кормового объекта. Для гнездования занимает гнезда сорок, ворон и других птиц. Болотная сова обычно гнездится на земле, выбирая более влажные, переувлажненные местообитания, чаще всего на удалении от населенных пунктов, с высоким обилием мелких млекопитающих независимо от их видового состава. В литературе часто обсуждается степень стенофагии или эврифагии каждого из этих двух видов, нередко высказываются противоположные точки зрения [5,6].

Ушастая сова избирательна в отношении добычи и при высокой численности одного вида полевок специализируется на нем [7,8,9,10,11]. В интразональных местообитаниях, а также в случае депрессии численности основного вида грызунов спектр питания этой совы может существенно расширяться за счет дополнительных кормовых ресурсов [12].

Пищевые спектры болотной совы определяются обилием мелких млекопитающих на ее охотничьем участке, и пищевых предпочтений она не имеет [13,14,15,16]. Зона охоты у нее ограничена, и у птиц ярко выражено демонстративное поведение, направленное на защиту охотничьего участка. Тем не менее ушастая и болотная совы могут гнездиться и охотиться на одних и тех же территориях, проявляя «сглаженную» конкуренцию за ресурсы питания [6]. Цель настоящего исследования – выявление особенностей в питании ушастой и болотной сов в лесостепной зоне Западной Сибири, обитающих на одной территории и эксплуатирующих один и тот же пищевой ресурс.

ОСОБЕННОСТИ ЛАНДШАФТА ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Исследования проводились на территории, прилегающей к юго-восточному побережью оз. Малые Чаны (координаты 54°37'с.ш., 78°13'в.д.). Для причановского участка Барабинской низменности характерен равнинный рельеф местности с чередованием возвышенных увалов-грив и межгривных понижений, обычно имеющих однообразную ориентацию с северо-востока на юго-запад и являющихся результатом деятельности водных потоков в прошлом. Наиболее характерный элемент Барабинских ландшафтов – многочисленные озера, как правило, небольшие по размерам и мелководные, с пологими берегами, представляющими собой обширные тростниковые болота – займища. В южной части лесостепной зоны преобладают открытые местообитания: различные луговые степи, остепненные луга, галофитные группировки и другие формации, используемые под сенокосы, пастбища и пахотные земли. Леса представлены березовыми и осиново-березовыми колками в западинах и на гривах [17]. Основная часть работы выполнена на гриве в районе устья рек Каргат и Чулым. Грива представляет собой большой остров длиной около 10 км и площадью 5.5 км². Вдоль тростникового займища тянутся вейниковые и пырейные луга шириной 50 – 100 м. В северо-восточной части имеется небольшой участок разнотравно-злаковой степи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал собран в 1976 – 1983 г.г. Погадки ушастой и болотной сов собирали во второй половине мая – начале июня и во второй половине августа – сентябре около гнезд или в местах дневок, как правило, только свежие. Погадки коллектировали лишь при условии точного определения вида совы. Всего собрано 146 погадок ушастой и 68 погадок болотной сов, в которых определено соответственно 335 и 106 экз. млекопитающих. Из сухих погадок выбирали костные останки жертв. Определение останков до вида проводили по краниальным признакам и жевательной поверхности зубов с использованием определителей [18,19] и коллекций Зоологического музея ИСиЭЖ СО РАН. Серых и лесных полевок определяли в основном по морфологическим признакам первого нижнего моляра (M_1) и третьего верхнего (M^3). В данной работе используется номенклатура последнего издания *Mammal Species of the World* [20]. Костные останки считали принадлежащими одной особи, если в одной погадке встречались останки черепа, правой и левой нижней челюстей одного вида. Статистическая обработка данных проведена с помощью программного пакета Statistica 6.1. Различия долей оценивали по двустороннему t -критерию Стьюдента при уровне значимости $P < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На участке, где проводились исследования, ежегодно гнездились 1 – 2 пары ушастых и 2 – 3 пары болотных сов. Оба вида сов прилетают в первой половине апреля, максимальное их количество зарегистрировано в конце апреля – первой половине мая. Чаще всего сов обоих видов отмечали на дневке в колках и во время их охоты в утренние и вечерние часы. Кочевки этих сов в районе исследований начинаются в конце июля – начале августа, что подтверждается учетами на маршруте и с наблюдательного пункта (Рисунок 1).

Видовой состав мелких млекопитающих в питании изученных видов сов существенно не отличается и представлен 10 видами грызунов и 4 видами бурозубок рода *Sorex* (таблица 1). Останков птиц в погадках обоих видов сов не отмечено. Большим разнообразием отличаются пищевые связи ушастой совы: в погадках определены 14 видов мелких млекопитающих и ящерица (*Lacerta* sp.). В спектре ее питания из грызунов доминировала полевка-экономка (41.8%), а доля

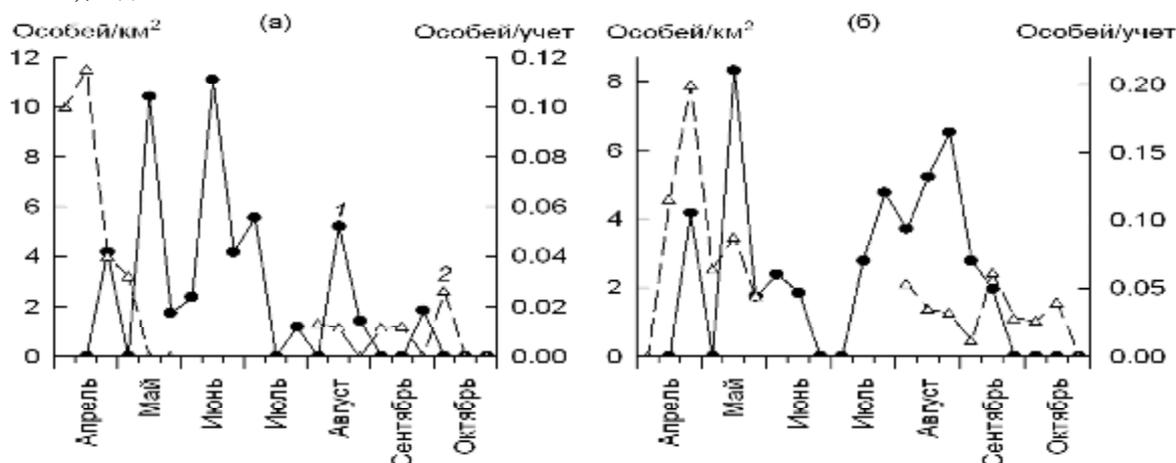


Рисунок 1 - Сезонная динамика встречаемости ушастой (а) и болотной (б) сов по данным маршрутных учетов (1, левая ось) и учетов с наблюдательного пункта (2, правая ось)

бурозубок составляла более 22%. Видимо, при невысокой численности основного кормового объекта ушастая сова расширяет зону охоты, в связи с чем увеличивается количество видов и меняется их соотношение.

В рационе болотной совы также доминировала полевка-экономка, доля которой составляла почти 60%. В ее спектре питания меньше бурозубок (около 8%), но значительно выше доля водяной полевки (9.4%), которая представлена только молодыми мелкими особями. В рационе болотной совы преобладают ($P < 0.001$) околотовные виды полевок (водяная и полевка-экономка).

При сравнении рациона питания двух видов сов показано, что спектр питания ушастой совы

расширен за счет степных видов грызунов (узкочерепная полевка, мышь-малютка, степная пеструшка) и насекомоядных (бурозубки рода *Sorex*, $P < 0.01$) и достоверно отличается от рациона болотной совы.

Таблица 1 Спектры питания ушастой и болотной сов в лесостепи Западной Сибири

Виды мелких млекопитающих	Ушастая сова		Болотная сова	
	Кол-во экз.	Доля, %	Кол-во экз.	Доля, %
<i>Sorex araneus</i> L.	9	2.7	4	3.8
<i>S. tundrensis</i> Merriam	3	0.9	-	-
<i>S. caecutiens</i> Laxm.	3	0.9	-	-
<i>S. minutus</i> L.	2	0.6	-	-
<i>Sorex</i> sp.	58	17.3	4	3.8
<i>Mus musculus</i> L.	8	2.5	1	0.9
<i>Apodemus agrarius</i> Pall.	6	1.8	1	0.9
<i>Apodemus</i> sp.	4	1.2	1	0.9
<i>Micromys minutus</i> Pall.	26	7.6	6	5.7
<i>Phodopus sungarus</i> Pall.	5	1.5	-	-
<i>Cricetus cricetus</i> L.	1	0.3	-	-
<i>Myodes rutilus</i> Pall.	6	1.8	1	0.9
<i>Lagurus lagurus</i> Pall.	17	5.1	4	3.8
<i>Arvicola amphibius</i> L.	10	3.0	10	9.4
<i>Microtus gregalis</i> Pall.	37	11.0	11	10.4
<i>M. oeconomus</i> Pall.	140	41.8	63	59.5
Общее количество остатков	335	100.0	106	100.0

Анализ сезонных изменений спектра питания ушастой совы показал, что в мае–июне достоверно ($P < 0.0001$) чаще встречаются степная пеструшка и полевка-экономка, а в августе–сентябре существенно ($P < 0.0001$) увеличивается доля бурозубок. Сезонное возрастание доли альтернативных видов жертв в питании ушастой совы отмечено и в других районах Европы и Северной Азии [7,21]. У болотной совы весной и в начале лета в рационе не встречаются бурозубки и достоверно больше доля полевки-экономки ($P < 0.001$), а осенью увеличивается доля водяной полевки ($P < 0.05$). Возможно, сезонная смена видов мелких млекопитающих в добыче сов связана с тем, что весной грызуны начинают интенсивно размножаться и активно перемещаются по территории, что позволяет хищникам вылавливать зверьков. Водяные полевки весной и в начале лета обитают в тростниковых займищах и только к осени выходят на гривы. Большая часть популяции этого грызуна представлена молодыми особями, которые и становятся жертвами сов. Расширение кормовых ниш обоих видов сов в послегнездовой период объясняется и тем, что в это время они не привязаны к определенным территориям и более лабильны в выборе мест охоты.

Сборы погадок ушастой совы проводили в течение 1980 – 1983 гг., что дало возможность проследить соотношение доминирующих и фоновых видов мелких млекопитающих за четыре года. Доля доминанта, полевки-экономки, в рационе значительно меняется по годам. Можно предположить, что в 1980 и 1981 гг. были спад и подъем численности, в 1982 г., скорее всего, пик, а в 1983 г. – спад. При относительно низкой численности полевки-экономки в питании совы повышается доля землероек и мыши-малютки, а при спаде (1983 г.) увеличивается доля степной пеструшки и узкочерепной полевки. В годы низкой численности полевки-экономки ее доля в спектре питания сокращалась, но никогда не опускалась ниже 33%. При уменьшении доли околородных грызунов возрастает роль степных видов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для ушастой и болотной сов на причановском участке Барабинской лесостепи характерна сходная стратегия использования кормовой базы.
2. У болотной совы зона охоты более ограничена, птицы защищают свои охотничьи участки в период гнездования и занимают увлажненные участки по берегам озер.

3. Ушастая сова гнездится в колках на умеренно увлажненных участках и способна расширять кормовую базу за счет бурозубок, а также других видов грызунов. В годы относительно низкой численности полевки-экономки в пищевом спектре ушастой совы увеличивается доля бурозубок, узкочерепной полевки и степной пеструшки. Склонность к стенофагии, отмеченная у данного вида в европейской части ареала, на юге Западной Сибири не наблюдается.
4. Для каждого вида сов отмечается сезонная изменчивость спектра питания. У болотной совы весной и в начале лета в рационе не встречаются бурозубки и высокая доля полевки-экономки, а осенью увеличивается доля неполовозрелых сеголеток водяной полевки. Спектр питания ушастой совы в мае–июне характеризуется большей долей степной пеструшки и полевки-экономки, а в августе–сентябре существенно увеличивается доля бурозубок.
5. В рационе сов преобладают такие виды мышевидных грызунов, которые являются доминантами либо субдоминантами в сообществе мелких млекопитающих Барабинской лесостепи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Marti, C.D. 1976. A review of prey selection by the Long-eared Owl. – *Condor* 78: 331–336.
- [2] Екимов Е.В. 2003. Трофические связи и пространственное размещение совообразных в Средней Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск. 23.
- [3] Шариков А.В., Холопова Н.С., Волков С.В., Макарова Т.В. 2009. Обзор питания сов в Москве и Подмоскovie. Совы Северной Евразии: экология, пространственное и биотопическое распределение. М.: 188–203.
- [4] Birrer S., 2009. Synthesis of 312 studies on the diet of the Long-eared Owl *Asio otus*.- Proc. Fourth World Owl Conf. Eds Johnson D.H., Van Nieuwenhuysse D. & Duncan J.R. Groningen, The Netherlands. *Ardea*: 97 (4): 615–624.
- [5] Bertolino, S., Ghiberti E., Perrone A. 2001. Feeding ecology of the long-eared owl (*Asio otus*) in northern Italy: is it a dietary specialist? - *Can. J. Zool.* 79: 2192–2198.
- [6] Волков С.В., Шариков А.В., Басова В.Б., Гринченко О.С. 2009. Влияние обилия мелких млекопитающих на выбор местообитаний и динамику численности ушастой (*Asio otus*) и болотной (*Asio flammeus*) сов.- Зоол. журн. 88 (10): 1248–1257.
- [7] Romanowski J., Żmihorski M. 2008. Effect of season, weather and habitat on diet variation of a feeding-specialist: a case study of the long-eared owl, *Asio otus* in Central Poland // *Folia Zool.* 57 (4): 411–419.
- [8] Басова В.Б. 2009. Сравнительная экология ушастой (*Asio otus*) и болотной (*A. flammeus*) сов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М. 23.
- [9] Волков С.В., Свиридова Т.В., Шариков А.В., Гринченко О.С., Кольцов Д.Б. 2009. Закономерности биотопического и пространственного распределения болотной совы в агроландшафте: влияние качественных характеристик местообитаний. Совы Северной Евразии: экология, пространственное и биотопическое распределение. М.: 188–203.
- [10] Екимов Е.В. 2010. Зональные особенности трофических связей ушастой совы в условиях степей и полупустынь Тувы. Вестник КрасГАУ. № 8. 59–63.
- [11] Голова С.В. 2011. Питание ушастой совы в аграрных районах нижегородского предволжья, Россия. Пернатые хищники и их охрана. Вып. 21. 176–180.
- [12] Дупал Т.А., Чернышов В.М. 2013. Мелкие млекопитающие в питании ушастой (*Asio otus*) и болотной (*A. flammeus*) сов на юге Западной Сибири.- *Экология*, 5: 356–360.
- [13] Clark R.J. 1975. A Field Study of the Short-Eared Owl, *Asio flammeus* (Pontoppidan), in North America. *Wildlife Monographs*. 47: 3–67.
- [14] Glue D.E. 1977. Feeding Ecology of the Short-eared Owl in Britain and Ireland. - *Bird Study* 24 (2): 70–78.
- [15] Roberts J.L., Bowman N. 1986. Diet and ecology of Short-eared Owls *Asio flammeus* breeding on heather moor. - *Bird Study* 33 (1): 12–17.
- [16] Шепель А.И. 1992. Хищные птицы и совы Пермского прикамья. Иркутск: 296.
- [17] Лапшина Е.И. 1978. Растительный покров. Новосибирская область. Природа и ресурсы. Новосибирск: Наука: 112–124.
- [18] Юдин Б.С. 1971. Насекомоядные млекопитающие Сибири (определитель). Новосибирск. Наука: 170.
- [19] Громов И.М., Ербаева М.А. 1995. Млекопитающие фауны России и сопредельных территорий. Зайцеобразные и грызуны. Санкт-Петербург. Вып. 167: 522.
- [20] Wilson D.E., Reeder D., M. (editors). 2005. *Mammal Species of the World. A Taxonomic and*

Geographic Reference (3rd ed), Johns Hopkins University Press. 2,142. URL: <http://www.departments.bucknell.edu/biology/resources/msw3/>.

[21] Song S., Zhao W., Zhao J-you, Shao M.-qin, Zice N.-fa. 2010. Seasonal variation in the diet of Long-eared Owl, *Asio otus*, in the desert of Northwest China. *Animal Biology* 60:115–122.

**Глава III/27: ОРНИТОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ БИОРАЗНООБРАЗИЯ В АРАЛО-КАСПИЙСКОМ РЕГИОНЕ
МЕТОДОМ ЗООГЕОГРАФИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ
Chapter III/27: Ornithological Monitoring for Biodiversity Conservation in the Aral-Caspian Region Using Zoo-Cartography Methods**

Эльдар А. Рустамов

DOI 10.25680/6972.2018.20.45.220

Эл. Почта: elldaru@mail.ru

Национальный институт пустынь, растительного и животного мира Туркменистана, ул. Битарап Туркменистан 15, корп.2, каб. 38, Ашхабад, Туркменистан

РЕЗЮМЕ. Показан опыт изучения населения птиц, как компонентов биоразнообразия, в аридных экосистемах Арало-Каспийского региона (Туркменистан, Северо-Западный Узбекистан, Западный Казахстан, Восточный Иран) путем зоогеографического картографирования. Его принципы служат основой для мониторинга и системного подхода к исследованиям компонентов биоразнообразия и практического использования результатов. В процессе орнитологического мониторинга проведена «паспортизация» ИВAs и сравнительный анализ ИВAs с сетью PAs. Выявились большие территории, недостаточно охваченные сетью ООПТ. Осуществлена инвентаризация и картографирование зимовок водоплавающих птиц. Проведено районирование водно-болотных угодий в связи с процессом крупномасштабной ирригации и трансформации среды обитания этой группы птиц.

Abstract. We report about bird populations' studies as biodiversity components, using zoo-cartography methods in the arid ecosystems of the Aral-Caspian region (Turkmenistan, North-West Uzbekistan, Western Kazakhstan, Eastern Iran). These principles are used as background for the monitoring and system approaches for studying of biodiversity components and practical applications. For "key ornithological territories" (IBAs) "passports" were issued during the process of monitoring, and a comparative analysis of IBAs with "specially protected natural territories" (PAs) was carried out. Vast territories without PAs were found. Inventory and cartography studies for waterbirds' wintering sites were provided. The area classification was developed for wetlands resulting from large-scale process of irrigations and transformation of the habitats of this group of birds.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Арало-Каспийский регион, мониторинг, биоразнообразие (БР), население птиц, зоогеографическое картографирование, районирование, ключевые орнитологические территории (ИВAs), особо охраняемые природные территории (ООПТ), водно-болотные угодья (ВБУ).

Keywords: Aral-Caspian region, monitoring, biodiversity, birds' population, zoo-cartography, area classification, IBAs, PAs, Wetlands.

ВВЕДЕНИЕ

До 1970-х гг. в изучении позвоночных дикой фауны Арало-Каспийского региона, в частности, Туркменистана господствовал эколого-фаунистический подход, количественные методы в полевых исследованиях животного мира (за исключением грызунов) развиты не были. Впервые методике количественных учетов в изучении орнитофауны на постоянных маршрутных трансектах стали применять с 1972 г. в предгорьях Копетдага [11] и Восточных Каракумах [1]. И чуть позже – с 1976 г., стали использовать методы изучения распределения и численности птиц для целей картографирования [12,13].

МНОГОЛЕТНИЙ МОНИТОРИНГ

Биогеографические, в частности, зоогеографические карты, особенно, карты по населению наземных позвоночных до сих пор считаются наименее разработанными, по сравнению с другими тематическими картами природы Центральной Азии. В Туркменистане по ряду причин это научное направление никогда не входило в планы и тематику научно-исследовательских институтов или ВУЗов. Тем не менее, автор занимается этим уже не одно десятилетие, являясь проводником и распространителем данного направления науки. Для изучения пространственно-временного распределения населения птиц, как неотъемлемых компонентов биоразнообразия (БР), в аридных экосистемах Центральной Азии, в частности Каракумах, эти методы [12,13] и, в целом, методологический подход были применены нами вслед за разработками Московской школы биогеографии второй половины XX в. в процессе биогеографических съемок в степных экосистемах Северного Казахстана [2,3,6,9,10,18,19,20,21,22].

Начиная с 1976 г. и на протяжении следующих десятилетий, методология эта получила дальнейшее развитие [4,5,8,12,14,15,23,24] при зоогеографических съемках автора и сборе материала для изучения структуры аридных экосистем и их БР в открытых ландшафтах Арало-Каспийского региона (Туркменистан, Северо-Западный Узбекистан, Западный Казахстан), а с 1994 г. в полупустынях и пустынях Ирана.

Весь комплекс работ и этапы наших исследований по изучению пространственного распространения и населения птиц строились и продолжают строиться на принципах и методах зоогеографического картографирования [14,20,21]: признание территориальных группировок населения птиц неотъемлемыми компонентами БР природно-территориальных комплексов, что определяет объект изучения как систему «животное население – местообитание»; привлечение количественных методов в изучении объекта; его динамика в пространстве и во времени; фиксация на картах результатов всех этапов исследования – от сбора исходной информации до конечного анализа; применение принципов и методов ландшафтной индикации, включая биоиндикацию; оценка объекта изучения на естественных и трансформированных территориях и ее экстраполяция на основе создания банков данных и модельных структур сообществ на природных и нарушенных территориях. Это всё позволяет разграничивать естественные и спровоцированные антропогенными факторами процессы в природных системах и в их биотических компонентах, определяющих состояние среды обитания животных (птиц).

Результаты учетов птиц использованы при создании оценочных шкал показателей численности, сопряженном анализе разных уровней их обилия и особенностей территории. Один из основных и дискуссионных вопросов – проведение границ на картах между группировками птиц (типами их населения) с разной эколого-этологической ориентацией и в разной степени подвижных. Важен выбор объективного и надежного индикатора, отражающего размежевание в пространстве и времени совокупностей особей разных видов. Таким индикатором мы выбрали признаки самой территории, физиономически выраженные и экологически обусловленные. Изучая индикационные свойства разных компонентов среды обитания по отношению к размещению и характеристикам птиц (отдельных видов, их групп и сообществ), автор, вслед за своим учителем – профессором кафедры биогеографии Московского университета А.М. Чельцовым-Бебутовым (1922-1978), пришел к заключению [21], что необходимо создавать свой вариант природной основы, который бы отражал регионально-типологические закономерности территории.

Такая карта местообитаний и легенда к ней были построены для Арало-Каспийского региона [14, 23]. Эту основу мы строили в процессе полевых съемок территории в ходе автомобильных количественных учетов птиц, выявляя особенности ландшафта и его выделов, влияющих на состав и частоту встречаемости видов. При помощи карты местообитаний можно не только иллюстрировать и фиксировать результаты зоогеографических или иных исследований, по ним можно было изучать общие и частные законы размещения птиц в зависимости от условий среды их обитания. При этом объектом картографирования считается «совокупность местообитаний животных и их животного населения». Это не совпадает с подходом многих зоологов, считающих объектом картографирования свойства и особенности самих животных, отдельных видов и их населения. Однако, отвлекаясь от этих разногласий, можно утверждать, что в результате наших исследований на картах отображаются сообщества птиц, в то время как на подавляющем большинстве имеющихся карт отражена информация об ареалах видов или о видах.

ПРИМЕРЫ

Представленные выше принципиальные положения служат основой для мониторинга и системного подхода к исследованиям компонентов БР и использования результатов в практической плоскости. Ограниченность объема статьи позволяет привести лишь два примера из нашего опыта.

1. В процессе продолжающегося орнитологического мониторинга (с 2005 г. по Программе RSPB) была проведена «паспортизация» наиболее важных местообитаний для охраны птиц. Используя упомянутую выше карту местообитаний птиц Арало-Каспийского региона, автор провел сравнительный анализ ключевых орнитологических территорий с существующей сетью особо охраняемых природных территорий (ООПТ), представленной государственными заповедниками и заказниками. Этот анализ показал, что она не вполне репрезентативна для сохранения БР, птиц в частности, и нуждается в расширении и корректировке. На карте (Рис. 1.), отображены совмещенные ООПТ и Ключевые орнитологические территории (IBAs).

В дальнейшем при оценке угроз территориальным группировкам населения птиц и всему БР при совмещенном анализе с экономическими картами (в частности, землепользования, охотпользования, транспорта, туризма), выявились большие территории, недостаточно охваченные сетью ООПТ. С учетом продолжающегося интенсивного экономического развития всего региона следует ожидать усиление антропогенного пресса как на освоенные, так и нетронутые пока районы (в первую очередь, при добыче углеводородов), а также процессы изменения структуры землевладения и землепользования. Эти угрозы будут усиливаться из-за отсутствия интеграции с задачами по сохранению БР в практике планирования и развития других секторов экономики. Картографирование БР и группировок населения птиц, в том числе, позволяет демонстрировать проблемные территории и ввести их в русло интересов других секторов по сохранению БР. Для этого необходима наглядная современная информационная карта, базируемая на количественных показателях и объективных критериях. Поэтому, орнитогеографический мониторинг и соответствующие орнитогеографические (зоогеографические) карты с указанием IBAs являются важным инструментом для интегрирования проблем БР в планирование и политику стран региона.

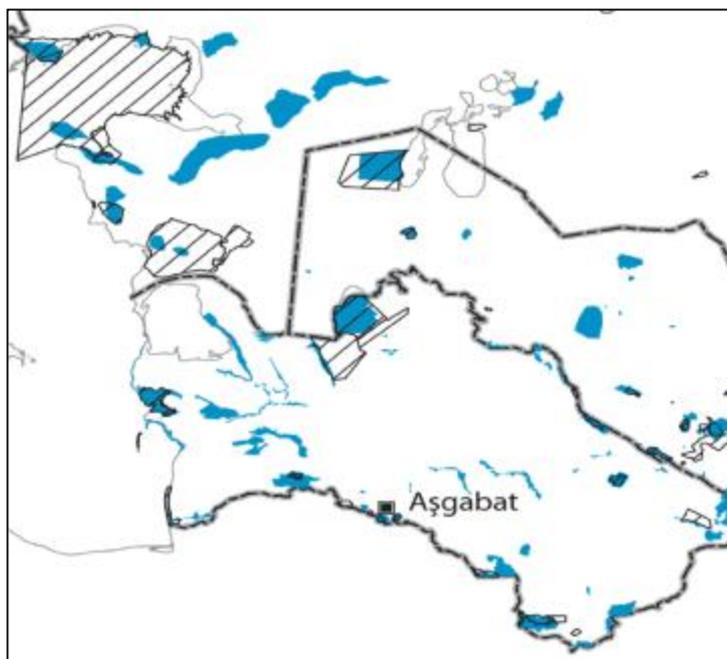


Рис. 1. IBAs (синий цвет) и ООПТ (штриховка) Арало-Каспийского региона [по: 7 и 17].

3. Многолетняя и широкомасштабная ирригация на равнинах Туркменистана и Узбекистана привела к огромному перераспределению огромных масс поверхностных вод и возникновению, наряду с естественной, также искусственной гидросети. В результате возникли новые места зимовок птиц, в первую очередь, водоплавающих и околоводных. При изучении в 1977-2012 гг. распределения и численности ресурсных видов на водно-болотных угодьях (ВБУ) региона в зимний период, была проведена инвентаризация и картографирование мест зимовок птиц и карта их местообитаний корректировалась следом за изменением гидросети поверхностных вод. В итоге была составлена картосхема по районированию водно-болотных угодий (Рис. 2) в связи с процессами крупномасштабной трансформации среды

обитания и изменения зимовок указанной группы птиц [16].

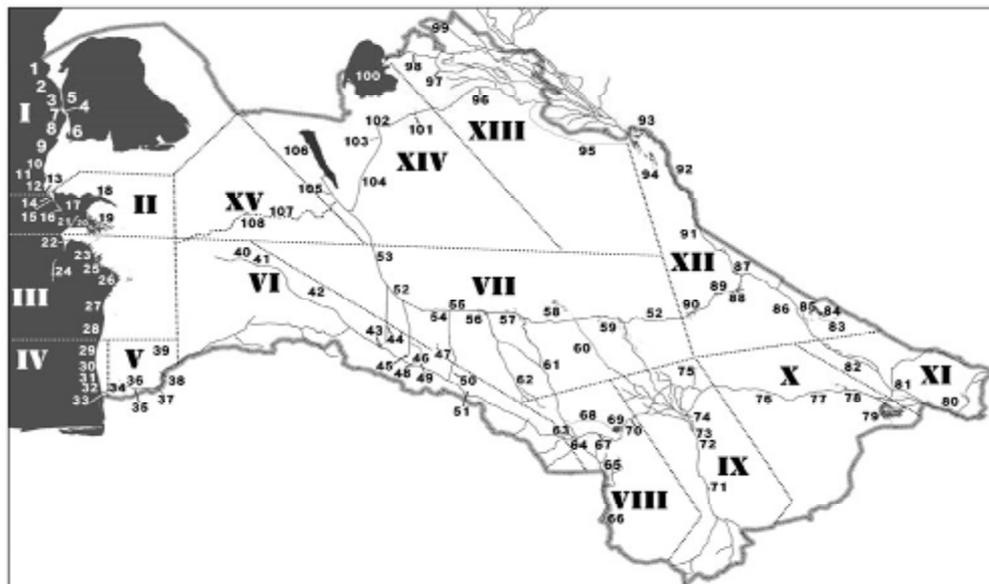


Рис. 2. Орнитогеографическое районирование зимовок водоплавающих птиц для оценки их ресурсов в Арало-Каспийском регионе (легенду см. [16])

С зоогеографической точки зрения, в результате строительства Каракумского канала (Каракумдарья) и её продвижения на запад Туркменистана, произошло соединение бассейнов Амударьи, Мургаба, Теджена и малых рек северного Копетдага и, как следствие, трансформация пустынных экосистем в гидрофильные и объединение не только ихтиофауны, но и фауны птиц и млекопитающих. Ирригационное строительство продолжается (система Туркменского озера Алтын асыр), и в ближайшем будущем автором поставлена цель провести орнитогеографическое картографирование естественных и трансформированных экосистем региона для целей сохранения БР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сравнительный анализ сети ИВAs с сетью ООПТ показал, что она не вполне репрезентативна для сохранения БР, в том числе и птиц, и нуждается в расширении и корректировке.
2. Инвентаризация и картографирование ВБУ и зимовок птиц корректировалась вслед за изменением гидросети. Составленная картосхема по районированию ВБУ дает основу для оценки обилия ресурсных видов.
3. С учетом продолжающегося интенсивного экономического развития региона следует ожидать усиление антропогенного пресса как на освоенные, так и нетронутые пока районы (в первую очередь, при добыче углеводородов), а также процессы изменения структуры землевладения и землепользования.
4. Поставлена цель проводить дальнейшее орнитогеографическое картографирование естественных и трансформированных экосистем для целей сохранения БР. Мониторинг и соответствующие орнитогеографические (зоогеографические) карты с указанием ИВAs являются важным инструментом для интегрирования проблем БР в планирование и политику стран региона.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Атаев К.А. 1976. Сезонная динамика населения птиц в экосистемах песчаной пустыни. Мат-лы советско-амер. симпоз. по биосферным заповедникам. М. Ч.1: 39-50.
- [2]Вернандер Т.Б., Викторов С.В., Воронов А.Г., Дыбская Т.И., Осадчая Н.П., Чельцов-Бебутов А.М. 1959. Опыт среднемасштабного биогеографического картографирования. География населения наземных животных и методы его изучения. М., АН СССР: 33-44.
- [3]Воронов А.Г., Чельцов-Бебутов А.М. 1962. К методике биогеографического картографирования открытых ландшафтов. Принципы и методы геоботанического картографирования. М.-Л., АН СССР:186-193.
- [4]Даниленко А.К., Румянцев В.Ю. 1999. Биологическое разнообразие населения наземных позвоночных и

- его отражение на карте. Вестник МГУ. Сер. 5. География. (5): 20–24.
- [5]Даниленко А.К., Рустамов Э.А. 1982. Картографический анализ сезонных аспектов населения птиц. Теоретические и прикладные аспекты биогеографии. М., Наука: 112-121.
- [6]Злотин Р.И., Пузаченко Ю.Г. 1964. О принципах типологии индивидуальных единиц в зоогеографии. Вестник МГУ. Сер.5. География: 44-51.
- [7]Кашкаров Р.Д., Уэлш Д.Р., Бромбахер М., Лановенко Е.Н. (ред.). 2008. Важнейшие орнитологические территории Узбекистана. Ташкент: UzSPB: 1-192 с.
- [8]Огуреева Г.Н., Котова Т.В. 2002. Картографирование биоразнообразия. География и мониторинг биоразнообразия. М., НУМЦ: 216-245.
- [9]Осмоловская В.И. 1962. Опыт количественного учёта и картирования населения птиц на большой территории. Исследования географии природных ресурсов: животного и растительного мира. М.: 78-90.
- [10]Пузаченко Ю.Г. 1964. Некоторые методические вопросы составления мелкомасштабных зоогеографических карт. Биогеографические очерки Кустанайской области. М., МГУ: 25-46.
- [11]Рустамов Э.А. 1975. Сезонная динамика численности птиц под Ашхабадом. Актуальные вопр. зоогеогр. Кишинев, Штиинца: 195-196.
- [12]Рустамов Э.А. 1980. Население птиц Теджено-Мургабского междуречья, его ресурсы и охрана (картографический анализ. Автореф. канд. дисс. М.: 1-25.
- [13]Рустамов Э.А. 1988. Население птиц Теджено-Мургабского междуречья и прилегающих пустынь (картографический анализ). Ашхабад, Ылым: 1-209.
- [14]Рустамов Э.А. 1991. Экологическая структура населения птиц аридных регионов (на примере Средней и Центральной Азии). Автореф. докт. дисс. М.: 1-56.
- [15a]Рустамов Э.А., Атаев К.А. 1991. Картографический анализ сезонных аспектов населения птиц Репетекского биосферного заповедника (сообщение 1). Пробл. осв. пустынь. 6: 44-49.
- [15b]Рустамов Э.А., Атаев К.А. 1992. Картографический анализ сезонных аспектов населения птиц Репетекского биосферного заповедника (сообщение 2). Пробл. осв. пустынь. 2: 43-52.
- [16]Рустамов Э.А., Белоусова А.В. 2012. Крупномасштабная трансформация среды обитания и изменение зимовок и численности водоплавающих птиц в Туркменистане за последние полвека. Орнитолог. вестник Казахстана и Средней Азии. 1. Алматы, МОО-СОПК-АСБК: 71-99.
- [17]Рустамов Э.А., Уэлш Д.Р., Бромбахер М. (ред.). 2009. Ключевые орнитологические территории Туркменистана. Ашхабад, МОП: 1-197.
- [18]Чельцов-Бебутов А.М. 1964. Некоторые вопросы зоогеографического картографирования (на примере карты Кустанайской области). Биогеографич. очерки Кустанайской области. М., МГУ: 5-24.
- [19]Чельцов-Бебутов А.М. 1970. Зоогеографическое картографирование и ландшафтоведение. Ландшафтный сборник. М., МГУ: 49-94.
- [20]Чельцов-Бебутов А.М. 1973. Зоогеографическое картографирование населения птиц и млекопитающих и его применение в комплексных региональных атласах (на примере атласов Кустанайской области, Северного Казахстана и Алтайского края). Автореф. ... докт. геогр. наук. М.: 1-43.
- [21]Чельцов-Бебутов А.М. 1976. Зоогеографическое картографирование: основные принципы и положения. Вестник МГУ. Сер.5. География (2): 50-56.
- [22]Чельцов-Бебутов А.М., Чибисова В.В. 1976. Животный мир и его ресурсы. Комплексные региональные атласы. М., МГУ: 326-341.
- [23]Rustamov E.A. 1994. Ecological Structure of the Bird Population in the Transcaspian Region: Cartographic Analysis and Problems of Conservation. Biogeography and Ecology of Turkmenistan. Kluwer Academic Publishers: 265-280.
- [24]Rustamov E.A. 2014. Turkmenistan: Landscape-Geographical Features, Biodiversity, and Ecosystems. The Handbook of Environmental Chemistry. 28: 9-22.

Chapter III/28: CHARACTERISING THE ABUNDANCE DYNAMICS OF FARMLAND BIRDS BY THE MOVING WINDOW METHOD

Глава III/28: Характеристика динамики численности птиц сельскохозяйственных земель методом скользящего окна

Jörg Hoffmann*1; Udo Wittchen1; Ulrich Stachow²

DOI 10.25680/9194.2018.60.98.221

*Email: Joerg.hoffmann@julius-kuehn.de

1.Federal Research Centre for Cultivated Plants; Institute for Strategies and Technology Assessment, Stahnsdorfer Damm 81, D-14532 Kleinmachnow, Germany

2.Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Eberswalder Str. 84, 15374 Muencheberg, Germany

ABSTRACT. Measurements of bird abundance are a valuable basis for many ecological assessments. In most cases the abundances are expressed by the counts of bird individuals exhibiting territorial behaviour. Compared to the usual individual values of abundances, we propose a novel method which characterizes the dynamics of abundances during the breeding season. This methodological development is based on field surveys by “territory mapping” in agricultural landscapes. The abundance curves for the breeding season show the „Moving Window Abundance”, derived at by three algorithms, Patchy-, Adjacent- and Overlapping Moving Window. At the example of the Skylark (*Alauda arvensis*) the results indicate the dynamics of bird abundance within landscape compartments and the landscape as a whole. The abundance curves for different crop species, for example wheat and maize, are strikingly different. The novel method can be integrated into monitoring programs and would make abundance values more meaningful as bioindicators.

Резюме. Показатель численности птиц является важной основой многих экологических оценок. В большинстве случаев такой показатель определяется через подсчеты отдельных индивидуумов, обитающих на территории. Для сравнения с обычными величинами численности индивидуумов в настоящей работе предлагается новый метод, который характеризует динамику численности в период размножения. Данное методологическое развитие опирается на полевые исследования с использованием «картографирования территорий» в сельскохозяйственных ландшафтах. Кривые численности для сезона размножения построены методом «Moving Window Abundance», использующим три алгоритма: «Patchy-», «Adjacent-» и «Overlapping Moving Window». На примере жаворонка полевого (*Alauda arvensis*) показана динамика численности птиц для отдельных участков ландшафта, а также для ландшафта в целом. Кривые численности, которые соответствуют ареалам разных сельскохозяйственных культур (например, пшеницы и кукурузы), имеют существенные различия. Новый метод может быть интегрирован в программу мониторинга; при этом показатель численности птиц приобретает ещё большее значение в качестве биоиндикатора.

KEYWORDS: Farmland birds, Skylark, Moving Window Abundance, Breeding season, agricultural landscape, field crops.

Ключевые слова: птицы сельскохозяйственных угодий, жаворонок, относительная численность, определенная методом скользящего окна, сезон размножения, сельскохозяйственный ландшафт, полевые культуры.

INTRODUCTION

Bird abundance data serve as an important base for the assessments of various biological characteristics, e.g. bird populations, regional and local situations, or as indication for biodiversity in habitats and landscapes. In seasonal regions, such as in Europe and Asia, most farmland bird species occupy breeding territories in the spring for the reproduction. These breeding season lies usually in Middle Europe between March and July. Depending on the type of species, one to three breeding cycles can be completed during this time range /1/. Normally, one to three observations of individuals or pairs with territorial behaviour are considered to be sufficient for assigning a territory (marked on the field map as territory point or small territory area) and in summary of all territories the abundance – the number of territories in a considered landscape section – for the breeding season /2, 3/. This method utilises the unit “territories per 10 or 100 ha” as one numerical abundance value /e.g. 1/. However, the method bears numerous uncertainties in

subjective decisions on the declaration of the territories /2/ and finally in the calculation of the abundances. These decisions include the questions:

- whether one or two or even more observations of birds with territorial behaviour on a certain spot are necessary to qualify as proof of an existing breeding territory,
- what spatial distance (m) of consecutive observations of the occurrence of bird individuals with territorial behaviour can be tolerated to assign these to one territory,
- if a territory was occupied only for a short period of time and then deserted, consequently being not identified as territory although a breeding had begun or had not been detected,
- whether the bird individuals switched to another habitat within the landscape during the breeding season, so that the summation of such individual values results in too high abundance values.

After spring migration, bird species arrive at landscapes at different dates, and also the length of the breeding season differs between species. Depending on weather conditions, land use etc. this can also vary within a species. Moreover, the territorial behaviour, which is identifiable by the field surveys, may also vary during the breeding period, depending on the species and partly also on the region. All these possible sources of variation call for objective, unequivocal and reproducible methods to characterize the bird abundances which respect temporal dynamics.

AIMS OF THE PAPER

The aim is to develop a method which describes the abundances of bird with territorial behaviour (in a border sense breeding birds) within a landscape or parts of a landscape exactly during the breeding season by a calculation method. That means (the dynamic if applicable) abundance should be described by a mathematical function which respects all of the observed bird individuals and pairs with territorial behaviour over time. The data of the individuals and pairs with territorial behaviour are to be collected through field survey within defined investigation areas within the agricultural landscape. We chose the Skylark (*Alauda arvensis*) as a model species for the development of the method, because it is a typical farmland bird species and bio-indicator for central European agricultural landscapes.

METHODS

The methodological development is based on data of the territory mapping of the birds /2, 4, 5, 8/ of 29 plots, each with a size of 1 km², within a German agricultural landscape (Fig. 1), studied in the year 2010 /6/. The total arable land was 2669 ha, structured in 136 single arable fields /4/. The individual's resp. pairs exhibiting territorial behaviour were mapped at eight dates, each within a time window of two weeks, beginning in the middle of March, and ending in the middle of July, hence each field was visited twice a month. Because the dates within the time windows were chosen almost randomly, data of individuals or pairs with territorial behaviour are available for almost every single day /4/.

The calculations of the bird abundances were done on the basis of all data (a total of 5661 observations of Skylarks with territorial behaviour) collected during the breeding season (March 16th to July 18th). Using the moving window approach, daily abundance values were calculated (in this method no observation data are ignored when calculation the abundance) with varying time window sizes: 1 day, 5 and 10 days, and half a month. Consequently, each value for a single day is calculated by all the values within the respective time window, i.e. the number of observed individuals or pairs with territorial behaviour per unit area. Because the Skylarks occur only on arable land, all data refer to these areas (see above). These values form the basis for the abundance functions for the breeding season, which we call Moving Window Abundance (MWA), see Fig. 2. Three calculation methods were distinguished and tested, Patchy Moving Window (PMWA), Adjacent Moving Window (AMWA) and Overlapping Moving Window (OMWA). PMWA uses the exact dates on which observations were carried out. This may lead to some "zero abundance" values for single arable fields, if no birds with territorial behaviour were observed within that area. PMWA covers the whole breeding season and was executed in two ways: PMWA1 separately for the observations on each individual field on a day and PMWA2 for the sum of all observations on all fields made on a day. AMWA uses abundance values for consecutive time windows for 5 and 10 days and half month periods without overlap, whereas OMWA does the same as AMWA but with a shift of the window (5 days, 10 days, half a month) by one day for each value, resulting in an overlap of one day for two adjacent windows. The numbers of time windows for which abundance values were calculated by the algorithms differed accordingly: 1088 and 101 (PMWA1 and PMWA2); 25, 13 and 8 (AMWA1, AMWA2 and AMWA3); 121, 116 and 111 (OMWA1, OMWA2 and OMWA3), and formed different bases for

MWA calculations /7/. The three calculation methods were conducted by the NLIN procedure with the statistical software package 'SAS'TM for the entire landscape and separately for the field crops of winter oilseed rape and maize.



Figure 1 – German agricultural landscape – subarea of one of the investigation areas; left side – field with oilseed rape, middle – diverse structured hedge, right – field with maize to the beginning of growth. Photo: Jörg Hoffmann

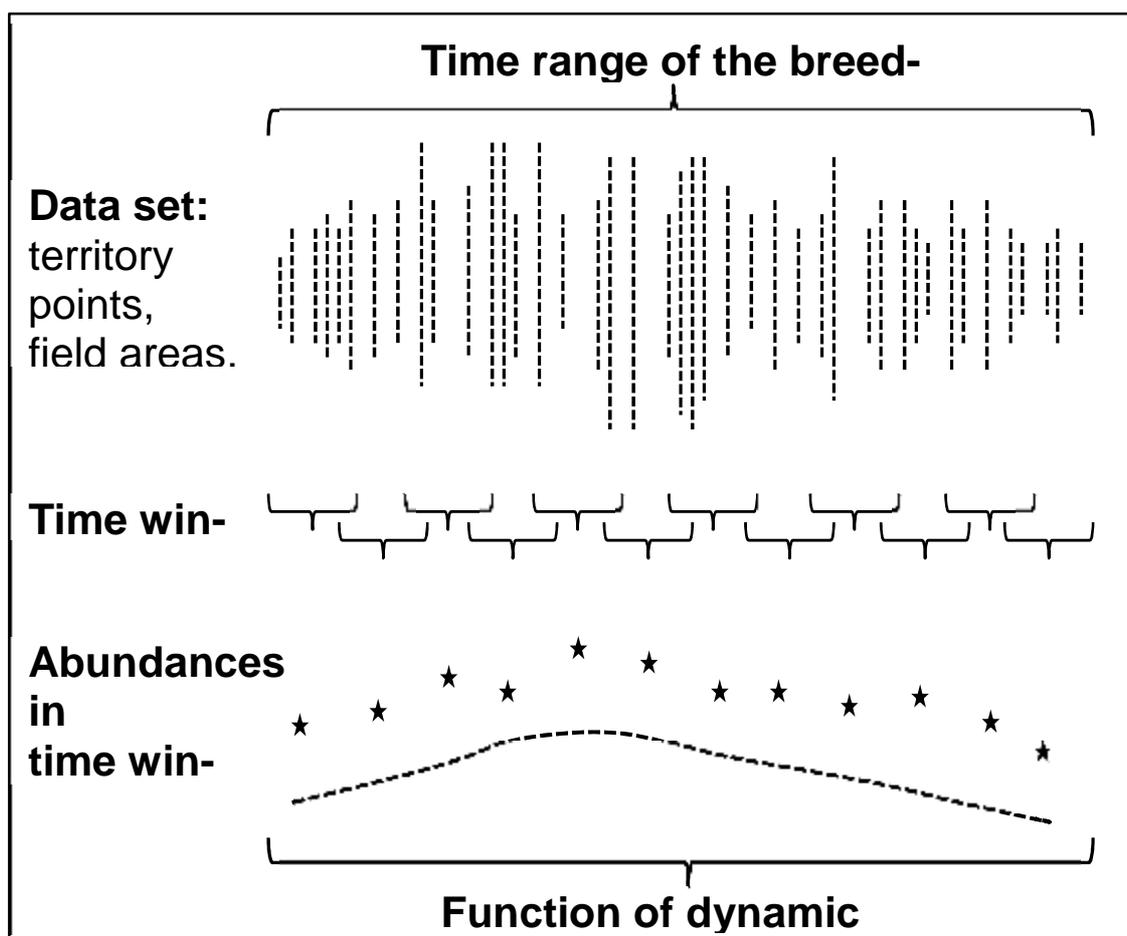


Figure 2 – Scheme of the Moving Window Abundance (MWA): entire time range of the breeding season, data sets of abundance values throughout the breeding season, selected time windows, calculated abundance values within the time windows and functions of the dynamic abundance /7/.

The MWA functions to describe the abundances by applying PMWA, AMWA and OMWA are summarized in Table 1. PMWA1 exhibits large variance and is not significant, all other functions are significant. The abundance of Skylarks during the breeding season (four months) across the agricultural landscape, characterized by the 29 plots, exhibits temporal dynamics in all calculation procedures, as shown by statistical parameters (significance, standard deviation, variability, minimum, median, maximum). Depending on the algorithm applied the abundance maximum is found during the second half of April or beginning of May.

RESULTS

We used OMWA for further statistical tests and MWA calculations because of smaller variances and larger number of daily values compared to PMWA. In this way significant differences between crop species became obvious, specifying the overall abundance of the whole landscape. As an example shown in Figure 2, a comparison between oilseed rape, grown on 689ha, and maize (649 ha) reveals that in oilseed rape fields the abundance maximum of Skylark is reached 44 days earlier than in maize, i.e. middle of April (the 107th day) vs. maize in the end of May (151th day). Similarly, the values of the mathematical functions of MWA between the crop species partly indicate large differences /7/.

Table 1: Functions of the Skylark abundances (parameters and statistics) for the Moving Window Abundance (MWA) methods (A – abundance, ITB – individuals or pairs with territorial behaviour).

Methods	MWA functions: $y = ax^2 + bx + c$			p	Range of A (ITB/10 ha)		A maximum (time phase)
	a	b	C		from	to	
PMWA1	-0.00023732	0.06129	-0.68276	0.0230	2.08	3.27	129. day
PMWA2	-0.00022488	0.05453	-0.39370	0.0005	1.57	2.91	121. day
AMWA1	-0.00550	0.26122	-0.16610	< 0.0001	1.48	3.01	5. April-pentad
AMWA2	-0.02102	0.51033	-0.20053	0.0004	1.60	2.90	3. April-decade
AMWA3	-0.05480	0.90395	-0.81050	0.0036	1.52	2.92	2. April-half
OMWA1	-0.00022435	0.05223	-0.10643	< 0.0001	1.37	2.93	116. day
OMWA2	-0.00021410	0.04821	+0.23351	< 0.0001	1.31	2.95	113. day
OMWA3	-0.00021607	0.04853	+0.21863	< 0.0001	1.50	2.94	112. day

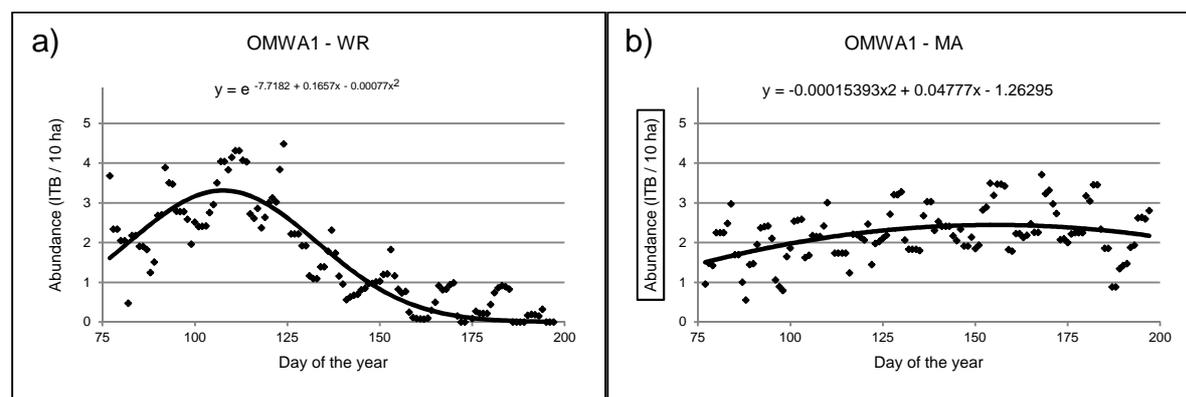


Figure 2 - Abundance (individuals or pairs with territorial behaviour (ITB) per 10 ha) and progression of the Moving Window Abundance (MWA) of the Skylark according to the OMWA1 in a) WR – winter oilseed rape and b) MA – maize. /9/.

APPLICATION

The application of MWA to characterize bird abundances sets important methodological quality standards in respect to objectivity and reproducibility which might be especially useful for bird monitoring programs in landscapes /5, 6/ by which many data on bird species with territorial behavior are generated. All data are stored in data bases, in the calculation algorithms are integrated and the mathematical functions can be tested statistically. This makes the results unequivocal, traceable and transparent. The new Moving

Window Abundance Method has potential for applications and adoptions to bird monitoring in various landscapes, e.g. in Central and Western Europe, Russia and Central Asia.

CONCLUSIONS

1. The length of the breeding season and changes in habitat conditions pose challenges to the characterisation of abundances of breeding birds in agricultural landscapes.
2. Single values does not sufficiently describe the processes that occur during this period if the abundance values vary within the breeding season. Hence, in such cases, habitat evaluations are restricted.
3. Because single abundance values on a landscape scale (in this case, agricultural landscapes) and habitat scales (in this case, crop fields) exhibit large variations which was shown with the MWA method, their use as a basis for general statements is statistically valid only when there is a sufficient sample size and temporal dynamics are considered.
4. These requirements pose challenges for future field surveys and data analyses in research in particular but also for on-going monitoring programs. Monitoring programs may profit by better accuracy.
5. Statistically valid parameters of the abundance equations can be inferred, including maximum, mean, median and integral. This parameters improve analyzes of cause and effect relationships.

REFERENCES

- [1] Bauer, H.G., Fiedler, W., Bezzel, E., (Hrsg.), 2005. Das Kompendium der Vögel Mitteleuropas. Band 1-3. Aula, Wiesbaden.
- [2] Fischer, S., Flade, M., Schwarz, J., 2005. 2.3.1 Revierkartierung. In: Südbeck, P., Andretzke, H., Fischer, S., Gedon, K., Schikore, T., Schröder, K., Sudfeldt, Ch. (Hrsg.), Methodenstandards zur Erfassung der Brutvögel Deutschlands. Mugler Druck, Hohenstein-Ernstthal, pp. 47-53.
- [3] Meichtry-Stier, K.S., Jenny, M., Zellweger-Fischer, J., Birrer, S., 2014. Impact of landscape improvement by agri-environment scheme options on densities of characteristic farmland bird species and brown hare (*Lepus europaeus*). Agriculture, Ecosystems and Environment 189, 101-109.
- [4] Hoffmann, J., Berger, G., Wiegand, I., Wittchen, U., Pfeffer, H., Kiesel, J., Ehlert, F., 2012. Bewertung und Verbesserung der Biodiversität leistungsfähiger Nutzungssysteme in Ackerbaugebieten unter Nutzung von Indikatorvogelarten. Berichte aus dem Julius Kühn-Institut 163.
- [5] Hoffmann, J., Wittchen, U., Stachow, U., Berger, G. 2013. Identification of habitat requirements of farmland birds based on a hierarchical structured monitoring scheme. Chinese Birds 4(4): 265-280.
- [6] Hoffmann, J., Wittchen, U., Stachow, U. 2018. Methods and results of bird monitoring in agricultural landscapes as indicator for biodiversity (in this book).
- [7] Hoffmann, J., Wittchen, U., Stachow, U., Berger, G. 2016. Moving window abundance – a method to characterize the abundances dynamics of farmland birds: the example of the Skylarks (*Alauda arvensis*). Ecological Indicators 60: 317-328.
- [8] Südbeck, P., Andretzke, H., Fischer, S., Gedeon, K., Schikore, T., Schröder, K., Sudfeldt, CH., (eds), 2005. Methodenstandards zur Erfassung der Brutvögel in Deutschland. Radolfzell.

Основная глава 9.3 Млекопитающие Main Chapter 9.3 Mammals

Глава III/29: ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАСЕЛЕНИЯ МЛЕКОПИТАЮЩИХ ЯКУТИИ

Chapter III/29: Impact of Anthropogenic Factors on Mammal Populations in Yakutia

Яков Л. Вольперт^{1*}, Елена Г. Шадрина²,

DOI 10.25680/6157.2018.56.63.222

*Эл. Почта: ylv52@mail.ru

1. Институт прикладной экологии Севера СВФУ им М.К. Аммосова, пр. Ленина 1, 677000 Якутск, Россия

2. Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, пр. Ленина 41, 677890 Якутск Россия

РЕЗЮМЕ. Проведен анализ причин изменения видового разнообразия млекопитающих на территории Якутии за последние два столетия, с использованием данных по закупкам в XIX-XX веках и собственных исследований по последствиям промышленного освоения территории природных ландшафтов (1988-2014 гг.). Выявлено, что состояние населения охотничьих видов млекопитающих за проанализированный отрезок времени в первую очередь определяло антропогенное воздействие, а не абиотические и биотические условия окружающей среды. Сравнительный анализ воздействия широкого круга техногенных факторов на население млекопитающих, имеющих потребительскую ценность, показал, что наибольшие последствия для этой группы имеет усиление прямого преследования, тогда как для остальных видов - трансформация территории природных ландшафтов.

Abstract. We analysed the reasons for changes in the species diversity of mammals in Yakutia over the past two centuries. For this study we used data on land purchases in the XIX-XX centuries and own research data on the consequences of industrial development of the territory of natural landscapes (1988-2014). It was revealed that the state of the population of hunting mammal species for the analysed period of time was primarily determined by anthropogenic impacts, and not by the abiotic and biotic conditions of the environment. A comparative analysis of the impact of a wide range of technogenic factors on the population of mammals having consumer value showed that the intensification of direct pursuit had the greatest consequences for this group, while for other species - the transformation of natural landscapes was most important.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: млекопитающие, охотничьи виды, мелкие млекопитающие, техногенные факторы, девственные ландшафты, антропогенное воздействие, охотничий промысел, техногенные трансформации.

Keywords: mammals, hunting species, small mammals, human-made factors, virgin landscapes, anthropogenic impact, hunting, technogenic transformations.

ВВЕДЕНИЕ

Причины трансформаций населения животных традиционно привлекали внимание экологов. Этот вопрос стал особенно актуальным в последнее время в связи с проблемой глобального изменения климата и необходимостью построения долговременного прогноза возможных трансформаций биоценозов, детерминированных этим процессом. Последняя задача особенно актуальна на фоне постоянно увеличивающегося отторжения территории природных ландшафтов на всем северо-востоке России.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основной методической трудностью прогнозирования долговременных изменений структуры и состава населения животных, в частности млекопитающих, является отсутствие длительных рядов наблюдений, полученных репрезентативными методами. В такой ситуации многие исследователи обращаются к данным по заготовкам охотничье-промысловых видов. Нами сделана попытка анализа причин изменения видоразнообразия млекопитающих на территории Якутии за последние два столетия на основе имеющихся достоверных данных, в том числе заготовкам продукции охотничьего промысла в XIX веке[1].

В течение 1995-2015 гг. проводились специальные исследования, которые были направлены на изучение трансформации населения млекопитающих при техногенном освоении территории. Распределение промысловых видов изучалось на специально заложенных маршрутах по следам жизнедеятельности в снежный период. Мелкие млекопитающие отлавливались ловчими канавками с конусами, параллельно облавливались территории, подвергнувшиеся техногенному воздействию различной интенсивности и природные местообитания, которые рассматриваются нами как контрольные.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Судя по имеющимся архивным материалам закупок пушнины [1] основой пушного охотничьего промысла в Якутии в XIX веке являлись: соболь (*Martes zibellina* L.), а также белка (*Sciurus vulgaris* L.), горностай (*Mustela erminea* L.) и лисица (*Vulpes vulpes* L.). Роль соболя к началу XIX века значительно снизилась по сравнению с первыми этапами сбора ясака, который собирался в основном соболями (рис. 1).

Пушной промысел в конце XIX и в первой половине XX веков ограничивался белкой, колонком (*Mustella sibiricus* Pallas), горностаем и лисицей. Наиболее ценный вид – соболь – судя по архивным данным, практически исчез в Якутии к концу XIX века [2]. Начиная с конца 60-х годов XX столетия, опять начинает увеличиваться в заготовках доля соболя. Именно этот вид в настоящее время является основным пушно-промысловым видом по всей таежной зоне Якутии. Традиционные же виды охотничьего промысла – белка, горностай, песец и заяц-беляк – в настоящее время утратили свое значение.

В рамках поставленной задачи представляет интерес проанализировать причины столь кардинальных изменений роли отдельных видов в охотничьем промысле.

Как мы отмечали, первые существенные трансформации связаны с изменением объемов промысла соболя, при этом спрос на этот вид пушнины не снижался, а наоборот возрастал. Соответственно должна быть веская причина снижения объема заготовок. Существует достаточно устойчивое мнение, что основной причиной исчезновения соболя на большей части ареала произошло по причине перепромысла [3]. Рост заготовок во второй половине XX века, – результат активных реаклиматизационных усилий [2, 4].

Существенные изменения коснулись и массовых видов копытных. Так, по имеющимся литературным данным лось практически исчез на большей части Якутии к началу XIX века [5]. В данном случае можно предположить массовую эпизоотию и параллельно интенсификацию преследования, так как у населения появилось огнестрельное оружие.

Таким образом, можно констатировать, что уже XVIII-XIX столетиях популяции охотничьих видов млекопитающих претерпевали серьезные изменения, которые были предположительно связаны с деятельностью человека, а именно с промыслом.

Если анализировать причины изменения численности охотничье-промысловых видов, которые произошли в XVIII-XIX столетиях из-за недостатка информации нам крайне сложно, то флуктуации, которые фиксируются в настоящее время, в определенной степени поддаются такому анализу.

Согласно классическим представлениям экологии, на любые популяции животных влияет широкий круг абиотических и биотических факторов среды [6]. В настоящей работе мы не имеем возможности останавливаться на влиянии указанных факторов на популяции животных, эта проблема широко освещена в литературе, в том числе и посвященной млекопитающим Якутии, а, принимая совокупность абиотических и биотических факторов как данность, определенную особенностями региона, остановимся только на роли антропогенных факторов, вопроса гораздо менее изученного.

Как было показано нами ранее [7, 8] по формам возможного антропогенного воздействия млекопитающих можно разбить на две категории. Первая – виды, которые подвергаются прямому преследованию и опосредованному воздействию через отторжение территорий, загрязнения, фактор беспокойства, и т.д. В эту группу входят, в первую очередь, млекопитающие, представляющие потребительскую ценность – охотничьи и охотничье-промысловые виды, а также часть особо охраняемых. Вторая группа включает виды, на которые оказывается только опосредованное воздействие, это животные, не имеющие потребительской ценности – насекомоядные, большинство грызунов и т.д. Охотничьи виды подвергаются влиянию обоих форм воздействия, что и определяет их высокую уязвимость.

Из широкого круга факторов техногенного воздействия, влияние которых проанализировано нами, на примере изучения влияния целого ряда промышленных объектов: отторжение территории, прямое преследование, увеличение беспокойства, гибель в технических устройствах, техногенное загрязнение, основным фактором, влияющим на состояние охотничьих видов млекопитающих, при освоении девственных территорий является прямое преследование. [7; 8], а на млекопитающих, не имеющих потребительской ценности - техногенная трансформация ландшафта. Причем тяжесть и продолжительность воздействия зависит от географической зональности. В условиях Арктики последствия трансформации носят более глубокий характер, и, по-видимому, население не способно к восстановлению исходного облика. На популяционном уровне реакция фиксируется при более слабых воздействиях, чем на уровне сообществ, но при достижении определенного уровня негативная реакция имеет лавинообразный характер [8]. В настоящее время на территории Якутии наиболее существенные изменения численности претерпевают копытные. В частности, существенно снизилось поголовье лоса (*Alces alces* L.) [9] и дикого северного оленя (*Rangifer tarandus* L.) [10].

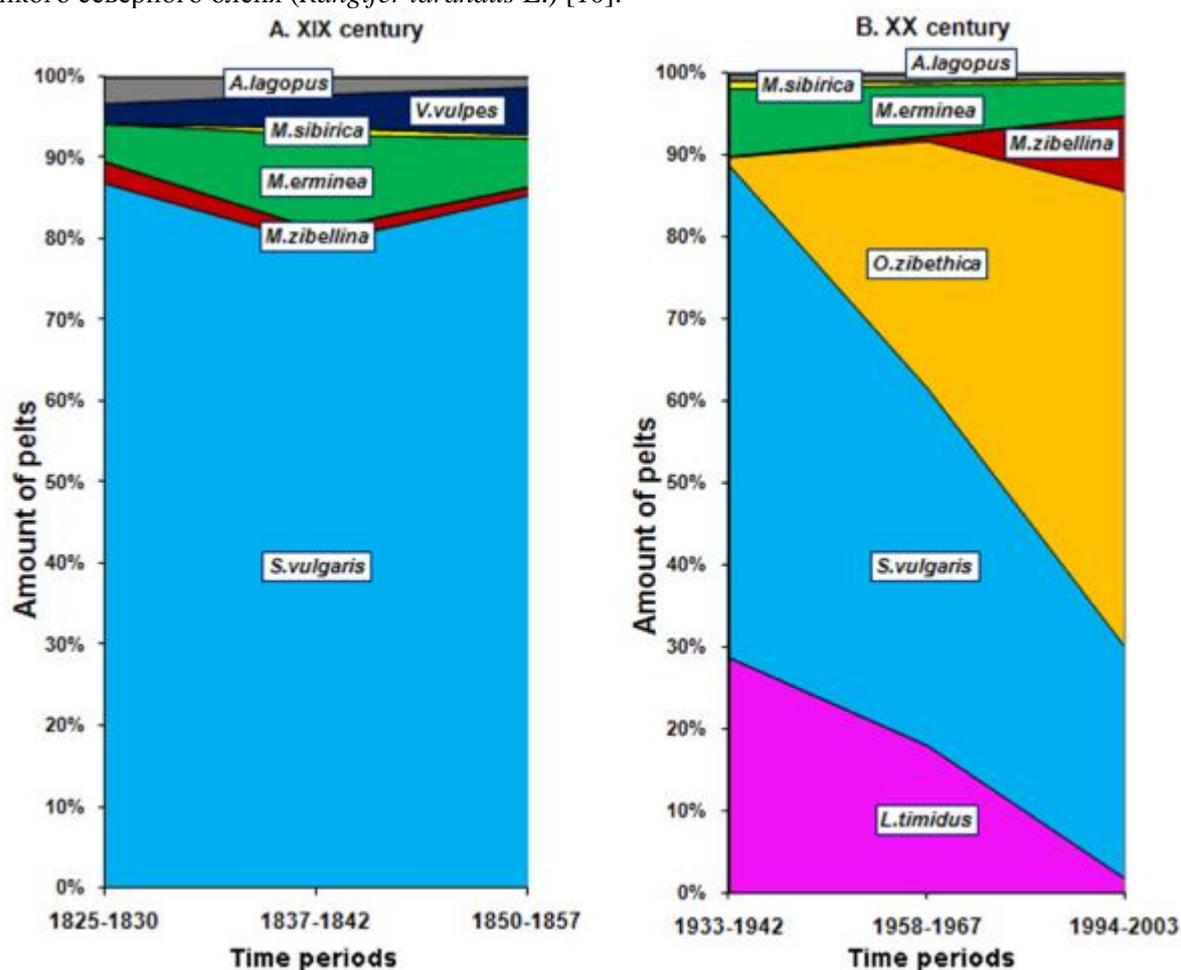


Рисунок 1 - Изменения структуры пушного промысла в Якутии (данные архивные и официальной статистики)

К чему приводит чрезмерная эксплуатация ресурсов, хорошо видно на примере лоса. Как уже указывалось, лось практически исчез на большей части Якутии к началу XIX века [5]. Депрессия продолжалась до 50-х годов XX века, затем началось увеличение численности в результате введения полного запрета на отстрел (рис. 2).

После роста численности, который продолжался до конца 80-х годов, начинается стремительный спад, по нашим оценкам сейчас численность вида сократилась более чем в два раза. Причем в наиболее антропогенно освоенных регионах, этот процесс начался значительно раньше, и спад численности еще глубже. С нашей точки зрения, основной причиной указанного явления является перепромысел, даже официальное изъятие на Лено-Алданском междуречье в разы превышало

допустимые нормы. Причем параллельно с сокращением численности произошли негативные перестройки пространственной структуры популяций, что в свою очередь отразилось на состоянии поголовья [9].

Похожая ситуация наблюдается с состоянием поголовья дикого северного оленя: нерациональный промысел привел к деградации тундровых стад этого вида, более того снижение численности сопровождается нарушением половозрастной структуры популяции, [10], что и привело к современному критическому состоянию этого вида в Якутии.

Еще одним интересным примером воздействия роли фактора прямого преследования является изменение характера динамики численности зайца-беляка в центральных регионах Якутии. Этот вид ранее играл значительную роль в охотничьем промысле. Было показано, что в Якутии наблюдается 11-13 летний цикл численности, причем амплитуда колебаний составляла до 2 000 раз, при этом плотность на пике численности достигала 1 особи на 1 га [11, 12].

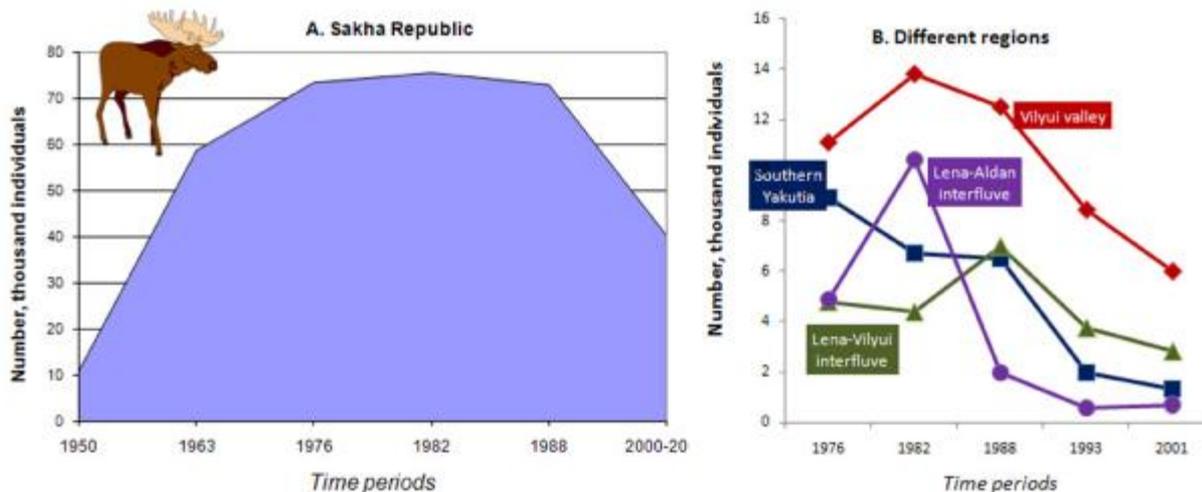


Рисунок 2 - Изменения численности лося по данным авиаучетов на территории Якутии в целом (А) и по регионам (Б) 2000-2001 - данные ДБР МОП РС (Я)

В настоящее время высокие показатели плотности и традиционный характер изменения численности, наблюдаются только в Верхоянье, где интенсивность преследования за прошедшее время практически не изменилась. В Центральной Якутии, где антропогенная освоенность территории значительно выше, интенсивность охоты в последние несколько десятилетий значительно возросла, характерные ранее для этого региона четко выраженные пики численности исчезли, а плотность вида до последнего времени находится на очень низком уровне [13].

Таким образом, в настоящее время на состояние целого ряда охотничьих видов на территории Якутии оказал влияние нерациональный промысел, который привел к деградации промысловых популяций.

Помимо промысла, на население млекопитающих Якутии существенно повлияли реакклиматизационные и акклиматизационные мероприятия. Говоря о реакклиматизации в первую очередь необходимо упомянуть соболя, поголовье которого было успешно восстановлено.

Завоз ондатры (*Ondatra zibethica* L.) является достаточно редким примером акклиматизации, которая дала большой практический эффект [2]. Кроме ондатры, в Якутии в XX веке была завезена еще американская норка (*Mustela vison* Schreber.) и степной хорь (*Mustela eversmanni* Lesson), результаты завоза последнего вида можно однозначно признать не удачными, тогда как норка заселила южную, юго-восточную и юго-западную Якутию [14; 15]. В 2001-2002 гг. завозились бобры (*Castor fiber* L.), которые не смогли выжить в Якутии. Кроме того, в последнее 20-летие в Якутию завезены овцебыки (*Ovibos moschatus* Zimmermann), которые в настоящее время успешно осваивают тундровую зону.

Помимо преднамеренных мероприятий по акклиматизации животных имел место и непреднамеренный завоз двух синантропных видов: серой крысы (*Rattus norvegicus* Berkenhout) и домовый мыши (*Mus musculus* L.). В настоящее время эти виды отмечаются практически во всех населенных пунктах Якутии [2]. При этом указанные виды не способны в условиях Якутии существовать круглогодично в природных местообитаниях и, следовательно, появление этих животных не оказало реального влияния на население млекопитающих природных ландшафтов.

Рассматривая ситуацию в целом необходимо отметить, что в последние два столетия именно антропогенный фактор оказал определяющее влияние на видоразнообразие охотничье-промысловых млекопитающих на территории Якутии, и скорее всего всей Сибири в целом.

Причем выделяются два противоположных тренда: на первом этапе (в данном случае освоение Якутии русскими первопроходцами в XVIII веке) численность наиболее ценных и по-видимому наиболее уязвимых видов (соболь, лось) снижается, почти до полного уничтожения, по крайней мере до потери промыслового значения. Затем в XX веке в результате целенаправленных мероприятий восстанавливается численность указанных видов, и появляется новый акклиматизированный вид – ондатра, численность которого стремительно возрастает.

В настоящее время наблюдается уменьшение поголовья основных промысловых видов копытных, которые являются наиболее уязвимыми из-за низкой интенсивности размножения. В любом случае структуру населения охотничьих видов за проанализированный отрезок времени определял антропогенный фактор, а не абиотические и биотические факторы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Наряду с природными факторами наибольшее влияние на охотничье виды, даже на мало заселенных территориях, к каковым относится Якутия, имеет прямое преследование, интенсивность которого зависит, в первую очередь, от социально-экономических условий.
2. Состояние населения млекопитающих, не имеющих потребительской ценности, более стабильно, в данном случае основную роль играет трансформация ландшафта, которая оказывает влияние на всех животных.
3. При прогнозе будущих флуктуаций населения, необходимо учитывать, что освоение территории природных ландшафтов постоянно возрастает в силу специфики развития производительных сил общества.

БЛАГОДАРНОСТИ. Выражаем свою искреннюю благодарность коллегам, к.б.н. В.А. Данилову, к.б.н. В.В. Величенко, к.б.н. М.М. Сидорову, принимавшим участие в полевых исследованиях.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Минобрнауки России 5.8169.2017/8.9, базового проекта РАН АААА-А17-117020110058-4 и гранта РГНФ №17-402-00214.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дьяконов А.Л. Пушной промысел в Якутии конца XVIII середины XIX века. - Якутск: изд-во ЯНЦ, 1990. – 144 с.
- [2] Млекопитающие Якутии / Под ред. В.А. Тавровского. – М.: Наука, 1971. – 660 с.
- [3] Бакеев Н.Н., Монахов Г.И., Сеницын А.А. Соболь. – Вятка: изд-во ГНУ ВНИИОЗ, 2003.- 334 с.
- [4] Грязнухин А.Н. Результаты реакклиматизации соболя в Якутии // Фауна и экология наземных позвоночных таежной Якутии. – Якутск, 1980. - С. 43-79.
- [5] Маак Р.К. Виллойский округ Якутской области. – СПб. Ч.II, 1886. – 368 с.
- [6] Одум Ю. Основы экологии. - М.: Мир, 1975. - 740 с.
- [7] Вольперт Я.Л., Величенко В.В., Аргунов А.В. Роль антропогенных факторов в существовании охотничье-промысловых видов млекопитающих Якутии // Прикладная экология Севера (опыт проведенных исследований, современное состояние и перспективы). - Якутск, 2003. - С. 184-192.
- [8] Вольперт Я.Л. Трансформации населения млекопитающих при промышленном освоении девственных территорий Севера// Фундаментальные исследования, 2012, № 4, ч. 1. - С. 186-199.
- [9] Вольперт Я.Л. Влияние антропогенного фактора на распределение лося *Alces alces* L., 1758 (*Artiodactyla*, *Cervida*) в Якутии // Сибирский экологический журнал. – 2001. - №1. – С. 83-86.
- [10] Сафронов В.М. Экология и использование дикого северного оленя в Якутии. - Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2005. - 177 с.
- [11] Попов М.В. Распространение и численность зайца-беляка в Якутии // Исследования причин и закономерностей динамики численности зайца-беляка в Якутии. - М., 1960. – С. 7-17.
- [12] Соломонов Н.Г. Очерки популяционной экологии грызунов и зайца-беляка в Центральной Якутии. - Якутск: кн. изд-во, 1973. - 247 с.
- [13] Вольперт Я.Л. Роль антропогенных факторов в существовании млекопитающих Якутии // Проблемы региональной экологии. – 2014. - №1. – С. 98-103.
- [14] Ревин Ю.В. Млекопитающие Южной Якутии.- Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989.- 321 с.

[15]Мордосов И.И. Млекопитающие таежной части Западной Якутии. Якутск: изд-во ЯНЦ СО РАН, 1997. - 219 с.

Глава III/30: ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ GEOEYE-1 ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СРЕДООБРАЗУЮЩЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЕВРАЗИЙСКОГО БОБРА (CASTOR FIBER L.) НА ПРИБРЕЖНЫЕ ЛЕСНЫЕ ЛАНДШАФТЫ

Chapter III/30: Using Geoeye-1 Satellite Data to Study the Influence of Engineering Activity of Eurasian Beaver (Castor Fiber L.) on Riparian Forest Landscapes

Зоя И. Горяйнова*1; Варос Г. Петросян1; Николай А. Завьялов²

DOI 10.25680/6126.2018.94.45.223

*Эл. Почта: zoyag2012@gmail.com

1.Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Ленинский проспект, 33, 119071, Москва, Россия

2.Государственный природный заповедник «Рдейский», Челпанова, 27175270, Новгородская обл., г. Холм, Россия

РЕЗЮМЕ. Бобр является экосистемным инженером, оказывающим значительное влияние на прибрежные лесные ландшафты. Цель работы – изучить потенциальные возможности применения спутниковых данных сверхвысокого пространственного разрешения для выявления бобровых прудов и каналов, а также оценить влияние средообразующей деятельности бобра на гетерогенность прибрежных ландшафтов. Впервые были применены спутниковые данные GeoEye-1 для анализа влияния средообразующей деятельности евразийского бобра (*Castor fiber* L.) на прибрежные лесные ландшафты Приокско-Террасного природного заповедника. Применение алгоритма усиления высоких частот для повышения пространственного разрешения мультиспектральных данных снимка позволило выделить объекты строительной деятельности бобра с линейными размерами до 0,5 м. нормализованный водный индекс (NDWI) использовался для автоматической идентификации бобровых прудов и каналов. Полученные количественные оценки длин и извилистости береговой линии бобровых прудов демонстрируют важность этого вида для увеличения гетерогенности прибрежных лесных ландшафтов.

Abstract. The beaver is an ecosystem engineer that considerably affects riparian forest landscapes. The aim of this work is to study the possibilities of using very-high spatial resolution satellite data for the identification of beaver ponds and channels, as well as to assess the influence of beaver engineering activity on the heterogeneity of riparian landscapes. For the first time satellite data GeoEye-1 were used to analyze the influence the engineering activity of the Eurasian beaver (*Castor fiber* L.) on the riparian forest landscapes of the Prioksko-Terrasny Nature Reserve. The application of the high-pass filter to increase the spatial resolution of the multispectral data made it possible identify out the objects of beaver's construction activity with linear dimensions of up to 0.5 m. Normalized Difference Water Index(NDWI) was used to automatically delineate beaver's ponds and channels. The resulting quantitative estimates of the length and complexity of the shoreline of the beaver ponds demonstrate the importance of this species for increasing the heterogeneity of riparian forest landscapes.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: евразийский бобр, экосистемный инженер, спутниковые данные, паншарпенинг, NDWI, бобровые пруды, каналы, прибрежные лесные ландшафты

Keywords: Eurasian beaver, ecosystem engineer, satellite data, pansharpening, NDWI, beaver ponds, channels, riparian forest landscapes

ВВЕДЕНИЕ

Бобр значительно влияет на пойменно-болотные экосистемы, в связи с чем, его относят к видам средообразователям или «экосистемным инженерам». Масштабы изменений, производимых бобром, столь велики, что бобровые местообитания иногда называют бобровыми ландшафтами [1].

Бобровые пруды значительно увеличивают гетерогенность прибрежных ландшафтов. Одним из немало важных факторов в этом является форма береговой линии бобровых прудов, ее извилистость. Важным фактором удлинения и усложнения береговой зоны бобрового пруда являются

прокладываемые бобрами от пруда каналы. Прокладывая каналы от одного водно-болотного участка до другого, бобры также создают структурную связность ландшафта [2].

Совместное использование данных наземных измерений и дистанционного зондирования на основе использования гео-информационных систем (ГИС) является перспективным методом изучения влияния средообразующей деятельности бобра на прибрежные ландшафты.

Целью данной работы является изучение возможности применения спутниковых данных сверх-высокого пространственного разрешения GeoEye-1 для картирования бобровых прудов и каналов, а также оценка влияния средообразующей деятельности бобра на гетерогенность прибрежных ландшафтов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа проводилась на территории Приокско-Тerrasного природного заповедника (ПТЗ), расположенного в Московской области ($54^{\circ}51' - 54^{\circ}55'$ с. ш., $37^{\circ}34' - 37^{\circ}41'$ в. д.), где евразийский бобр (*Castor fiber* L.) обитает с 1948 г.

В исследовании использовались спутниковые данные GeoEye-1 для территории заповедника с пространственным разрешением 0,41 м для панхроматического и 1,65 м для мультиспектральных каналов. Время съемки – 21 июня 2010 г.

Предварительно была проведена радиометрическая калибровка спутниковых данных. Для возможности выделения на снимке бобровых каналов, ширина которых обычно составляет 0,3-0,6 м [3], была проведена процедура паншарпенинга – объединения мультиспектральных каналов с более низким пространственным разрешением с панхроматическим каналом более высокого разрешения. Для этого был использован алгоритм усиления высоких частот (фильтр усиления высоких частот), который представляет собой сложение исходного мультиспектрального изображения и его высокочастотной составляющей [4]:

$$НВ(x,y; K) = \text{изображение}(x,y) + K \cdot \text{НР}(x,y), K \geq 0,$$

где НВ – результирующее изображение с более высоким пространственным разрешением, НР – высокочастотная составляющая изображения, K – параметр, определяющий степень четкости изображения. В данном случае он равнялся 9.

В ряде работ было показано, что применения данного метода вносит минимальную погрешность в спектральные значения цветных каналов, и, в то же время, значительно повышает качество последующей классификации синтезированных изображений [5, 6].

Применение алгоритма позволило повысить разрешение мультиспектральных каналов снимка до 0,5 м, благодаря чему стало возможным оконтуривание бобровых прудов, а также выделение бобровых каналов (рис. 1).

Для автоматического выделения прудов и каналов использовался так называемый водный индекс, NDWI, который был предложен McFeeters [7] для выделения водных объектов на заболоченных территориях и успешно применяется в этих целях [7, 8]. Данный индекс основывается на том факте, что вода поглощает энергию в ближнем инфракрасном диапазоне и, значит, спектральные значения водных объектов в этом диапазоне электромагнитного спектра значительно ниже, чем в видимой части спектра. Индекс рассчитывается по формуле:

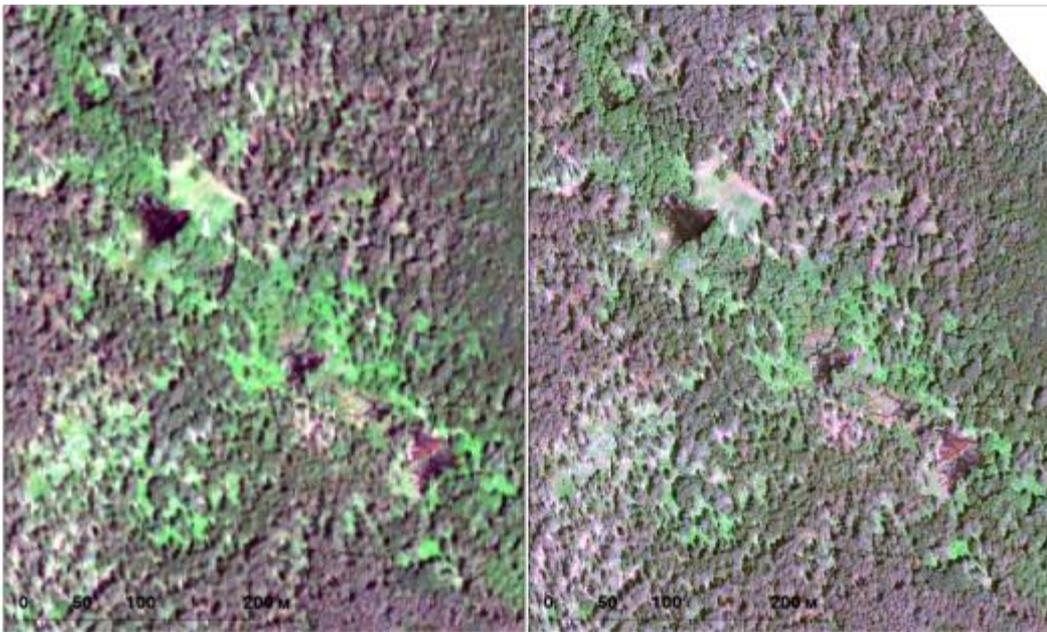
$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

где, NIR – спектральная яркость объекта в ближней инфракрасной области спектра, Green – в зеленой области спектра.

Так как бобровые каналы были также идентифицированы на рукотворных копанях, занятых бобрами, эти объекты также были включены в исследование.

Полученные с помощью расчета водного индекса контуры прудов с каналами из растрового (рис. 2а) конвертировались в векторный формат (рис. 2б, с) для возможности оценки размерных характеристик объектов.

Выделенные на спутниковых данных бобровые объекты были верифицированы на основе данных геозарегистрированных бобровых прудов, полученных в ходе маршрутных обследований водотоков заповедника в 2010 г. Весь пространственный анализ проводился с помощью программного пакета ArcGis 10.4.1.



a)

b)

Рисунок 1 - Сравнение изображения GeoEye-1 до и после применения фильтра высоких частота а) до применения паншарпенинга б) после применения паншарпенинга

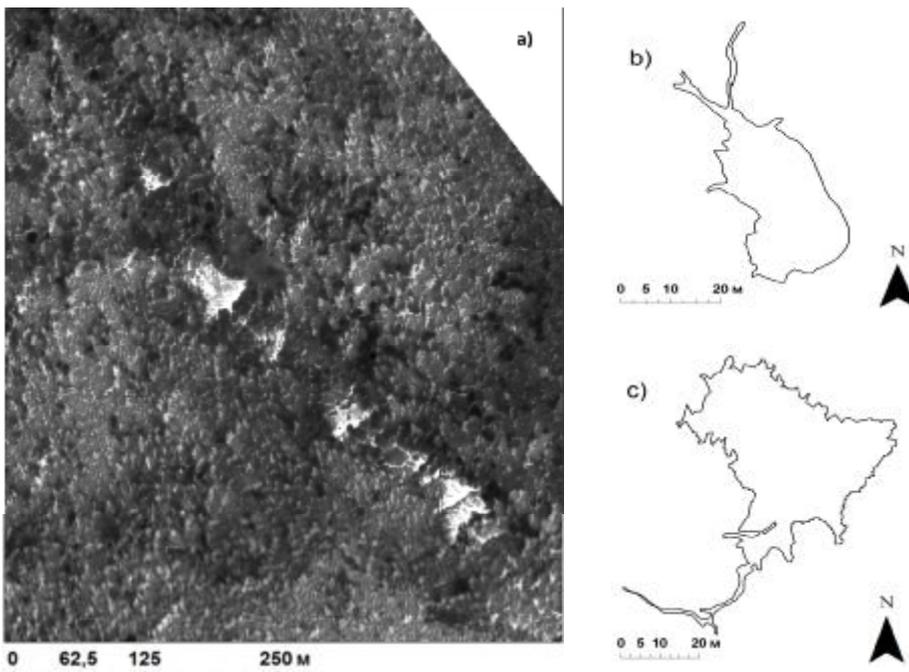


Рисунок 2 – Выделенные на спутниковом снимке GeoEye-1 объекты средообразующей деятельности бобра а) каскад бобровых прудов на изображении, полученном в результате расчета NDWI б) векторный контур рукотворного пруда, заселенного бобрами в) векторный контур бобрового пруда

Для оценки извилистости береговой линии прудов использовался индекс близости формы бассейна к окружности (с), предложенный Миллером [9]. Этот индекс позволяет оценить, насколько форма берега водного объекта близка к идеальному кругу, и рассчитывается по формуле:

$$C=4\pi A/P^2$$

где А – это площадь пруда, Р – периметр пруда.

Значение индекса, равное 1 соответствует абсолютно правильному кругу. Значения меньше 1 соответствуют более сложной, извилистой береговой линии.

Сравнение средней длины береговой линии и значения индекса (с) проводилось с использованием дисперсионного анализа с равными и неравными количествами повторностей в ячейках (ANOVA) с уровнем значимости $p=0,05$. Во всех случаях применяли модели типа I, т.е. модели с двумя фиксированными факторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы оценить, как каналы влияют на длину береговой линии прудов (и соответственно гетерогенность прибрежных ландшафтов) в бобровых поселениях на исследуемой территории, на основе векторных контуров прудов были рассчитаны периметр пруда без и с отходящими от него каналами. Для этих двух случаев также оценивалась извилистость береговой линии с помощью индекса близости формы бассейна к окружности (с). Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1 - Оценки параметров береговой линии для двух случаев прудов: с каналами и без них

	Бобровый пруд безканалов	Бобровый пруд с каналами	Не бобровый пруд, занятый бобрами, без каналов	Не бобровый пруд, занятый бобрами, с каналами
Средняя длина береговой линии, м	203±86*	316±94	160±62	315±112
Общая длина береговой линии, м	5829	7833	1125	2083
Средний индекс (с)	0,32±0,15	0,119±0,04	0,45±0,09	0,15±0,12

Подсчеты показали, что присутствие каналов статистически достоверно увеличивает среднюю длину береговой линии бобровых прудов на 55% ($p=0.037$), при этом увеличение общей длины затопленного берега благодаря каналам составило 34%. Извилистость береговой линии за счет каналов достоверно увеличивается в среднем на 62% ($p=0.005$).

Для рукотворных копаней, занятых бобром, эффект от строительства на их берегах каналов оказался еще более значительным: в среднем длина береговой линии увеличилась на 96%, а извилистость берега статистически достоверно – на 65% ($p=0.034$). Эти оценки свидетельствуют о том, что даже в отсутствии бобровых прудов каналы остаются важным фактором преобразования прибрежных ландшафтов.

Полученные результаты демонстрируют важную роль бобра в создании местообитаний. Сложная конфигурация берегов бобровых прудов и копаней, которые бобры заселяют, увеличивает гетерогенность ландшафтов на локальном уровне за счет увеличения длины береговой линии, создания заводей для укрытия водоплавающих птиц, а также потенциальных коридоров передвижения различных животных по бобровым каналам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение алгоритма усиления высоких частот для повышения пространственного разрешения мультиспектральных каналов спутниковых данных GeoEye-1 дало положительные результаты при дальнейшем автоматическом анализе изображения и позволило выделять объекты средообразующей деятельности бобра с линейными размерами до 0,5 м.
2. Водный индекс NDWI показал свою пригодность для автоматического выделения объектов средообразующей деятельности бобра.
3. Сравнительные количественные оценки длины и извилистости береговой линии бобровых прудов и рукотворных копаней, занятых бобрами, показывают, что средообразующая деятельность бобра может выступать важным фактором повышения гетерогенности прибрежных лесных ландшафтов.

Благодарности: Сбор данных на территории ПТЗ поддержан грантом РФФИ 15-04-06423 и программой ОБН РАН «Рациональное использование биологических ресурсов России». Анализ спутниковых данных eoEye-1 реализован при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-14-10323.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Фадеев, Е. В. Бобр и ландшафт. Природное и сельскохозяйственное районирование СССР. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. - 110-113.
- [2]Hood, G., Bayley, S. 2008. Beaver (*Castor canadensis*) mitigate the effects of climate on the area of open water in boreal wetlands in western Canada. - *Biological Conservation* 141: 556-567.
- [3]Collen, P., Gibson R. 2001. The general ecology of beavers (*Castor* spp.), as related to their influence on stream ecosystems and riparian habitats, and the subsequent effects on fish – a review. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 10: 439–461.
- [4]Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. - 560 с.
- [5]Gangkofner, U., Pradhan Pushkar, S., Holcomb Derrold, W. 2008. Optimizing the High-Pass Filter Addition Technique for Image Fusion. - *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 74 (9): 1107-1118.
- [6]Wenbo, W., Jing, Y., Tingjun, K. Study of remote sensing image fusion and its application in image classification. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008.
- [7]McFeeters, S. 1996. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. - *International Journal of Remote Sensing* 17(7):1425–1432.
- [8]Bhandari, A., Kumar, A., Singh, G. 2014. Improved feature extraction scheme for satellite images using NDVI and NDWI technique based on DWT and SVD. - *Arabian Journal of Geosciences*. Published online. DOI 10.1007/s12517-014-1714-2.
- [9]Glynnis, A., Larson, D. 2015. Ecological engineering and aquatic connectivity: A new perspective from beaver-modified wetlands. - *Freshwater Biology* 60: 198–208. DOI: 10.1111/fwb.12487.

Глава III/31: АНАЛИЗ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ БОБРОВ (*Castor fiber L.*) И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ЭКОСИСТЕМЫ МАЛЫХ РЕК В ЗАПОВЕДНИКАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА И МОДЕЛИРОВАНИЯ
Chapter III/31: Analysing the Restoration of the Eurasian Beaver (*Castor Fiber L.*) Number's and their Impact on the Ecosystems of Small Rivers in the Reserves of the European Part Of Russia Using Field Observation Data and Modelling

Варос Г. Петросян^{*1}, Николай А. Завьялов², Зоя И. Горяйнова¹, Федор А Осипов¹.

DOI 10.25680/6879.2018.86.60.224

*Эл. Почта: petrosyan@sevin.ru

1. Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Ленинский проспект, 33, 119071, Москва, Россия

2. Государственный природный заповедник «Рдейский», Челпанова, 27175270, Новгородская обл., г. Холм, Россия

РЕЗЮМЕ. Цель данной работы – анализ восстановления численности бобра (*Castor fiber L.*) в европейской части России и прогноз возможных изменений экосистем после его вселения в заповедники. Представлены результаты анализа популяционной динамики бобра в Лапландском, Дарвинском, Приокско-Террасном, Центрально-Лесном, Окском, Мордовском и Хопёрском заповедниках, расположенных на севере, юге и в центре ареала, на основе данных многолетнего мониторинга (50-70 лет) и дискретной модели, учитывающей обратную связь животных с кормовыми ресурсами. Показано, что паттерны динамики численности бобра могут быть описаны с помощью моделей 4 типов: эруптивный; одноступенчатый с квазипериодическим колебанием, многоступенчатый с квазипериодическими колебаниями и логистическим трендом изменения численности с периодическими колебаниями вокруг него. Выявлено, что воздействие бобра на ландшафты зависит от плотности популяции, особенностей рельефа и кормовых ресурсов территории. Анализируются возможные изменения ландшафта в результате деятельности бобра.

Abstract. The aim of this work is to analyze the restoration of the beaver (*Castor fiber* L.) in the European Russia and to forecast possible changes in ecosystems after its introduction into the reserves. The results of the analysis of beaver populations dynamics in Laplandskiy, Darvinskiy, Prioksko-Terrasny, Central-Forest, Okskiy, Mordovskiy and Khoperskiy reserves, located in the northern, southern and central part of the species range, are presented based on the long-term monitoring data (50-70 years) and a discrete model taking into account the feedback between the animals and their food resources. The results demonstrate that the patterns of the beaver population dynamics can be described using four types of models: eruptive, single-stage or multistage with quasi-periodic oscillation, and logistic trend of population dynamics with periodic oscillations around it. This work reveals that the beaver's impact on landscapes depends on the population density, relief characteristics, and territory's food resources. Possible changes in the landscapes resulting from the beaver's activity are analyzed.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Евразийский бобр, экосистемные инженеры, ландшафт, мониторинг, моделирование

Keywords: Eurasian beaver, ecosystem engineers, landscape, monitoring, modeling

ВВЕДЕНИЕ

Бобры (*Castor fiber*, *C. canadensis*) получили широкую известность как средообразователи, ключевые виды и экосистемные инженеры [1]. В восстановлении численности речного бобра (*C. fiber*) на территории России огромную роль играли заповедники. Они были местами сохранения оставшихся популяций и центрами дальнейшего расселения бобров. В настоящее время роль заповедников не менее важна, поскольку только для заповедных территорий имеются долговременные данные по динамике численности бобров, в них проводится мониторинг состояния среды, и именно на заповедных территориях мы можем лучше понять возможные изменения биотических и абиотических параметров среды, обусловленные многолетним обитанием бобров.

Цель данной работы – анализ восстановления численности бобров в заповедниках европейской части России и прогноз возможных изменений экосистем после вселения бобров.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

С учетом ограниченности ресурсов и предположений, рассмотренных в работе [2] была построена следующая параметрическая дискретная по времени модель, описывающая численность бобров и доли активного, потенциального и деградированного ресурсов по времени:

$$P_{k+1} = P_k + F \frac{P_k^{(a)}}{P_k}, q_1, q_2, q_3, q_4, \ddot{P}_k, R_{k+1}^{(a)} = R_k^{(a)} - q_6 P_k + q_5 R_k^{(p)}$$

$$R_{k+1}^{(p)} = R_k^{(p)} - q_5 R_k^{(p)} + q_7 R_k^{(d)}, R_k^{(d)} = 1 - R_k^{(a)} - R_k^{(p)} \quad (1)$$

$$F(x, q_1, q_2, q_3, q_4) = q_2 + (q_1 - q_2) \frac{x - q_3}{\sqrt{q_4^2 + (x - q_3)^2}};$$

$P_k = P(t_k)$, $R_k^{(a)} = R^{(a)}(t_k)$, $R_k^{(p)} = R^{(p)}(t_k)$, $R_k^{(d)} = R^{(d)}(t_k)$, $t_{k+1} = t_k + Dt$, $k = 1, 2, 3, \dots$; $Dt = 1$; $k=1, 2, 3, \dots$; где P_k , $R_k^{(a)}$, $R_k^{(p)}$ и $R_k^{(d)}$ - соответственно численность бобров, уровни активных, потенциальных и деградированных ресурсов (в относительных единицах) в момент t_k , $F(x, q_1, q_2, q_3, q_4)$ - коэффициент прироста численности бобров; $P_1, R_1^{(a)}$ и $R_1^{(p)}$ - значения численности бобров, активного и потенциального ресурсов соответственно в начальный момент времени t_1 , q_1 - предельное значение коэффициента прироста численности бобров; q_2 - значение коэффициента прироста численности бобров; q_3 - уровень активного ресурса, приходящегося на одного бобра, необходимого для нормального существования популяции; q_4 - параметр, определяющий крутизну функции $F(x, q_1, q_2, q_3, q_4)$ в точке перегиба, q_5 - доля потенциального ресурса, которая переходит за год в активное состояние; q_6 - доля активного ресурса, потребляемая за год одним бобром; q_7 - доля деградированного ресурса, которая переходит за год в потенциальное состояние.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Долговременная динамика численности бобров и прогноз. Динамика численности бобров важна не только для понимания биологии самого вида, но и для анализа преобразованных бобрами местообитаний [3-5], и зависимых от преобразований видов [6,7]. На основании литературных данных нами была составлена гипотетическая модель динамики численности бобров [1], состоящая из следующих стадий (рис. 1, I).

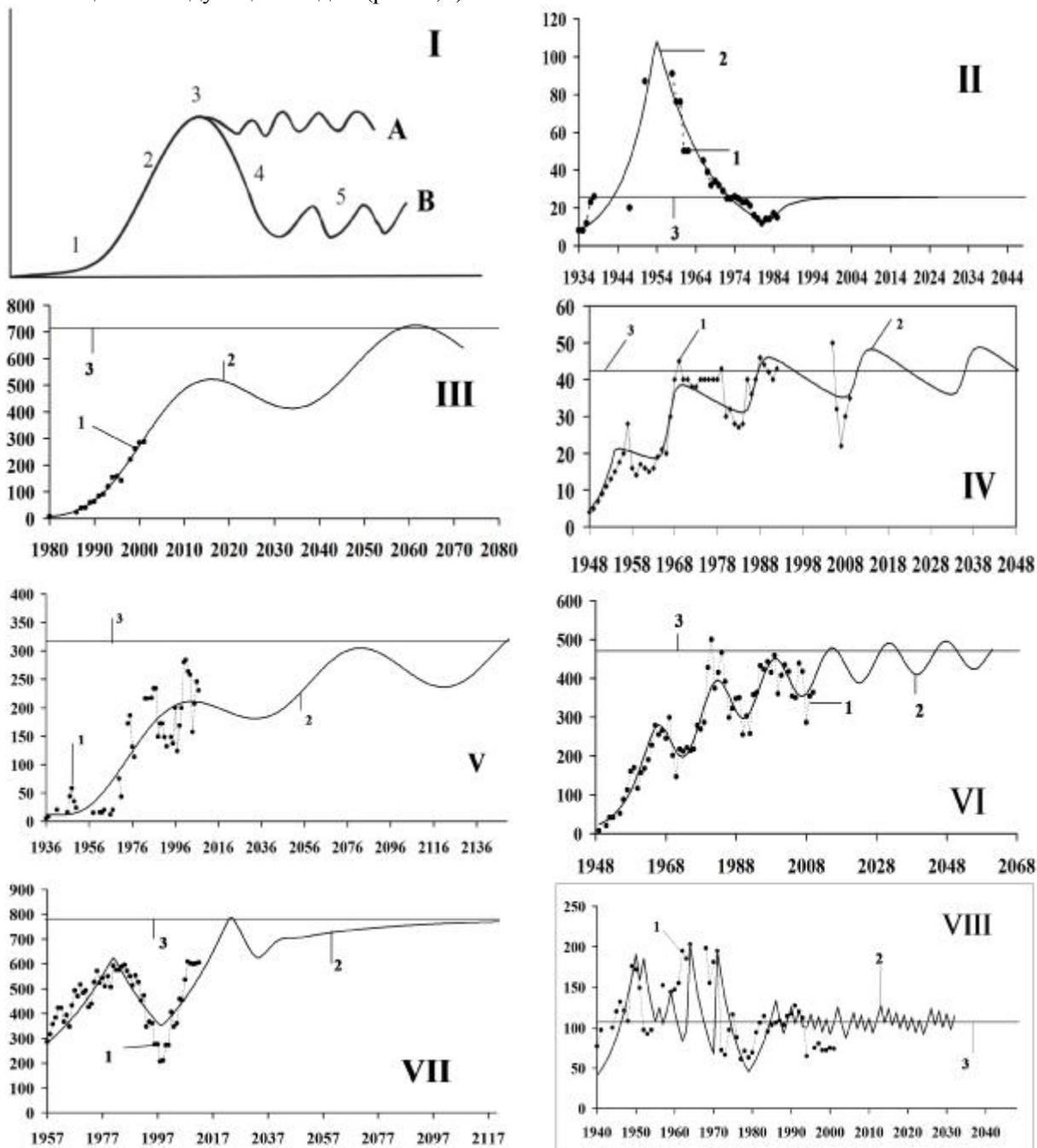


Рисунок 1. Динамика численности бобров в заповедниках европейской части России. I – гипотетическая модель на основе литературных данных 1-5 – стадии развития популяции. А – вариант с высокой скоростью восстановления кормов. Б – вариант с низкой скоростью восстановления кормов; II – Лапландский заповедник, III – Дарвинский, IV - Приокско-Террасный, V - Центрально-Лесной, VI – Окский, VII - Хоперский, VIII –Мордовский. По оси абсцисс – численность в особях, по оси ординат – годы. 1 – данные мониторинга, 2 – модельные оценки, 3 – стационарная численность.

1 – начальная стадия медленного роста, 2 – стадия быстрого нарастания численности, 3 – флуктуация на уровне высокой численности, 4 – снижение, 5 – флуктуации на уровне, определяемом всем комплексом факторов, характерных для данной местности. В зависимости от скорости восстановления кормов могут быть флуктуации на высоком или низком уровне. Затем мы проанализировали многолетние (50-70 лет) данные численности бобров Лапландского (ЛЗ), Дарвинского (ДЗ), Приокско-Тerrasного (ПТЗ), Центрально-Лесного (ЦЛЗ), Окского (ОЗ, Мордовского(МЗ) и Хоперского (ХЗ) заповедников, расположенных в Европейской России на севере, юге и в центре ареала бобра с помощью модели 1 [2,1,8]. Для изученных заповедников выделено несколько стадий развития популяций (рис. 1, II-VII). Первые две характеризуют рост численности на первых этапах реинтродукции бобров. Реализация последующих стадий зависит от скорости восстановления кормов, от накопления результатов средообразующей деятельности бобра, и ряда других факторов.

При этом на кривую, отражающую общий характер изменения численности, как правило (за исключением Лапландского заповедника), накладываются колебательные процессы. При низких скоростях восстановления и ограниченном количестве доступного ресурса справедлив первый тип **эруптивной динамики**, то есть динамика численности характеризуется кратковременной вспышкой с дальнейшим спадом и стремлением к стабильному стационарному низкому значению. Он отмечен в ЛЗ, где скорость возобновления изъятого бобром древостоя, крайне мала. Второй тип динамики численности – **одноступенчатая модель** с квазипериодическими колебаниями, характеризуется стремлением к достигнутому за первую волну подъема уровню численности при наличии квазипериодической составляющей. Его наблюдали в пессимальных местообитаниях ПТЗ.

При высокой скорости возобновления кормов возможен значительный рост численности. Третий тип динамики численности – **многоступенчатая модель** с квазипериодическими колебаниями – был показан для бобровых популяций ХЗ, ДЗ и ЦЛЗ. Четвертый тип динамики – **логистический** рост численности до высокого уровня с периодической колебательной составляющей – отмечен в ОЗ. Он характеризуется стремлением к стационарному состоянию при отсутствии ограничений на доступные кормовые ресурсы. Промежуточное положение (между первым и вторым типом динамики) представляют данные МЗ. Нужно отметить, что для этого заповедника, особенно до 1970-х годов характерно значительное изъятие бобров для расселения, что могло повлиять на характер динамики численности [1].

На основе литературных данных и собственных наблюдений мы предполагаем, что эти четыре типа поведения динамики, по-видимому, будут отмечаться и в других частях обширного ареала бобра на территории европейской части России.

Специфика бобровых нарушений. Основные факторы нарушения связаны с тем, что бобр действует как экосистемный инженер (изменяет гидрологический режим) и фитофаг (изменяют структуру прибрежных лесов). Бобровые местообитания – относительно богатые питательными элементами и высоко-продуктивные с высоким видовым разнообразием [9]. Эти участки редко подвергаются воздействию других нарушений, таких как пожары (из-за влажности) и ветров (из-за особенностей местоположения). Для бобровых нарушений характерны: высокая степень предсказуемости, частота повторных нарушений составляет всего 3-15 лет; малая степень распространения (сосредоточены в поймах малых рек и ручьев, в прибрежной полосе других водоемов); высокая интенсивность воздействия. Показано, что воздействие бобров на ландшафты зависит от плотности населения, особенностей топографии и плодородия территорий [9-11].

Каких изменений ландшафта можно ожидать при постоянном обитании бобров. Средообразующая деятельность бобров имеет сильную контекстную зависимость [1]. Для малых рек, на которых обитают бобры, характерно наличие градиентов интенсивности кормодобывания и увлажнения по поперечному профилю речной долины и прерывистость речного континуума на бобровых плотинах, формирование ступенчатого продольного профиля реки. Как правило присутствие бобров приводит к увеличению обводненности территорий, усложнению структуры речной сети, накоплению объемов воды, созданию условий для развития водно-болотной растительности. Изменение гидрологического режима почв на обширных территориях вокруг прудов создает «бобровые пятна». Бобры изменяют структуру прибрежных лесов, избирательно подгрызая деревья. Общим для всех поселений остается только повсеместное изъятие осины из древостоев и градиент интенсивности кормодобывания в полосе, не превышающей обычно 50 м.

Воздействие бобров на окружающую среду имеет кумулятивный характер, отражающийся в накоплении «памятников» деятельности прежних поколений. В старых популяциях со временем все минимально пригодные для жизни бобров участки проходят через несколько циклов заселения-забрасывания. Активная средообразующая деятельность идет непрерывно, создаваемые бобрами структуры накапливаются быстрее, чем разрушаются. Часть местообитаний переходит в безлесные «бобровые луга» и становятся надолго непригодными для обитания бобров, возможны и негативные сукцессионные изменения способствующие развитию черноольшаников. Сукцессии в бобровых местообитаниях часто разнонаправленные и не достигают конечной стадии.

Существует две главные фазы, характерные для бобровых местообитаний: первая, когда бобры строят плотину и трансформируют наземные сообщества в водные; вторая фаза, во время которой плотина разрушается и происходит постепенное восстановление наземных сообществ [9]. Первая (водная) фаза бобровых местообитаний - изучена довольно подробно [1; 12-15]. Второй фазе до настоящего времени уделялось меньше внимания. Специфический режим бобровых нарушений предопределяет набор индикаторных видов (сообществ), использующих эти местообитания. Потенциально могут быть две группы индикаторов. Первая группа, использующая ресурсы, всегда имеющиеся в избытке в бобровых поселениях, например сапрофильные грибы [16]. Второй группой будут короткоживущие и быстро размножающиеся организмы, жизненные потребности которых могут быть реализованы в быстро меняющейся мозаике бобровых местообитаний. Из второй группы по нашему мнению наиболее показательной и наименее изученной будет реакция на бобровые нарушения наземных беспозвоночных, мелких млекопитающих, земноводных и пресмыкающихся, птиц, летучих мышей. Например, в Польше журчалка *Chalcosyrphus eunotus* находится в угрожающем состоянии. Но за последние 20 лет увеличилось количество встреч этого вида, что связано с ростом численности бобров [7]. Отсюда, по мере «старения» бобровых местообитаний, после нескольких циклов заселения и ухода бобров, можно ожидать и формирования специфических сообществ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что паттерны динамики численности бобров могут быть описаны с помощью моделей 4 типов: эруптивный (ЛЗ); одноступенчатый с квазипериодическим колебанием (ПТЗ), многоступенчатый с квазипериодическими колебаниями (ДЗ, ЦЛЗ, ХЗ) и логистическим трендом изменения численности с периодическими колебаниями вокруг него (ОЗ).
2. Выявлено, что воздействие бобров на ландшафты имеет сильную контекстную зависимость и зависит от плотности населения, особенностей топографии и плодородия территорий. Деятельность бобров по модификации своих местообитаний может изменяться, особенно при повторном многократном заселении ранее уже преобразованных местообитаний.

Благодарности: Сбор данных на территории заповедников поддержан грантом РФФИ 15-04-06423 и программой Президиума РАН № I.21П «Биоразнообразие природных систем. Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга». Анализ данных с помощью одновидовой модели реализован при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-14-10323.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Завьялов Н. А. Средообразующая деятельность бобра (*Castor fiber* L.) в Европейской части России // Труды государств. заповедника «Рдейский». Великий Новгород. 2015. Вып. 3. 320 с.
- [2] Petrosyan V. G., Golubkov V. V., Goryainova Z. I., Zav'yalov N. A., Al'bov S. A., Khlyap L. A., Dgebuadze Yu. Yu. Modeling of the Eurasian Beaver (*Castor fiber* L.) Population Dynamics in the Basin of a Small Oka River Tributary, the Tadenka River (Prioksko Terrasnyi Nature Reserve). Russian Journal of Biological Invasions. Russian Journal of Biological Invasions 2013, 4 (1) pp. 45 – 53
- [3] Gurney W.S., Lawton J.H. The population dynamics of ecosystem engineers // *Oikos*, 1996. Vol. 76. P. 273-283.
- [4] Wright J.P., Gurney W.S., Jones C.G. Patch dynamics in a landscape modified by ecosystem engineers // *Oikos*, 2004. Vol. 105. P. 336-348.
- [5] Cuddington K., Wilson W.G., Hastings A. Ecosystem engineers: feedback and population dynamics // *The American Naturalist*, 2009. Vol. 173. No 4. P. 488-498.
- [6] Wright J. Linking populations to landscapes: richness scenarios resulting from changes in dynamics of an ecosystem engineer // *Ecology*, 2009. Vol.90. No 12. P. 3418-3429.

- [7] Soszyńska-Maj A., Soszyński B., Klasa A. Distribution and ecology of the saproxylic hoverfly *Chalcosyrphus eunotus* (Loew, 1873) (Diptera: Syrphidae) in Poland // *Fragmenta Faunistica*, 2009. Vol.52. No 2. P. 191-195.
- [8] Petrosyan V.G., Golubkov V.V., Zavyalov N.A., Goryainova Z.I., Dergunova N.N., Omelchenko A.V., Bessonov S.A., Albov S.A., Marchenko N.F., Khlyap L.A. Patterns of population dynamics of Eurasian beaver (*Castor fiber* L.) after reintroduction into nature reserves of European part of Russia. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2016, Vol. 7, No. 4, pp. 355—373
- [9] Nummi P. Kuuluvainen T. Forest disturbance by an ecosystem engineer: beaver in boreal forest landscapes // *Boreal Environment Research*, 2013. Vol.18. No. Suppl. A . P. 13-24.
- [10] Завьялов Н.А. Бобры как регуляторы переноса вещества и энергии в экосистемах малых рек. Почему так сложно получить общую картину? *Сибирский экологический журнал*. 2016. №4. С. 584–599.
- [11] Завьялов Н.А., Альбов С.А., Хляп Л.А. Мобильность поселений и элементов сигнального поля бобров (*Castor fiber*) на реке Таденка (Приокско-Террасный заповедник) // *Зоологический журнал*, 2016. Том 95. № 5. С. 584–596.
- [12] Rosell F., Borzér O., Collen P., Parker H. Ecological impact of beavers *Castor fiber* and *Castor canadensis* and their ability to modify ecosystems // *Mammal Review*, 2005. Vol. 35. № 3,4. P. 248-276.
- [13] Kemp P.S., Worthington T.A., Langford T.E.L., Tree A.R.J., Gaywood M.J. Qualitative and quantitative effects of reintroduced beavers on stream fish // *Fish and Fisheries*, 2012. Vol. 13. P. 158–181.
- [14] Речной бобр (*Castor fiber* L.) как ключевой вид экосистемы малой реки (на примере Приокско-Террасного государственного биосферного природного заповедника) / Ред. Дгебуадзе Ю.Ю., Завьялов Н.А., Петросян В.Г. – М.: Т-во научных изданий КМК, 2012. 150 с.
- [15] Janiszewski P., Hanzal V., Misiukiewicz W. The Eurasian beaver (*Castor fiber*) as a keystone species – a literature review // *Baltic Forestry*, 2014. Vol. 20. No. 2. P. 277-286.
- [16] Thompson S., Vehkaoja M., Nummi P. Beaver-created deadwood dynamics in the boreal forest // *Forest Ecology and Management*, 2016. Vol. 360. P. 1–8.

**Глава III/32: ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ О БОЛЕЗНЯХ И ПАДЕЖАХ ЖИВОТНЫХ
В СТЕПНЫХ И ПУСТЫННЫХ ЛАНДШАФТАХ**
**Chapter III/32: Ecological Concept about Diseases and Epidemics of Animals in Steppe and Desert
Landscapes**

Евгений В. Ротшильд

DOI 10.25680/5636.2018.13.93.225

Эл. Почта: evgeny.rotshild@gmail.com

РЕЗЮМЕ. Предложена новая концепция об инфекциях, согласно которой заболевания и падежи животных в природе чаще всего возникают не потому, что те заражаются от больных сородичей, а в результате влияния на них экологических факторов внешней среды, оказывающих повреждающее воздействие на микробов – сожителей теплокровных существ (1, 2). Концепция находит применение при поиске причин появления инфекционных заболеваний и падежей диких животных. Используется при разработке новых методов профилактики и лечения болезней.

Abstract. A new conception of infections is suggested, according to which diseases and epidemics of animals in nature most often arise not because animals are infected from diseased relatives, but as a result of ecological factors of the environment affecting them. These environmental factors have a damaging effect on the co-habiting microorganisms of warm-blooded animals [1,2]. The concept finds application in the search for the causes of the emergence of infectious diseases and epidemics of wild animals. It will be used in the development of new methods of prevention and treatment of diseases.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инфекции в природе, экологическая концепция, болезни и падежи животных, причины появления, влияние среды.

Keywords: infections in nature, ecological concept, diseases of animals livestock, causes of appearance, influence of the environment.

ВВЕДЕНИЕ

По традиции считают, что появление и развитие инфекций, а также выживание патогенных микробов в природе, обеспечиваются одним механизмом: перемещением их из больного в здоровый организм. Согласно предложенной концепции, решающую роль в регулировании инфекций играет внешняя среда. Факторы среды, способные оказывать на микроорганизмы повреждающее воздействие, могут активизировать их скрытые патогенные свойства, провоцируя тем самым появление заболеваний. Условия природной среды обеспечивают также выживание возбудителей инфекций. Знания о закономерностях таких событий служат основой практических мер по изучению и предупреждению болезней и падежей животных в природе.

ТРАДИЦИОННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Взгляды современников. Взгляды на причины и механизм появления инфекций, которым следуют в наши дни, сложились в первой половине XX века. Основу их можно представить в виде трех тезисов: (а) основной механизм, обеспечивающий существование и манифестацию любой инфекции в природе, – передача, то есть, перемещение возбудителя болезни из больного в здоровый организм; (б) выживание патогенных микроорганизмов в природе обеспечивается непрерывной их циркуляцией, иначе говоря, бесконечно повторяющимся перемещением по цепочке передач; (с) социальные или природные факторы внешней среды могут влиять на возникновение и развитие инфекции только путем увеличения или уменьшения скорости передачи возбудителя болезни.

Популярные доктрины. Эти взгляды в полной мере отражены в двух общеизвестных доктринах. Одна из них – учение об эпидемическом процессе, основа современной эпидемиологии, где допускают, что на развитие инфекции могут влиять социальные факторы. В другой доктрине, – учении о природных очагах инфекций, сведения о болезнях диких животных, которыми могут заразиться люди, увязывают с условиями природной среды. Согласно теории саморегуляции паразитарных систем, доктрине, появившейся позднее, патогенные микроорганизмы и теплокровные существа взаимодействуют независимо от внешнего влияния.

ИСТОЧНИКИ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ

Миграции. Откуда берется возбудитель болезни при появлении инфекции в здоровой популяции диких животных? Одна из популярных гипотез – заносы. Предполагают, что патогенных микробов заносят откуда-нибудь со стороны сами болеющие животные, мигрирующие птицы, звери и даже люди. Известно, что при эпидемиях инфекции в условиях современных городов, действительно, активно передаются от больного здоровым людям и могут распространяться далеко и довольно быстро. Применительно к диким животным все выглядит иначе. Мнения о дальних заносах патогенных микроорганизмов в качестве причины появления инфекций в природе не находят подтверждения. Не описано даже единственного случая, когда было бы доказано, что вспышка болезни среди диких животных возникла в результате заноса возбудителя. Вывод о заносах: наблюдения в природе показывают, что возможности для перемещения патогенных микробов по территории крайне ограничены [1].

Непрерывная циркуляция. Второй вариант гипотез – сидячая инфекция. Патогенные микробы, будто бы, сохраняются в подходящих местах, непрерывно циркулируя в популяции чувствительных существ. Современные знания по этой проблеме основаны на серии обширных по размаху, многолетних исследований на примере чумы у грызунов. Так, получила количественную оценку роль передачи возбудителя болезни. В экспериментах на природных моделях измеряли частоту реализации отдельных этапов передачи. Как оказалось, в реальных условиях вероятность передачи возбудителя таким способом настолько мала, что этот механизм не может обеспечить ни развития эпизоотий (массовых заболеваний животных), ни выживания патогенных микробов в природе. Этот вывод подтверждается тем фактом, что появление инфекции не зависит от плотности населения животных. На большом материале показано, что грызуны заболевают одинаково часто при любом уровне их численности, которые приходится наблюдать на прак-

тике. Вывод о циркуляции: доказано, что непрерывной циркуляции патогенных микроорганизмов в природе не существует [3].

Симбиоз. Возникает потребность найти альтернативное решение. Французские и иранские исследователи, на основе своих наблюдений в Иранском Курдистане, предложили гипотезу, согласно которой возбудитель чумы способен обитать в субстрате нор грызунов [4]. Отечественными специалистами получены результаты, подтверждавшие данные авторов гипотезы. Дальнейшие исследования на примере чумного микроба дают представление о возможных способах существования патогенных микроорганизмов в природной среде. Как оказалось, возбудитель чумы может обитать на слизистых покровах пищеварительного тракта грызунов, не причиняя вреда своим хозяевам; находится в сожительстве с почвенными бактериями, жить и размножаться внутри клеток протист. При неблагоприятных условиях может сохраняться в природной среде в состоянии анабиоза [5]. Способность к сожительству с протистами обнаружена у многих возбудителей инфекций [6]. Экспериментально доказано, что такой способ существования сообщества микроорганизмов и теплокровных животных не зависит от болезни и гибели грызунов, хозяев нор, и может продолжаться неопределенно долго, ничем внешне себя не проявляя [2].

ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМ ПОЯВЛЕНИЯ ИНФЕКЦИЙ

Базовая закономерность. По нашим наблюдениям, инфекционные заболевания среди животных в природе, чаще всего возникают не потому, что те заражаются от больных сородичей (это вторичное явление), а в результате воздействия на них факторов внешней среды. Этот тезис – базовая закономерность предложенной концепции, установленная в результате многочисленных наблюдений в природе и лабораторных экспериментов.

Ключевое событие. В процессе появления инфекции, как мы полагаем, ключевым, решающим событием является активизация у микроорганизмов, сожителей теплокровных существ, скрытых патогенных свойств под действием условий внешней среды. Само это явление – экспрессия факторов патогенности (способность микроорганизмов включать и выключать синтез веществ, обеспечивающих их агрессивное воздействие на организм животных) в генетике бактерий известно давно. Мы предполагаем, что такие процессы широко реализуются в природе при появлении инфекций у диких животных. Это предположение позволяет объяснить особенности подобных событий, которые удастся наблюдать в природе.

Свойства действующего фактора. Заключительный тезис предлагаемой концепции – оценка свойств сигнала, провоцирующего активизацию патогенных свойств микробов и, тем самым, появление инфекционных заболеваний животных в природе. Такое свойство – способность оказывать повреждающее воздействие на микроорганизмы. Не убить, но дать почувствовать угрозу гибели. Соответственно трактуется биологический смысл инфекции: это защитная реакция микробов в ответ на внешнюю угрозу.

Вывод об источнике. Источниками возбудителей инфекций диких животных служат естественные природные сообщества организмов, связанные со специфическими условиями обитания. Микроорганизмы, способные вызывать заболевания животных, приспособлены к постоянному существованию в таких условиях и в норме не проявляют своей патогенности. Возникновение инфекции – это выражение свойства природного сообщества защищаться от повреждающего воздействия внешней среды.

ФАКТОРЫ, ПРОВОЦИРУЮЩИЕ ИНФЕКЦИИ

Голодный бунт. Самый распространенный феномен такого рода – эффект голодного бунта (Hunger Revolt effect) – обстановка, возникающая при динамике элементного состава среды. Заболевают животные и люди, пережившие резкий переход от достатка или избытка некоторых редких химических элементов (Ni, Cu) в условия их дефицита в среде и рационе. Явление, ранее не известное, хотя биологический смысл его интуитивно понятен. Выясняется много вариантов его реализации. Касается бактериальных и вирусных инфекций. Возникает в нетронутой природе и при техногенном загрязнении среды. Служит причиной массовых заболеваний у оседлых, и единичных у мигрирующих грызунов (схема). Чума (Plague) у грызунов и зайцеобразных как типичный пример инфекций в природных очагах. Птичий грипп: техногенный избыток Ni, Cu в местах гнездовой водоплавающих птиц в тундре и дефицит в тропиках на зимовке. ВИЧ-инфекция в Африке: избыток тех же металлов в центре цветной металлургии и дефицит в сельской местности, куда направится поток мигрантов во время экономического кризиса.

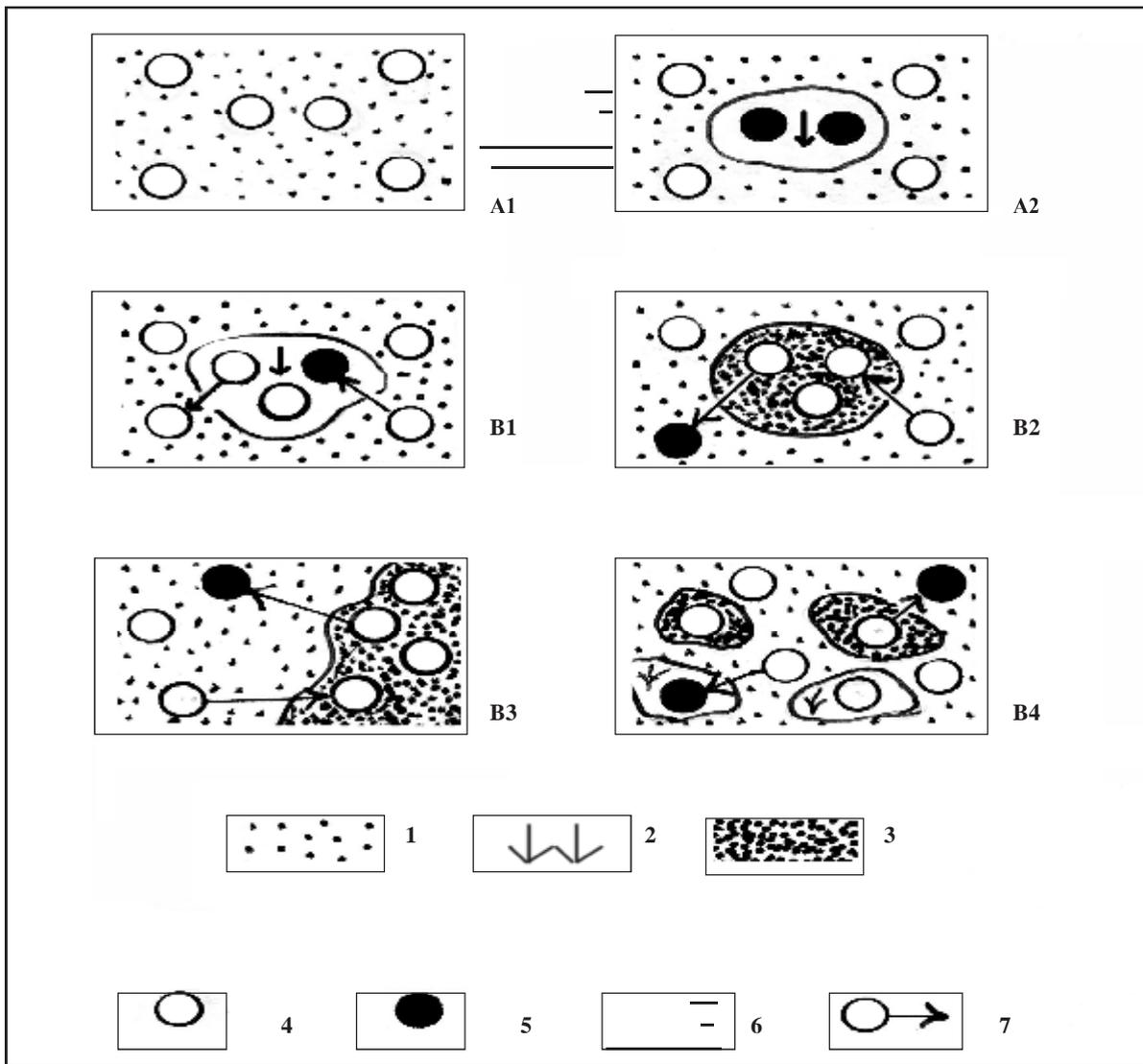


Рис. 1- Основные варианты реализации эффекта голодного бунта
 А – пассивный вариант, заболевают оседлые животные, пережившие резкие изменения условий среды: А1 – исходная ситуация, А2 – ситуация при изменении условий среды. В – активный вариант, заболевают животные, мигрирующие в контрастной среде: В1 – локальный дефицит, В2 – локальный избыток, В3 – пограничная полоса, В4 – мозаика нормы, избытка и дефицита. 1 – Нормальное состояние условий среды; 2 – дефицит химических элементов, ответственных за провокацию инфекций; 3 – избыток тех же элементов; 4 – здоровые животные; 5 – больные животные; 6 – изменения условий среды; 7 – перемещения животных.

Токсический эффект. Вторая группа факторов обеспечивает провокацию инфекций путем токсического воздействия на микроорганизмы, которые обитают в качестве сожителей теплокровных существ, или живут свободно в природной среде. Агентами могут быть тяжелые металлы при высокой концентрации, отходы промышленного производства, синтетические биологически активные и токсические соединения. Пример действия тяжелых металлов в естественных условиях: гибель от пастереллёза монгольских дзеренов (*Procapra gutturosa*) в местах осенней концентрации этих антилоп. Тогда в многолетних луках, излюбленном их корме, сильно возросло содержание Mo, Co, Pb, Cd, Cr, Ni. Другие примеры – события, связанные с техногенным загрязнением природной среды. Туляремия у грызунов и людей при рассеивании обедненного урана во время военной операции в Косово. Ботулизм у водоплавающих птиц на северо-восточном побережье Каспия при загрязнении вод отходами нефтехимии. Пастереллёз у сайгаков (*Saiga tatarica*) в Казахстане при использовании гербицида, умеренно токсичного для теплокровных существ. Последний случай послужил моделью для объяснения причин последующих трагических событий в этой стране.

Экологические катастрофы. Используя модель падежа, удалось обосновать вывод о причине падежа сайгаков в Казахстане весной 2015 года: их погибло тогда около 200 тысяч, в два раза больше, чем осталось в мире [7]. Доказано, что причиной падежа было загрязнение природной среды ракетным топливом, содержащим высокотоксичный компонент – гептил (несимметричный диметилгидразин). События 2016 года подтвердили опасность вымирания этих антилоп, эндемиков Центральной Азии, при существующем состоянии природной среды. Зимой в конце 2016 и начале следующего года от вирусной инфекции (чумы мелких копытных) погибла половина популяции (около 5 тысяч) обособленного подвида сайгака в Монголии. Еще раньше, жарким летом этого года, случился массовый падеж от сибирской язвы (*Anthrax*) домашних северных оленей (*Rangifer tarandus*) в тундре Ямала. При всем разнообразии инфекций и экологических условий падежей, у них была общая причина – загрязнение природной среды ядовитым ракетным топливом. При отсутствии официальных сообщений, признаки такой связи было трудно обнаружить при знакомстве с опубликованными подробностями событий. Воздействие на сайгаков оказывала деятельность трех космодромов, принадлежащих России, Казахстану и Китаю, так что сохранение этих животных – задача международного сотрудничества. Остается неосознанной опасность гуманитарных катастроф, связанных с загрязнением среды ядовитыми веществами: то, что случилось с дикими животными, может произойти и с людьми [8].

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ

Познавательное значение. Меняет общие представления об инфекциях. Помогает отказаться от устаревших взглядов, тормозящих развитие отрасли. Способствует поисковым исследованиям в новых направлениях.

Прикладное значение. Служит теоретической основой при поиске причин вспышек инфекций у людей и животных; при разработке и использовании новых методов прогнозирования, профилактики и лечения инфекционных заболеваний. Позволяет отказаться от неэффективных и затратных приемов в этой области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экологическая концепция об инфекциях – современное научно обоснованное достижение науки, представляющее широкие возможности практического использования для изучения и предупреждения инфекционных заболеваний людей и животных.
2. Возможность использования предложенной концепции затрудняется малой осведомленностью специалистов и общественности цивилизованных стран относительно ее содержания.
3. При существующем техногенном загрязнении природной среды представляется вполне реальной опасность вымирания диких антилоп – эндемиков Центральной Азии.
4. Массовая гибель сайгаков – предупреждение человечеству: то, что случилось с дикими животными, может произойти и с людьми.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ротшильд Е.В. 2014. Инфекции в природе. Экологическая концепция. – Энвайронментальная эпидемиология. 8 (2) : 7 – 279.
- [2] Ротшильд Е.В. 2015. Инфекции в природе. Экологическая концепция. – Микроэлементы в медицине. 16 (4) : 21-27.
- [3] Солдаткин И.С., Руденчик Ю.В. 1988. Эпизоотический процесс в природных очагах чумы (ре-визия концепции). – Экология возбудителей сапронозов. М.: 117-131.
- [4] Baltasard M. 1964. La conservation de la peste en foyer invetere. – Medecine et hygiene. 22: 172-178.
- [5] Сучков Ю.Г., Худяков И.В., Емельяненко Е.Н., Леви М.И., Пушкарева В.И., Сучков И.Ю., Литвин В.Ю., Кулеш Е.В., Зотова Р.С., Гинцбург А.Л. 1997. О возможности сохранения возбудителя чумы в почве в покоящейся (некультивируемой) форме. – Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 4: 42-47.
- [6] Пушкарева В.И. 2006. Паразитизм в простейших как стратегия существования патогенных бактерий в почвах и водоемах. – Успехи современной биологии, 126 (4): 323-333.
- [7] Ротшильд Е.В. 2016. Массовая гибель сайгаков: модель событий. – Степной бюллетень. 47-48: 64-69.
- [8] Ротшильд Е.В. 2016. Серьезное предупреждение человечеству. – Берегиня (газета зеленых). 8: 4.

Chapter III/33: QUESTIONS OF PREDICTION MODELING OF ANTHRAX OCCURRENCE IN THE FAR NORTH

Глава III/33: Вопросы прогностического моделирования возникновения сибирской язвы на Крайнем Севере

DOI 10.25680/7622.2018.78.79.226

Kasim A. Layshev¹, Aleksandr V. Prokudin², Vitaly V. Terleev^{3*}, Aleksandr V. Spesivtsev⁴,
Mikhail V. Arkhipov^{1,5}

*Email: Vitaly_Terleev@mail.ru

1.All-Russian Research Institute «North-West Centre of interdisciplinary researches of problems of food maintenance», Podbelskogo, 7, Pushkin-St.Petersburg, 196608, Russia

2.Scientific-Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic - Division of Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS", Komsomolskaya str., 1, Krasnoyarsk region, Norilsk, 663305, Russia

3.Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29, St.Petersburg, 195251, Russia

4.CJSC "Technolink", Embankment of the river Fontanka, 103, St.Petersburg, 190131, Russia

5.Agrophysical Research Institute, Grazhdanskii pr., 14, St.Petersburg, 195220, Russia

ABSTRACT. Various infectious diseases (brucellosis, leptospirosis, necrobacteriosis, toxoplasmosis) are recorded in the Far North, but the greatest danger for humans and animals is an anthrax infection. At present, 39 foci of anthrax infection are registered in Taimyr, which significantly complicate the epizootic situation in the region. A new method for assessing epizootic danger and the probability of anthrax occurrence using the theory of fuzzy sets is presented. It has been proved that the presence of an outbreak of anthrax infection, the absence of specific preventive measures and high air temperatures in the summer are the main predisposing factors for anthrax.

Резюме. В районах Крайнего Севера регистрируются различные инфекционные болезни (бруцеллез, лептоспироз, некробактериоз, токсоплазмоз), но наибольшую опасность для людей и животных представляет сибиреязвенная инфекция. В настоящее время на территории Таймыра зарегистрировано 39 очагов сибиреязвенной инфекции, которые значительно осложняют эпизоотическую ситуацию в регионе. Представлен новый метод оценки эпизоотической опасности и вероятности возникновения сибирской язвы с использованием теории нечетких множеств. Доказано, что наличие очага сибиреязвенной инфекции, отсутствие специфических профилактических мероприятий и высокие температуры воздуха в летний период являются основными предрасполагающими факторами возникновения сибирской язвы.

KEYWORDS: Far North, reindeer, infectious diseases, anthrax, prediction

Ключевые слова: Крайний север, северные олени, инфекционные болезни, сибирская язва, прогнозирование

INTRODUCTION

Researches by veterinary specialists which have been carried out in the Far North Agriculture Research Institute for more than 60 years, show that on the territory of the Taimyr Region there is a limited number of the following infectious diseases: brucellosis, leptospirosis, necrobacteriosis, toxoplasmosis [1-5]. But anthrax infection takes a special place among potentially dangerous infectious diseases of both animals and people [6-9].

According to the veterinary statistics the territory of the Taimyr region has 39 registered areas with anthrax pesthole epizooty. Anthrax is a potentially dangerous infective disease. Both domestic animals of various species and people are affected by this disease. The occurrence of the disease is of serious danger for herd migrating animals, especially for reindeer.

At the stage of practical use of statistical data of a descriptive character there exists a problem which is connected with the necessity of giving a particular decision about a probability of anthrax epizooty and even of making forecast. Such estimations are sure to be approximate, subjectively-true and depend only on the expert's knowledge and experience.

The main objective of the present article is formalization of the expert's information on the basis of fuzzy models presenting qualitative information by quantitative categories in a kind of analytical equation [10].

FORCASTING PROBLEMS

The majority of problems of epizootic monitoring have to be solved in the conditions of the uncertainty of the original information including the structure of prognostic models for a particular anthrax pesthole. Probabilistic information is widely used in epizootic works since many prognostic problems are solved with the help of statistical methods. For example, the efficiency of vaccine agents is determined by a set of statistics in different regions. The least `precise` information is considered to be verbal (indistinct, qualitative one), but in most cases it is the only existing one in practice of epizootic monitoring, especially in forecast estimation of evolution of a new disease agent.

The knowledge of information for solving problems of a particular field can be and determined by three factors:

- by complexity of a structure of epizootic process evolution as an object of research;
- by incompetence of knowledge of an epizootic pesthole state on a separate site and as a whole, which is connected with insufficient definiteness of our knowledge;
- by uncertainty of a situation which is linked with the lack of exact data concerning borders of areas of the epizootic pesthole, probability of reindeer grazing and their number and typical of the majority of verbal notions of our language [10].

Alongside difficulties of construction of prognostic models it is necessary to bear in mind their economic and, particularly, ecological importance: although total disinfection of the anthrax pesthole is both technically and economically possible, the disinfection of a site implies destruction of any biological species which results in an ecological catastrophe for this area.

FACTORS INFLUENCING ANTHRAX EPIZOOTY DEVELOPMENT

Sick animals are a source of an anthrax infection agent, in their secretions there are microbes which get into the environment and give rise to the spread of the disease. Carcasses of died animals are the main agents of the infection. Numerous studies have shown that the anthrax agent being in a spore form in the soil is able to keep its viability and pathogenity for more than 50 – 70 years. Consequently, many old centers of anthrax infection are potentially dangerous. Anthrax epizooty was registered among domestic deer in the `Popigaysky` (1969) and `Oktyabrsky` (1977) settlements after grazing on the areas where carcasses had been buried [11].

The danger of infection spread is related to the fact that the greatest population of Northern wild reindeer called `Taymirskay` inhabits the vast territory of the Far North. A large number of animals and constant migrations in spring and summer and summer and autumn periods cause, to a significant extent, anthrax occurrence. Meteorological, landscape and soil factors have a great impact on the occurrence and development of anthrax epizooty. In most cases outbreaks and quick spread of the disease are particularly traced in hot weather, localized up a river, whereas the survival of spores significantly depends on a chemical composition of the soil. The intensive industrial development of the natural resources of the Far North brings about technogenic factors of anthrax infection. The intensive performance of earth work in potentially dangerous regions gives the infection another edge. In addition the spores of anthrax infection can enter the animals` susceptible body [1, 4, 6, 7].

That is why it is absolutely necessary to carry out epizootological and microbiological research and to forecast the possibility of emergence and prevention of infection development in the regions with vast earth work.

FUZZY MODELLING METHODOLOGY

Modern theory of making decisions has a number of methods which enable to formalize a process of making decisions for several criteria interacting in a fuzzy environment [1, 2]. This technique is called the fuzzy sets theory. Developing the theory of fuzzy sets Zadeh introduced a notion of a linguistic variable allowing to present an approximate verbal description of objects and phenomena in an adequate way on condition that there is no determined description or it is absolutely impossible.

As regards epizootic processes a linguistic variable `the presence of infection agents` can be presented as: no agents, average quantity, a maximum number of infection agents.

The variable qualitative may be coded in the form of a linguistic variable as shown in Fig. 1.

The variable qualitative may be coded in the form of a linguistic variable (LV). Consider a specific example of application of LV for making a decision in a fuzzy environment. Suppose there is the expert`s knowledge about the evolution of the epizootic process that with other conditions being equal there are agents which influence the evolution of an infectious disease. This knowledge can be presented in the form of a fuzzy production rule:

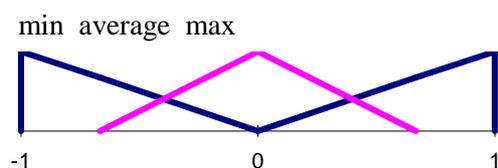


Fig.1. Linguistic variable 'the presence of infection agents'.

If the quantity of infection agents is big, the degree of evolution of the epizootic process is high. All that goes after 'if' is called a premise, a product, a condition, after 'then' - a conclusion, an operation. If we design a matrix of interrogation in a certain way as a set of production rules, we can obtain a polynomial equation in accordance with the methods of the theory of experiment planning.

Let's consider the application of the given methods for modelling probability of an epizootic situation with anthrax in the zone of gas extractive deposits. One of the paramount tasks in the expert's work is a determination of factor's space in which this model is going to be constructed.

For forecasting the epizootic situation with the anthrax centre the expert chose five factors in the form of input linguistic variables. The variables are coded as follows:

- X₁ - the quality of soil;
- X₂ - the technogenic influence;
- X₃ - preventive measures;
- X₄ - the temperature of a summer period;
- X₅ - the availability of additional carriers.

It should be noted that the model has been constructed in consideration of the anthrax pesthole on the given territory.

For example, one of the rows of a matrix was presented in the following way: if the quality of the soil is good, both technogenic influence and preventive measures are absent, the temperature of the summer period is high and the quantity of additional carriers is high, the probability of evolution of an epizootic situation between variables is low and under average. The arrangement of productions of a matrix of interrogation has an implicative form as 'if... differently/otherwise...'

The processing of the expert's interrogation results and corresponding estimation was carried out in line with standard statistical methods. The resulting equation takes the form:

$$Y = 0.2906 + 0.0219 X_1 + 0.0438 X_2 + 0.0937 X_3 + 0.0160 X_4 + 0.0187 X_5 + 0.0094 X_2 X_3 - 0.0063 X_2 X_4 - 0.0156 X_2 X_5 + 0.0063 X_3 X_4 + 0.0063 X_4 X_5.$$

Only substantial coefficients at a level of the substantiality of 0.05 are presented in the equation.

RESULTS AND DISCUSSION

The submitted method permits to compare the degree of the influence of the various factors on the evolution of the anthrax epizootic process by the value of dimensionless coefficients at unknown variables both by the value and the direction of their influence on the studied phenomenon.

It is established that the most considerable influence (negative or positive) on the epizootic situation with the registered anthrax on a particular territory has the availability of preventive measures and additional carriers and technogenic infringements.

The quality of the soil and the temperature refer to the second category. Cumulative action of several factors is commensurable to a degree of influence with linear factors.

Considering possible evolution of an infectious process we quote the following variants.

1. Under favorable conditions for epizooty:
 - X₁ – good soil;
 - X₂ – earth work is carried out;
 - X₃ – preventive measures are not taken;
 - X₄ – the temperature of a summer period is 24° C;
 - X₅ – a lot of additional carriers;
 - and Y = 0.484.
2. Under unfavorable conditions for epizooty:
 - X₁ – poor soil;
 - X₂ – no earth work;
 - X₃ – preventive measures are taken;

X_4 – the temperature of a summer period is 0°C ;
 X_5 – few additional carriers;
 and $Y = 0.096$.

3. Influence of preventive measures:

X_1 – good soil;
 X_2 – earth work is performed;
 X_3 – preventive measures are taken;
 X_4 – the temperature of a summer period is 24°C ;
 X_5 – a lot of additional carriers;
 and $Y = 0.2870$.

Fig. 2 shows the logic of the expert's decision making in a three-dimensional space.

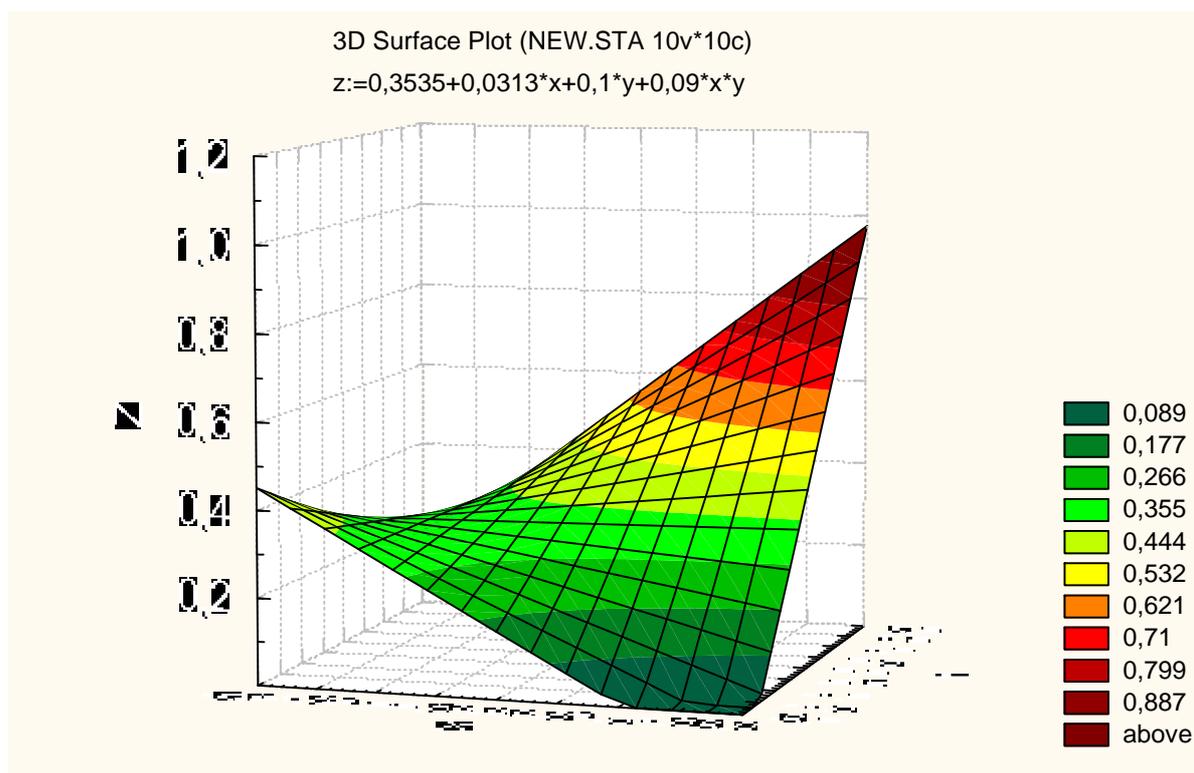


Fig. 2. The function of response on the basis of the model in a three-dimensional space

CONCLUSIONS

1. The results of the prognostic estimation have shown that the probability of occurrence of anthrax on this territory under all favorable conditions for the evolution of an anthrax process without preventive measures is certain to be high and accounts for 0.484, however, under the same conditions with preventive measures it amounts to 0.287.
2. The arrangement of preventive measures reduces the risk of anthrax occurrence twice.
3. The method of fuzzy model is universal in representation of expert's information using logical and linguistic kind of description of complex systems.

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project №17-76-20026.

REFERENCES

- [1] Slepsov E.S., Evgrafov G.G., Vinokurov N.V., Laishev K.A., Fedorov V.I., Iskandarov M.I., Zakharova O.I. 2017. Brucellosis of reindeer and measures to combat it in conditions of the extreme north of the Russian Federation. Novosibirsk. 250 p.
- [2] Kharzinova V.R., Dotsev A.V., Kramarenko A.S., Laishev K.A., Romanenko T.M., Solovyeva A.D., Deniskova T.E., Kostyunina O.V., Brem G., Zinoviev N.A. 2016. The study of the allele fund and the

- degree of genetic introgression of the domestic and wild reindeer population (*Rangifer tarandus l., 1758*) using microsatellites. *Agricultural Biology*. **51(6)** pp 811-823
- [3]Layshev K.A., Zabrodin V.A., Prokudin A.V., Samandas A.M. 2017. Basic and poorly studied diseases of the Taimyr population of wild reindeer. *Genetics and breeding of animals*. **1** pp 3-8
- [4]Ilyina L.A., Layshev K.A., Laptev G.Yu., Nikonov I.N., Zaitsev S.Yu. 2017. Molecular-genetic approach to the assessment of the microbial community of the reindeer rumen. *Veterinary science, zootechnology and biotechnology*. **9** pp 45-50
- [5]Dotsev A.V., Romanenko T.M., Kharzinova V.R., Solovieva A.D., Layshev K.A., Brem G., Zinovieva N.A. 2016. Phenotypic and genotypic features of populations of reindeer of the Nenets breed. *Agricultural Biology* **52(6)** pp 1175-1183
- [6]Layhev K.A., Zabrodin V.A., Dimov S.K., Prokudin A.V., Shalaev I.M., Zdunov V.M., Samandas A.M., Rudkovskii A.I., Larina N.V. 2006. Modern problems of parasitocenosis in the Far North, ways to combat them. In «Actual problems of infectious pathology and immunology of animals». Moscow. pp. 51-53
- [7]Zabrodin V.A., Layshev K.A. Dimov S.K., Samandas A.M., Prokudin A.V. 2011. Rational control model epizootic processes of actual disease in populations of domesticated reindeer in the Far North. *Questions regulatory regulation in veterinary medicine*. St. Petersburg. **2** pp. 20-25
- [8]Reshetnikov A.D., Vinokurov N.V., Layhev K.A., Barashkova A.I. 2014. Reindeer husbandry of Yakutia: problems, ways of solution (on the example of Anabar district). *Izv. Saint-Petersburg State Agrarian. University*. **35** pp. 101-103
- [9]Layhev K.A., Zabrodin V.A., Prokudin A.V., Samandas A.M. 2015. Assessment of the epizootic situation in populations of wild reindeer in the Arctic zone of the Russian Federation (literature review). *Actual issues of veterinary biology*. **4** pp. 38-44
- [10]Drozdov A.V., Spesivtsev A.V. 1994. Normalization of expert's information using logical and linguistic kind of description of complex systems. *Technicheskay kibernetica*. **2** pp 89-96 (in Russian).
- [11]Layshev K.A., Layshev A.H., Solomonova L.D. 1989. Natural foci of certain infectious and parasitic diseases in the north of the Krasnoyarsk territory. *Proceedings of the 12th All-Union Conference on the natural foci of disease*. Novosibirsk. pp. 78-80

Chapter III/34: STABLE ISOTOPE ANALYSIS TO STUDY DIETARY BEHAVIOR OF SYMPATRIC EQUIDS IN THE DZUNGARIAN GOBI

Глава III/34: Анализ стабильных изотопов для изучения пищевого поведения симпатрических лошадей Джунгарской Гоби

Martina Burnik Šturm^{1*}; Christian C. Voigt²; Oyunsaikhan Ganbaatar³; Mikhail Sablin⁴; Natalia N. Spasskaya⁵; Petra Kaczensky^{1,6*}

DOI 10.25680/9040.2018.84.78.227

*Email: martina.burnik-sturm@boku.ac.at, petra.kaczensky@nina.no

1. Research Institute of Wildlife Ecology, University of Veterinary Medicine Vienna, Veterinärplatz 1, 1210 Vienna, Austria

2. Leibniz Institute for Zoo and Wildlife Research (IZW), Alfred-Kowalke-Str. 17, 10315 Berlin, Germany

3. Great Gobi B Strictly Protected Area Administration, Takhin Tal, Gobi Altai Province, Mongolia

4. Zoological Institute RAS, Universitetskaya nab. 1, 199034, Saint-Petersburg, Russia

5. Zoological Museum of Moscow Lomonosow State University, Bolshaya Nikitskaya Str. 6, 125009, Moscow, Russia

6. Norwegian Institute for Nature Research – NINA, P.O. Box 5685 Sluppen, NO-7485, Trondheim, Norway

ABSTRACT. We used sequential stable isotope analysis of tail hair to study dietary behaviour of three sympatric equid species, the re-introduced Przewalski's horse (*Equus ferus przewalskii*), the khulan (*Equus hemionus*), and their potential pasture competitor the free ranging domestic horse (*Equus caballus*) in the Dzungarian Gobi of Mongolia. The goal of our study was to better understand resource use and physiological adaptations that facilitates their coexistence or may lead to competition in the harsh, resource poor environment of the Gobi. We found that both horse species are predominantly grazers, suggesting a high potential for pasture competition in winter, while khulan switch seasonally between grass dominated diet in summer and mixed grass-browse diet in winter. Analysis of historic tail hair samples from the same area showed similar switching pattern in historic (pre-extinction) Przewalski's horses as in extant and historic khulan. This dietary shift in Przewalski's horse from being a grazer in summer and mixed-feeder in winter in the past, to a year-round grazer nowadays, is best explained by a release from human hunting pressure.

Резюме. Для изучения питания трех симпатрических видов Лошадиных, обитающих в Джунгарской Гоби в Монголии был использован последовательный анализ стабильных изотопов в волосах хвостов реинтродуцированных лошадей Пржевальского (*Equus caballus przewalskii*), куланов (*Equus hemionus*) и их потенциальных пастбищных конкурентов — свободнопасущихся домашних лошадей (*Equus c. caballus*). Цель нашего исследования заключалась в том, чтобы лучше понять, как происходит использование ресурсов и какие физиологические адаптации облегчают сосуществование данных видов или могут привести к конкуренции в суровых, ресурснедостаточных условиях Гоби. Мы обнаружили, что в настоящее время оба вида лошадей являются преимущественно травоядными, что указывает на высокий потенциал конкуренции на пастбищах в зимний период, в то время как кулан сезонно меняет летнюю травянистую диету на смешанную травянисто-кустарниковую в зимний период. Анализ образцов хвостовых волос экземпляров из того же региона, хранящихся в музеях, показал такую же схему сезонной смены питания у лошадей Пржевальского до вымирания в природе как и у куланов (как современных, так и живших в историческом прошлом). Этот сдвиг в питании лошадей Пржевальского от смешанной диеты в историческом прошлом (травянистой в летнее время и травянисто-кустарниковой в зимнее) к круглогодичной травянистой диете в настоящее время лучше всего объясняется стремлением животных избежать антропогенного давления в виде охоты.

KEYWORDS: desert landscape, Dzungarian Gobi, khulan, pasture competition, Przewalski's horse, stable isotope analysis

Ключевые слова: пустынный ландшафт, Джунгарская Гоби, кулан, конкуренция на пастбищах, лошадь Пржевальского, стабильный изотопный анализ

INTRODUCTION

In historic times, two wild equid species, the Przewalski's horse (*Equus ferus przewalskii*) and the Asiatic wild ass (khulan, *Equus hemionus*), roamed the Eurasian steppe. But by the end of the 1960s, the Prze-

walski's horse had been driven to extinction in the wild and the range of khulan became severely restricted to the least productive habitats. However, the Przewalski's horse survived in captivity and reintroductions since the 1990s have brought the species back to parts of its native range in the Dzungarian Gobi in Mongolia and northern China where they again overlap with khulan, and in addition, share their habitat with a third equid species, the free-ranging domestic horse (*Equus ferus*). This makes the Dzungarian Gobi a unique environment, because overlap zones of different equid species are rare. Equids have a very similar size and body shape and seem to occupy very similar ecological niches [1], and little work has been done to understand the resource use and physiological adaptations that explain their distribution.

Since continuous observations of free-ranging equids are almost impossible to conduct in this remote and harsh environment, we applied an indirect approach using stable isotopes. Analysis of stable isotopes in animal tissues (e.g. bone, hair, feather, muscle, blood) has become a preferred tool to study dietary ecology. The underlying principle of the isotope approach is that animal tissues reflect the isotope composition of diet and water consumed. Carbon isotopes (expressed as $\delta^{13}\text{C}$ in ‰) are particularly useful to address dietary ecology of herbivores due to a clear difference of $\delta^{13}\text{C}$ values between C_3 and C_4 plants as a result of different photosynthetic pathways followed by the respective plant groups [2]. To date most studies have focused on species from North America, Africa and Europe, with only a handful of studies carried out on species from Asia. In the cold dry steppes of the Gobi, grasses primarily follow the C_3 pathway, and most shrubs and semi-shrubs follow the C_4 pathway, thus allowing separation between browsing and grazing herbivores (plants with a third photosynthetic pathway, namely CAM, are rare in the Gobi [3]). Other light stable isotopes can provide additional information on diet ($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{34}\text{S}$), as well as on physiological status (e.g. starvation) and water use efficiency ($\delta^{15}\text{N}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$), or geographical location ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$). Hair presents an ideal matrix for the isotope analysis, because it grows continuously and is metabolically inert after formation [4], [5]. A long tail hair is particularly suitable as it presents a chronological time series of isotope information covering a time window of up to several years [6]. Provided a good sample preservation, this information can be retrieved from the hair even hundreds of years after the death of the animal.

We thus used stable isotope analysis of sequentially cut tail hair to draw inferences about multi-year diet seasonality, isotopic dietary niches and physiological adaptations of the three sympatric equid species, the re-introduced Przewalski's horse, the khulan, and their potential pasture competitor the free ranging domestic horse in the Dzungarian Gobi. Specifically, we asked: Do they feed as grazers, browsers or mixed-feeders? Do they compete for the same resources? Are there any potential differences in physiological adaptations among species? In addition, stable isotope analysis of historic museum samples from the same area enabled the comparison of pre-extinction and extant reintroduced Przewalski's horses. Here we asked: Is the dietary behaviour of the extant reintroduced Przewalski's horses the same or different as the behaviour of their historic pre-extinction counterparts?

MATERIAL AND METHODS

The habitat of the Dzungarian Gobi is characterized by an arid (<100 mm/year), cold-temperate climate with a summer precipitation peak. The landscape consists of desert-steppe, semi-desert, and desert drylands dominated by Chenopodiaceae (shrubs and semi-shrubs) which follow a C_4 photosynthetic pathway and Asteraceae, Tamaricaceae and Poaceae, which follow a C_3 pathway. Alpine meadows above 2000 m are primarily dominated by C_3 grasses and forbs. We collected and analysed tail hair samples from six extant Przewalski's horses, khulan and domestic horses in the Dzungarian Gobi (SW Mongolia) and samples from six historic Przewalski's horses and three khulan, sampled in the Dzungarian Gobi between 1889 and 1898 (SW Mongolia and N China; kept in museum collections of the Zoological Institute of the RAS, St. Petersburg and Zoological Museum of the Moscow Lomonosow State University in Russia). All samples were cleaned, cut into 1 cm increments and analysed for carbon and nitrogen isotope values in the IZW Berlin, Germany (with precision better than 0.1‰ for both isotopes; calibrated to international standards). $\delta^{13}\text{C}$ values of historic samples were corrected for the Suess effect. We calculated the contribution of browse and grass in the diet of each individual using the dual mixing model of [7], based on our own vegetation isotope data (with mean $\delta^{13}\text{C}$ values of $-25.5 \pm 1.3\text{‰}$ for C_3 and $-13.5 \pm 0.5\text{‰}$ for C_4 plants), and literature fractionation factors for horses (2.7‰ for C and 1.9‰ for N)[8], [9]. Species specific isotope dietary niches were estimated following a Bayesian approach based on bivariate, ellipse-based metrics using SIBER implemented in the R package SIAR[10], [11]. For details on methodology see [3], [12].

RESULTS AND DISCUSSION

Extant equids. Results of the stable isotope analysis showed that even in the arid Gobi, both horse species are predominantly grazers that include browse in their diet only under extreme environmental conditions (e.g. dzud winter), whereas khulan are highly seasonal, switching between grass dominated diet in summer and mixed grass-browse diet (including up to 65% browse) during the critical nutritional bottleneck in winter (Fig. 1).

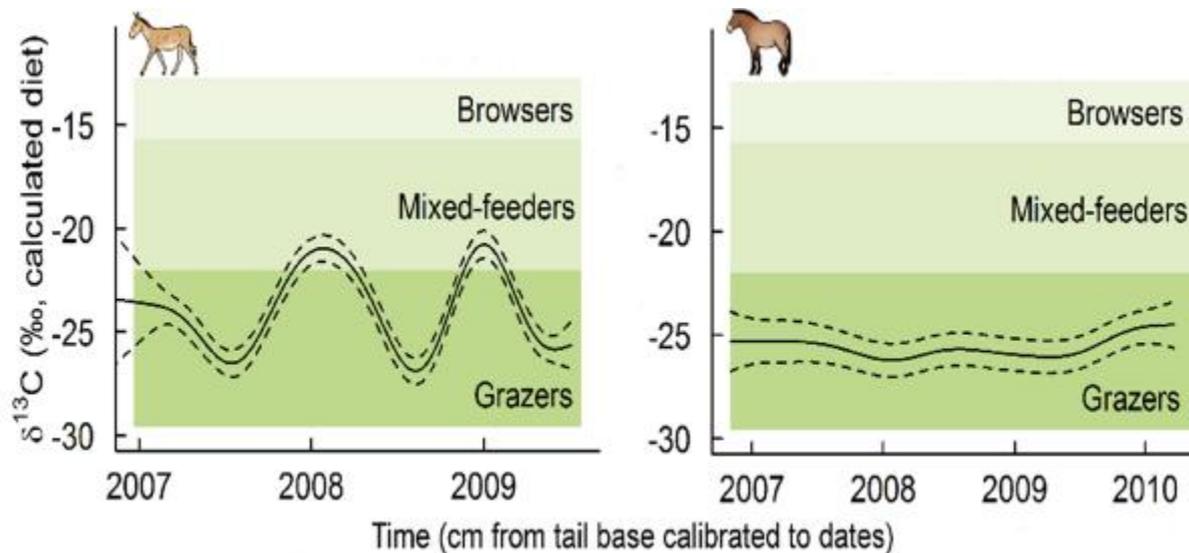


Figure 1 – $\delta^{13}\text{C}$ profiles indicating seasonal switching between grazing and mixed-feeding in extant khulan (left; $n=6$), and year-round grazing in extant Przewalski's horses (right; $n=6$).

The isotopic dietary niches of both horse species were almost identical, did not differ with season, and were smaller and narrower than in khulan. Winter and summer isotopic niches of khulan, on the other hand, were completely separated, with spring and autumn niches lying in between. Higher $\delta^{15}\text{N}$ values in khulan suggest higher water use efficiency, which may be one reason why khulan can exploit pastures further away from water. Our results suggest that the differences in foraging adaptation facilitate the coexistence of horses and khulan in the same habitat, but the high degree of isotopic niche overlap of both horse species indicates a high potential for pasture competition in winter, highlighting the need to severely restrict grazing of domestic horses on the range of the Przewalski's horses.

Pre-extinction Przewalski's horses The analysis of historic tail hairs of pre-extinction Przewalski's horses showed a clear difference in the isotopic dietary composition, with clear seasonality in the diet of historic but not in extant Przewalski's horses. This seasonality followed the same pattern as observed in the extant (Fig. 1) as well as historic khulan, i.e. grazing in summer and mixed feeding in winter. Due to the high proportion of browse in their diet in winter, historic Przewalski's horses had much broader core isotopic dietary niches than their extant reintroduced conspecifics (Fig. 2).

We explain this dietary shift in Przewalski's horses by a release from human predation. Until recently, both the Przewalski's horses and khulan have been heavily hunted as game and persecuted as pasture competitors. Nowadays both species are fully protected, but whereas the newly returned Przewalski's horse has become a much appreciated iconic national flagship species, attitudes towards khulan remain ambivalent [13]. This changed positive attitude allows the reintroduced Przewalski's horses to feed on the scarce, grass dominated pastures alongside local people and their numerous livestock whereas their historic conspecifics (like the historic and extant khulan), were forced into less productive habitats dominated by browse during the resource poor winter season.

CONCLUSIONS

1. Both extant horse species are grazers, whereas khulan are highly seasonal, switching between being grazers in summer, and mixed-feeders in winter.
2. Differences in foraging adaptation facilitate the coexistence of horses and khulan in the same habitat, but the high degree of isotopic niche overlap of both horse species indicates a high potential for pasture competition when resources are scarce.

3. Stable isotopes revealed the dietary change from pre-extinction to reintroduced Przewalski's horses, which could not be detected by any other analytical means.
4. A changed, positive societal attitude enabled reintroduced Przewalski's horses in the Dzungarian Gobi to return from a suboptimal diet including elevated levels of browse in winter to a more optimal year-round grazing diet.
5. Stable isotope analysis is an excellent tool to study various aspects of animal ecology of extant and/or (pre-)historic species with a great potential to answer myriad other questions related to diet, food-web structure, migration or physiology of animals inhabiting Central and East Asia.

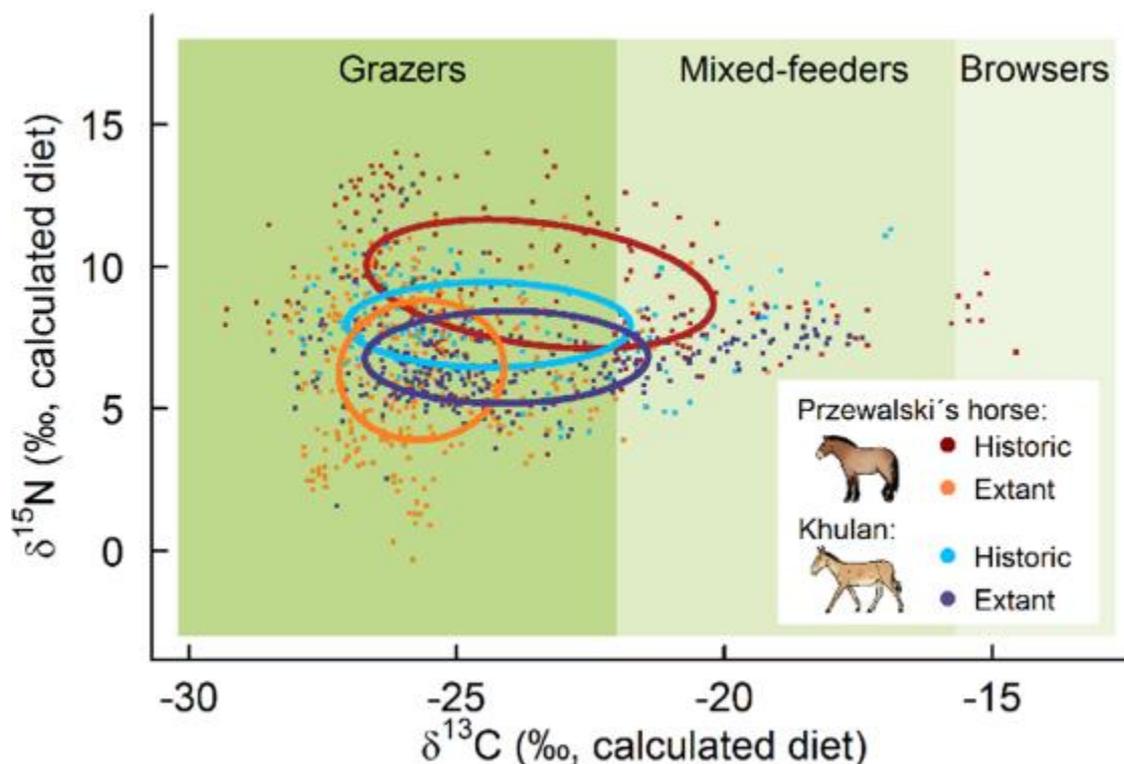


Figure 2 – Isotopic dietary niches of the Przewalski's horses and khulan in the Dzungarian Gobi, clearly indicating a dietary shift from historic to extant Przewalski's horses and the lack thereof in khulan [12].

REFERENCES

- [1] Rubenstein, D.I. 1989. Life history and social organization in arid adapted ungulates. *Journal of Arid Environments* 17:145–156
- [2] O'Leary, M. H. 1981. Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry* 20(4):553–567
- [3] Burnik Šturm, M., Ganbaatar, O., Voigt, C.C., Kaczensky, P. 2017. Sequential stable isotope analysis reveals differences in dietary history of three sympatric equid species in the Mongolian Gobi. *Journal of Applied Ecology* 54:1110–1119
- [4] Schwertl, M., Auerswald, K., Schnyder, H. 2003. Reconstruction of the isotopic history of animal diets by hair segmental analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 17(12):1312–8
- [5] Wittemyer, G., Cerling, T.E., Douglas-Hamilton, I. 2009. Establishing chronologies from isotopic profiles in serially collected animal tissues: An example using tail hairs from African elephants. *Chemical Geology* 267(1–2): 3–11
- [6] Burnik Šturm, M., Pukazhenth, B., Reed, D., Ganbaatar, O., Susnik, S., Haymerle, A., Voigt, C.C., Kaczensky, P. 2015. A protocol to correct for intra- and interspecific variation in tail hair growth to align isotope signatures of segmentally cut tail hair to a common time line. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 29(11): 1047–1054
- [7] Cerling, T. E., Ayliffe, L.K., Dearing, M.D., Ehleringer, J.R., Passey, B.H., Podlesak, D.W., Torregrossa, A.M., West, A.G. 2007. Determining biological tissue turnover using stable isotopes: the reaction progress variable. *Oecologia* 151(2):175–89
- [8] Sponheimer, M., Robinson, T., Ayliffe, L., Roeder, B., Hammer, J., Passey, B., West, A.G., Cerling,

- T.E., Dearing, D., Ehleringer, J.R. 2003. Nitrogen isotopes in mammalian herbivores: hair $\delta^{15}\text{N}$ Values from a controlled feeding study. *International Journal of Osteoarchaeology* 13:80–87
- [9]Ayliffe, L.K., Cerling, T.E., Robinson, T., West, A.G., Sponheimer, M., Passey, B.H., Hammer, J., Roeder, B., Dearing, M.D., Ehleringer, J.R. 2004. Turnover of carbon isotopes in tail hair and breath CO_2 of horses fed an isotopically varied diet. *Oecologia* 139(1):11–22
- [10]Jackson, A.L., Inger, R., Parnell, A.C., Bearhop, S. 2011. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER - Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. *Journal of Animal Ecology* 80(3):595–602
- [11]Parnell, A.C., Inger, R., Bearhop, S., Jackson, A.L. 2010. Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. *PLoS One* 5(3):e9672
- [12]Kaczensky, P., Burnik Šturm, M., Sablin, M.V., Voigt, C.C., Smith, S., Ganbaatar, O., Balint, B., Walzer, C., Spasskaya, N.N. 2017. Stable isotopes reveal diet shift from pre-extinction to reintroduced Przewalski's horses. *Scientific Reports* 7:5950
- [13]Kaczensky, P. 2007. Human value orientation of rural Mongolians. *Human dimensions of wildlife* 12:317–329

Chapter III/35: POPULATION-ECOLOGICAL, MORPHOLOGICAL AND GENETIC CHARACTERISTICS OF WILD REINDEERS IN WEST TAIMYR

Глава III/35: Популяционно-экологическая, морфологическая и генетическая характеристика диких северных оленей Западного Таймыра

Kasim A. Layshev¹, Leonid A. Kolpashchikov², Vladimir V. Mikhailov³, Vitaly V. Terleev^{4,*}, Veronika R. Kharzinova⁵, Arsen V. Dotsev⁵, Tatjana M. Romanenko¹, Natalia A. Zinovieva⁵, Aleksandr V. Prokudin⁶, Mikhail V. Arkhipov^{1,7}

DOI 10.25680/5591.2018.25.46.228

*Email: Vitaly_Terleev@mail.ru

1.All-Russian Research Institute «North-West Centre of interdisciplinary researches of problems of food maintenance», 7, Podbelskogo, Pushkin St. Petersburg, 196608, Russia

2.All-Russian Budgetary Institution "United Directorate of Reserves", 22, Street Talnakhsкая, Norilsk, 663305, Russia

3.All-Russian Budgetary Institution of Science St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 39, line 14, St. Petersburg, 199178, Russia

4.Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg, 195251, Russia

5.L.K. Ernst All-Russian Research Institute of Animal Husbandry, Federal Agency of Scientific Organizations, pos. Dubrovitsy, Podolsk Region, Moscow Province, 142132, Russia

6.Scientific-Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic - Division of Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS", 1, Komsomolskaya str., Krasnoyarsk region, Norilsk, 663305, Russia

7.Agrophysical Research Institute, Grazhdanskiy pr., 14, St.Petersburg, 195220, Russia

ABSTRACT. In the conditions of increasing influence of anthropogenic factors on wild reindeer population of Western Taimyr and their habitat, a reduction of the census size, a decrease in reproductive capacity, a change in spatial distribution and calving sites, and negative tendencies in sex and age structure are observed. Currently, this population is characterized by a relatively high level of genetic diversity, which indicates its good adaptation to the environment. However, the continuing impact of these factors on this population and its habitat can cause a decrease of its census size to a critical state (up to complete extinction) and loss of unique genes, which negatively affects the level of genetic diversity

Резюме. В условиях все возрастающего воздействия антропогенных и техногенных факторов на диких северных оленей Западного Таймыра и среду их обитания отмечается сокращение их численности, снижение репродуктивных способностей, изменение пространственного размещения и мест отела, а также наблюдаются негативные тенденции в половозрастной структуре. На настоящий момент данная популяция характеризуется достаточно высоким уровнем генетического разнообразия, что свидетельствует о ее хорошей адаптационной способности к условиям окружающей среды. Однако, продолжающееся воздействие антропогенных факторов на данную популяцию и среду ее обитания, может вызвать уменьшение ее численности до критического состояния (вплоть до полного истребления) и потерю уникальных генов, что негативно отразится на уровне генетического разнообразия.

KEYWORDS: wild reindeer, ecology-population and morphological characteristics, genetic diversity.

Ключевые слова: дикий северный олень, эколого-популяционная и морфологическая характеристика, генетическое разнообразие.

INTRODUCTION

Large-scale industrial development of the northern territories within the range of the Taimyr population of wild reindeer influenced the change in the migration routes of animals and their spatial distribution, and as a result, the formation within the population of groups with their places of calving and wintering. It is again this background, large-scale poaching of the Taimyr population has intensified rangewide, which has become one of the main eliminating factors in the last few years [1, 2]. The purpose of the research is to characterize the ecological, morpho-physiological and genetic characteristics of wild reindeer in Western Taimyr, which will serve as a basis for further development of recommendations for sustainable conservation, reproduction and rational use of species resources.

MATERIAL AND METHODS

The investigations were carried out in the area of the Taimyr population of wild reindeer in the Western Taimyr on the area of about 300,000 km². Surface observations were conducted according to generally accepted methods of ecological studies [3]. The age of the animals is determined by the layered structure of the incisors of 5984 yearlings. It was examined and processed (sex ratio, fecundity) in the spring -157, in the autumn -517 individuals, the sex was revealed in 67 fetuses at the last stage of development. 1617 deer were processed by the method of morpho-physiological indicators [4, 5].

Genetic studies were carried out on samples of the Taimyr population selected during the expeditionary surveys in various geographical regions of Western Taimyr (n = 57), using microsatellite markers [6, 7].

RESULTS

Abundance, territorial distribution, sex and age composition

By the beginning of the 90s of the last century the number of wild reindeer of the Taimyr population in the Western Taimyr had reached 349.0 thousand heads (Figure 1). Over the past years, the number of animals in the region has declined to 164.0 - 135 thousand heads or decreased by 53% - 61.3%. The greatest decrease in the number of animals was recorded in the Yenisei grouping from 199.0 thousand to 62.0 thousand individuals (68.5%). The decrease in the number of wild reindeer occurred under the influence of a number of factors. So, during the autumn migration deer collided with a barrier in the form of the Messoyakha-Norilsk gas pipeline line.

The obtained materials on the age distribution, variability of sex ratio, reproductive capacity and mortality depending on age allowed to establish a certain differentiation of animals by sex and age. Over the past 15-20 years there has been a change in sex and age composition among the deer of Western Taimyr. The greatest decrease was observed among adult males, which is associated with intensive hunting and uncontrolled withdrawal of adult males in the autumn-winter period, as well as in the spring period when harvesting antlers.

The analysis of fishery samples and their comparison with aerial survey data and ground-based observations of the structure of the population showed that the proportion of calves and young animals under 2 years in the fishery samples is understated. In our study, it was 18.7%, which indicates a preference for fishers to harvest larger animals.



Figure 1. Taimyr population of wild reindeer in summer.

Hunting had a significant impact on animals 3-7 years of age, that is, the most reproductive part of wild reindeer in Western Taimyr. Their share decreased from 82.1% to 70.9%, while the share of the least reproductive part of animals increased from 17.9% to 29.1%. According to the generalized hunting sample over the past 10 years, the tendency of increase in the average age of animals from 4 years (without separation by sex) has been observed in Western Taimyr, to 5.6 years. Changes in the sex-age composition of wild reindeer in Western Taimyr affect the sex ratio.

If at birth it is close to 1: 1, then by the end of the first year is 1: 1.68 in favor of females. With age, this ratio increases: at the age of 3-7 years to 1: 2.88, at the age of 8-10 years, reaches 1: 1.39, that is, with age, there is an increased elimination of males, females are always greater.

The revealed sex ratio, the materials of hunting samples and aerial surveys by the age distribution of individuals allowed us to calculate that in the modern structure of deer groupings in Western Taimyr, the proportion of 3-7 year olds is about 50%, that is, the most productive part of the animals is taken out by the fishery.

Thus, in the last 15 years, the number of wild reindeer in Western Taimyr has decreased, they have changed their spatial location, calving places, negative trends in sex-age structure, gender ratio of the deer region have been outlined - all this is the response of animals to changes in habitat conditions and the influence of anthropogenic factors.

Reproductive abilities of wild reindeer

In recent years, the increase in the number of females in the western migration stream has been noted. There was a significant increase in fecundity of the four-seven year old female reindeer of the most reproductive nucleus, the proportion of which is predominant in the migratory flux. In fact, the natural increase in the Puropyasinsky group, identified by the number of lactating females in the hunting sample, was 14.8%. The fatness of a significant part of the animals from these migratory flows was low. The results of the study of the fatness of the wild reindeer of Western Taimyr showed that 70% of the females and 60% of the males had a fatness below the average. In recent years this regularity has been constantly found in the animals of the migratory flow of the upper reaches of the Pyasina River.

The reduction of the reproductive capacity of wild reindeer in Western Taimyr is due to the fact that the herds are in pastures with low productivity in the zone of permanent anthropogenic and technogenic impact of industrial enterprises and large-scale poaching in the period of migrations.

Under the constant impact of the disturbance factor, animals are forced to graze on poorly productive pastures. It is extremely necessary to continue to regularly monitor fertility indicators in western groups of wild reindeer, as they "represent an elementary unit of the population, and it is on their basis that the adaptive response of the population as a whole to changes in out-and intrapopulation conditions is provided" [8].

Morphological and physiological characteristics of wild reindeer in Western Taimyr

Age and seasonal variability of body weight of males and females is characterized by the data of Table 1, which confirm the patterns of growth and development of wild reindeer.

Table 1. Dynamic of body mass of wild reindeer in Western Taimyr, kg.

Age	Male			Female		
	n	M±m	C, %	n	M±m	C, %
Newborn	21	5.3±0.2	20.6	-	-	-
2-3 months.	7	33.4±2.6	20.6	6	27.4±2.8	24.9
3-4 months.	11	43.5±1.1	8.7	12	40.0±1.5	12.6
9-10 months.	63	42.7±0.5	8.9	75	40.1±0.4	9.3
11 months.	38	36.8±0.6	10.2	44	34.9±0.6	10.8
22-23 months.	14	50.4±1.7	12.6	40	47.9±0.9	11.4
27-28 months.	7	71.7±2.9	10.9	10	67.6±1.5	7.1
39-40 months.	17	89.8±2.9	13.1	12	73.6±1.6	7.7
51 months.	18	132.6±2.8	18.2	31	84.2±1.6	8.4

Note: n - number of goals; M-average, m - error of the arithmetic mean, C – the coefficient of variation.

In general, Western Taimyr has seen a decrease in the live weight of adult deer (especially in males) over the last 20 years of exploitation of groups by 6.7-8.9% (in males) and by 4.8-6.7% (in females). In all likelihood, with regard to males, the selectivity of hunting for the withdrawal of larger individuals is more evident. This also confirms the findings about a stable tendency to reduce the proportion of adult males in wild reindeer groups in Western Taimyr.

A survey of female females also showed a decrease in their average weight and an increase in the proportion of females in the range of live weight from 50 to 70 kg. Females do not gain the permissible weight in recent years, which adversely affects the growth of the spring, the birth of weakened calves and the development of the embryo. In our opinion, the main reason for this is the selectivity of the fishery, as a result of which the largest individuals are eliminated.

The analysis of the age structure of horny females showed that hornlessness is found in all age classes, i.e. the elimination of females from the population is the same as in horned individuals. During the years of research into this feature, we found that over the past 25 years there has been a tendency to reduce the incubation of females. This indicates that the conditions of the animal habitat in Western Taimyr are deteriorating, and there are difficulties in providing full-value feeding in the mother-calf system. It is difficult for a female to protect a feeding hole in the snow period, which has negative consequences for females and her calf. The percentage of barren does is higher among hornless ones.

Genetic characteristics of wild reindeer in Western Taimyr

Based on the obtained microsatellite profiles of wild reindeer in Western Taimyr, we calculated the main intra-population indices of genetic diversity: the degree of expected (H_e) and observed heterozygosity (H_o), allelic diversity (A_r) and the coefficient of inbreeding (F_{is}): $H_e = 0.809 \pm 0.019$, $H_o = 0.672 \pm 0.041$, $A_r = 10.714 \pm 0.707$, and $F_{is} = 0.174$, respectively. Positive values of the coefficient of inbreeding indicate a shift in genetic diversity towards a lack of heterozygotes. The effective size of the population (N_e) was used as a criterion for determining the risk of extinction and establishing the limits of conservation and development of the studied population. For a population of wild reindeer in Western Taimyr, a fairly high value of $N_e = 140.7$ (95% CI, 109-191.3) was found, indicating a high evolutionary potential of the population.

DISCUSSION

The number of wild reindeer in Western Taimyr tends to decrease. Over the past 15-25 years, it has declined by 53-65%. There has been the greatest decrease in the number of wild reindeer in the Yenisei group. The area of reindeer of Western Taimyr is shifting in an easterly direction affected by anthropogenic, technogenic and food factors. At the same time, the process of shifting the calving areas to the south and east is proceeding. There is a change in the sex-age composition among wild reindeer in Western Taimyr: a decrease in the proportion of adult males from 15.0 to 5.4%, which is associated with intensive hunting and uncontrolled withdrawal of adult males in the autumn-winter period, as well as in spring with uncontrolled harvesting un-ossified antlers.

The poorly controlled hunting for wild reindeer in Western Taimyr had a significant impact on animals at the age of 3-to 7, that is, on the most reproductive part of animals: their share decreased from 82.1% to 70.9%. The share of the least reproductive part of the animals increased accordingly from 17.9% to 29.1%, that is, the most productive part of the animals is taken out by the fishery. There has also been a decrease in the live weight, an increase in deer lower middle-fatness and lean ones (females of up to 70%, males to 60%), an increase in the female's fecundity to 32-36% among the wild reindeer of Western Taimyr.

These facts indicate a certain negative impact of environmental factors on the morpho-physiological indicators of wild reindeer of Western Taimyr. Over the past 25 years, there has been a tendency for the reduction of non-hunting females. This shows that the conditions of the animal habitat in Western Taimyr are worsening, and there are difficulties in providing full-value feeding in the mother-calf system. There has been a trend towards a decline in productive and reproductive parameters among the wild reindeer of Western Taimyr.

It was identified on the basis of the analysis of microsatellites that the population of wild reindeer in Western Taimyr is characterized by a sufficiently high level of genetic diversity, which is shifted to the disadvantage of heterozygotes and a high value of the effective size of the population. Data on the effective size of the population of other groups of wild reindeer in our country are not yet available in the literature. Frank et al [9] calculated the values of this indicator for 600 red deer (*Cervus elaphus*), selected for the most part of the European habitat. It was found that N_e for most of the studied populations is within the permissible range, although with lower maximum values calculated for German and Spanish deer ([10]. However, the values of N_e ($N_e = 2.0$ and $N_e = 8.2$) were critically low for the red deer Sardinia and Mesola, which confirms their genetic "exhaustion", provoked by the effect of the "bottle neck" and their practical disappearance.

CONCLUSIONS

1. At the moment, the wild reindeer population of Western Taimyr, for its own safety, is well adapted to environmental conditions.
2. However, the further intensively increasing impact of anthropogenic and technogenic factors on this population and its habitat will lead, first of all to a decrease in its abundance, to the loss of unique genes and to a decrease in genetic diversity in general, and second to its further complete disappearance.
3. In connection with the foregoing, it is necessary to systematically monitor the state of population-ecological, morphological and genetic indicators in the wild reindeer population of Western Taimyr in order timely to record the direction of intra-population shifts and effectively to regulate the quantitative and qualitative composition of the population by restrictive hunting and security measures in order to maintain its stable productivity.

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 16-16-10068.

REFERENCES

- [1] Kolpashchikov L.A., Mikhailov V.V. and Mukhachev A.D. 2011. Ecosystem: reindeer-pasture-man. Saint-Petersburg. 336 p.
- [2] Kharzinova V.R., Dotsev A.V., Kramarenko A.S., Layshev K.A., Romanenko T.M., Solovieva A.D., Deniskova T.E., Kostunina O.V., Brem G. and Zinovieva N.A. 2016. Study of the allele pool and the degree of genetic introgression of semi-domesticated and wild populations of reindeer (*Rangifer tarandus* L., 1758) using microsatellites. Sel'skokhozyaistvennaya biologiya. Agricultural Biology. **51(6)** pp 811-823. Doi: 10.15389/agrobiology.2016.6.811eng
- [3] Klevezal G.A. and Kleinenberg S.A. 1967. Determination of the age of mammals in the layered structures of teeth and bones. Moscow: Science. 144 p.
- [4] Kolpashchikov L.A., Pavlov B.M. and Mikhailov V.V. 1999. The method of aerial survey and determination of norms of the population of the Taimyr population of wild reindeer. Sankt-Petersburg. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Politehnicheskogo Universiteta. 25 p.
- [5] Prokhorova M.I. and Tupikova Z.N. 1965. A large practical work on carbohydrate and lipid metabolism. Leningrad: Leningrad Publishing House. University. 220 p.

- [6]Kharzinova V.R., Gladyr E.A., Fedorov V.I., Romanenko T.M., Shimit L.D., Layshev K.A., Kalashnikova L.A. and Zinovieva N.A. 2015. Development of a multiplex microsatellite panel for assessing the authenticity of origin and the degree of differentiation of reindeer populations (*Rangifer tarandus*). *Agricultural Biology*. **50(6)** pp 756-765. Doi: 10.15389/agrobiol.2015.6.756rus
- [7]Keenan K., McGinnity P., Cross T.F., Crozier W.W. and Prodohl P.A. 2013. DiveRsity: An R package for the estimation of population genetics parameters and their associated errors. *Methods in Ecology and Evolution*. **4(8)** pp 782-788
- [8]Shilov I.A. 2003. *Ecology*. Moscow. Science. 512 p.
- [9]Frank E., Zachos F.E., Frantz A.C., Kuehn R., Bertouille S., Colyn M., Niedzialkowska M., Pérez-González J., Skog A., Sprēm N. and Flamand M-C. 2016. Genetic Structure and Effective Population Sizes in European Red Deer (*Cervus elaphus*) at a Continental Scale: Insights from Microsatellite DNA. *Journal of Heredity*. **107(4)** pp 318-326. Doi:10.1093/jhered/esw011
- [10]Kuehn R., Schroeder W., Pirchner F. and Rottmann O. 2003. Genetic diversity, gene flow and drift in Bavarian red deer populations (*Cervus elaphus*). *Conserv Genet*. **4** pp 157-166

Глава III/36: АНАЛИЗ ЭКОЛОГИИ РЫСИ (*Lynx lynx*) В ЯКУТИИ Chapter III/36: Analysis of the Ecology of the Lynx (*Lynx lynx*) in Yakutia

Виктор Т. Седалищев, Валерий А. Однокурцев*

DOI 10.25680/9235.2018.93.31.229

*Эл. Почта: odnokurtsev@ibpc.vsn.ru

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, ул. Проспект Ленина 41, 677980, г. Якутск, Россия

РЕЗЮМЕ. Распространение рыси в Якутии связано в основном с лесным ландшафтом. В отличие от других регионов России, рысь избегает близости жилья человека и практически не приближается к деревням, к стоянкам коневодов, охотничьим избушкам. Основу питания хищника в районах Западной, Центральной и Северо-Восточной Якутии составляет заяц-беляк – 72,9, 75,9 и 71,4% (в пик численности). В Южных, Юго-Западных и Северо-Западных районах этот показатель ниже – 42,8, 38,6 и 36,3% и это связано с тем, что заяц-беляк в этих регионах малочислен, зато в этих регионах в пищевом рационе большой процент встречаемости мелких копытных (кабарга, косуля) и птицы. В отличие от других регионов России, у якутской рыси пищевой рацион скудный, низкая плодовитость – 1,62 котенка на одну рожающую самку. Обнаружено 5 видов гельминтов: 2 вида цестод и 3 вида нематод. Общая зараженность составила 95%. Численность рыси низкая и сильно колеблется по годам – от 700 до 1200 особей. В связи с низкой численности рыси необходимо запретить промысел, а вид занести в Красную книгу Якутии.

Abstract. Lynx's distribution area in Yakutia is mainly related to forest landscapes. In contrast to the other Russia's regions lynx avoids human habitation proximity and practically doesn't approach to villages, horse breeders' camps or hunters' huts. The predator food base is consisted of mountain hare: 72.9% – in western areas, 75.9% – in central areas and 71.4% – in north-eastern areas of Yakutia (during the hare population peak). In southern, south-western and north-western areas this indicator is lower: 42.8, 38.6 and 36.3% respectively and the reason for that is because the mountain hare population in these areas is poor, but on the other hand lynx's dietary intake in these areas has a high percentage of the small ungulate occurrence (musk deer, roe deer) and birds. Unlike the other regions of Russia, Yakut lynx has a poor food ration and low fertility – 1.62 kittens per one female lynx that gave birth. Five helminth species were detected: 2 cestodes and 3 nematodes. Total infection rate was 95%. The lynx numbers are low and fluctuate too much throughout the years – from 700 to 1200 individuals. Due to the low numbers of lynx, it is necessary to ban hunting and include lynx to the Red Data book of Yakutia.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Якутия, район, ландшафт, рысь, численность, питание, гельминты, зараженность.

Keywords: Yakutia, districts of Yakutia, lynx, landscape, diet, mountain hare, numbers, helminthes, infection rate, lynx numbers.

ВВЕДЕНИЕ

Экология рыси (*Lynx lynx* L., 1758), обитающей в Якутии, изучена не достаточно, немногочисленны материалы по питанию, поведению, размножению и по зараженности эндопаразитами [5, 6, 9]. В связи с этим нами проведен анализ собственных многолетних и литературных данных по экологии якутской рыси.

Сбор полевого материала по экологии рыси проводился с 1981 по 2013 гг. на территории шести регионов Якутии: Западной, Центральной, Южной, Юго-Западной, Северо-Восточной и Северо-Западной. Было пройдено маршрутом 465 км, кроме того сведения о численности рыси, на участке обитания, зверя получали при поездках (1980 км) на мотонартах «Буран». Обработано 27 тушек рыси, которые приобретались у охотников, исследовано на питание 265 экскрементов. Кроме собственных учетных данных о численности рыси, обрабатывались и использовались данные зимних маршрутных учетов (ЗМУ), анкетные данные (n=585) охотников и проводился опрос охотников (n=158) по экологии и численности рыси.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ

Лесной ландшафт – основное местообитание рыси в Якутии. Может заходить в тундру, иногда проникает до побережья океана. Повсюду она малочисленна [5, 9].

МЕСТООБИТАНИЯ

Рысь встречается в различных лесных стадиях – лиственничниках, сосняках, тальниках и ольховниках, в зарослях и гарях. Открытые пространства (поля, сенокосные угодья, пастбища) избегает. В отличие от других регионов России: Северо-Восток России [4], Северо-Запад России [2] якутская рысь [9] избегает близости жилья человека и практически не приближается к деревьям, к стоянкам коневодов, охотничьим избушкам.

МОРФОЛОГИЯ

По нашим данным длина тела взрослых самцов (n=7) в среднем равна 103,3±1,20 см (101-106), масса тела (без шкуры) 21,0±0,69 кг (19-22), т.е. якутские рыси по длине и массе тела намного крупнее, чем особи [2] из Северо-западной России (99,5 см и 16,8 кг). По размерам черепа якутские рыси по таким показателям, как кондилобазальная длина, скуловая ширина и высота черепа отличаются от особей, обитающих в Северо-западной России. Эти показатели у якутских рысей достоверно выше по сравнению северо-западными особями. Так, у рысей из Якутии кондилобазальная длина больше на 6,8 мм (146,5 против 139,7 мм), скуловая ширина – на 10,3 мм (114,5 против 104,3 мм) и высота черепа - на 1,1 мм (63,3 против 62,2 мм) и эти различия статистически достоверны (t=17,8, 15,9 и 6,8). Следует отметить, что по размерам черепа якутские рыси практически не имеют достоверные различия в сравнении с особями, добытыми на Северо-востоке Сибири [12].

ПИТАНИЕ

Анализ 265 экскрементов рыси, показал, что основу питания хищника в районах Западной, Центральной и Северо-Восточной Якутии составляет заяц-беляк – 72,9, 75,9 и 71,4% (в пик численности). В Южных, Юго-Западных и Северо-Западных районах этот показатель ниже – 42,8, 38,6 и 36,3% и это связано с тем, что заяц-беляк в этих регионах малочислен, зато в этих регионах в пищевом рационе больший процент встречаемости мелких копытных (кабарга, косуля), молодняк изюбра, лося и северного оленя и птиц. Мышевидные в питании рыси во всех регионах Якутии имеют незначительный процент, и материалы троплений показали, что успешность охоты не высока, добывают их случайно и служат, как резервный корм. Пищевой рацион якутской рыси очень узкий и отличается от кормов зверей, обитающих на Северо-западе России. Например, по сравнению с Северо-западными зверями [2] у якутских особей в пищевом рационе меньше птиц (14,3 против 26,0%) и не встречаются домашние животные и падаль.

Площадь индивидуального участка рыси в условиях Якутии составляет 45-60 км² (в пик численности зайца) и 120-170 км² (в период низкой численности зайца). Период обхода территории от

5-10 до 15-30 дней (в зависимости от кормовой базы). Длина суточного хода ($n=15$) рыси в среднем равна $8,6\pm 1,02$ км (4,1-15,6 км). При глубине снега 20-25 см рысь может использовать следы других животных (лося и оленя). Не боится зверь лыжного и вездеходного следа.

РАЗМНОЖЕНИЕ

Гон у рыси в Якутии начинается в конце февраля и продолжается до первой декады марта. В период гона звери активны днём и в этот период возрастает частота маркировок (49-54 мочевых точек на 10 км пути). Во всех случаях за самкой следовал один самец [9]. Рождение котят, видимо, происходит в мае или в первой половине июня. Так, 15 июля 1982 г. в Хангаласском районе в долине р. Синяя, собаки обнаружили логово рыси с двумя котятами. Длина тела одного рысёнка 35 см, хвоста 7 см, длина тела второго 36 см, хвоста 8 см, масса тела 1 кг 450 г и 1 кг 500 г. Такую массу тела имеют детёныши рыси в возрасте 1,5-2 месяца [11]. Если учесть длительность беременности рыси 70 дней [11], то очевидно, что самка была покрыта в 1 декаде марта. Котята растут медленно в конце сентября – начале октября они имеют массу тела 5-6 кг. В условиях Якутии количество котят в помёте бывает 2-3, реже 4 [5]. В среднем на одну рожавшую самку приходилось $1,62\pm 0,17$ котенка. Плодовитость якутской рыси ниже, чем у особей из Кировской области [1] и Северо-западе [2], где этот показатель составляет 1,91 и 1,73 котенка. Сеголетки живут с матерью около года [9].

ГЕЛЬМИНТОФАУНА

При исследовании 20 рысей на заражённость гельминтами было обнаружено в кишечном тракте четыре вида эндопаразитов: два вида цестод – *Taenia hydatigena* (Pallas, 1766), *Taenia mustelae* (Gmelin, 1790) и два вида нематод – *Ancylostoma caninum* (Ercolani, 1859) и *Toxocara mystax* (Zeder, 1800), у одной рыси в мышцах были обнаружены инкапсулированные личинки *Trichinella nativa* (Britov et Voev, 1972). Всего зафиксировано пять видов, общая заражённость составила 95%. Наиболее сильно рысь заражена нематодой *Toxocara mystax*. Заражённость молодых ($n=12$) зверей по сравнению с взрослыми особями ($n=7$) была выше на 12,5% (100 против 87,5%).

ВРАГИ И КОНКУРЕНТЫ

Врагами рыси считают волка [2, 4, 5]. Пищевыми конкурентами у рыси являются россомаха и обыкновенная лиса, у которой охотничьи биотопы и методы добычи несколько похожи рысьими. Численность лисицы [8] и россомахи [10] в Якутии не высокая и в связи с этим влияния на популяцию рыси они не оказывают.

ЧИСЛЕННОСТЬ

Численность рыси в Якутии очень изменчива и зависит от таковой зайца-беляка [5]. По данным ЗМУ послепромысловая численность рыси в Якутии сильно варьирует по годам от 700 до 1200 особей (рис.). По регионам численность хищника может находиться в следующих пределах: для районов Западной Якутии от 70 до 260 особей, Центральной Якутии – 60-120, Южной Якутии – 120-150, Юго-Западной Якутии – 70-160 и для районов Северо-Восточной Якутии от 200 до 310 особей.

Рысь в Якутии повсюду малочисленна и прослеживается тесная зависимость численности вида от зайца-беляка. За период 1990 по 2017 гг. численность зайца-беляка в Якутии по сравнению с периодом 1950-1959 гг. сократилась в 10 раз. Причиной снижения численности зайца является, воздействие антропогенного фактора из-за, которого нарушился ритм движения численности беляка [7]. Промысел рыси в республике развит слабо и носит случайный характер (часто попадает в петли на заячьих тропах). За период с 1935 по 1971 гг. среднегодовые заготовки шкур рыси составляли 140 шкур. Максимальное количество рысьих шкур (700 штук) было заготовлено в 1934 и 1935 гг. Минимальные заготовки доходили до 20 шкур в год [5]. Последние два десятилетия в заготовительные организации Республики практически шкуры рыси не поступают. Следует отметить, что минимальные заготовки шкур рыси отмечались в середине XIX века [3] и, видимо, это было связано с низкой численностью вида. За период с 1837 по 1843 гг. на Якутскую ярмарку не поступило не одной шкуры рыси, а с 1850 по 1959 гг. в среднем в год заготавливалось 13 шкур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В отличие от других регионов России, якутская рысь избегает близости жилья человека и практически не приближается к деревьям, к стоянкам коневодов, охотничьим избушкам.
2. Пищевой рацион хищника скудный, у якутских особей в пищевом рационе меньше птиц (14,3%) и не встречаются домашние животные и падаль.
3. Имеет низкую плодовитость - 1,62 котенка на одну рожавшую самку.
4. В кишечном тракте обнаружено 4 вида гельминтов: 2 вида цестод и 2 вида нематод, в мышечной ткани у одной рыси обнаружены личинки *Trichinella native*. Общая зараженность составила 95%.
5. Численность рыси низкая и сильно колеблется по годам – от 700 до 1200 особей и зависит от кормовой базы. По-видимому, существуют какие – то естественные факторы, сдерживающие рост численности рыси. Возможно, что разреженность популяции при одиночном образе жизни приводит к тому, что в период гона самки не всегда находят себе пару и остаются холостыми. Кроме того в условиях дефицита кормов рысь вынуждена в поисках пищи увеличивать пространственную активность, что облегчает ее добычу охотниками.
6. В связи с низкой численности рыси необходимо запретить промысел, а вид занести в Красную книгу Якутии.

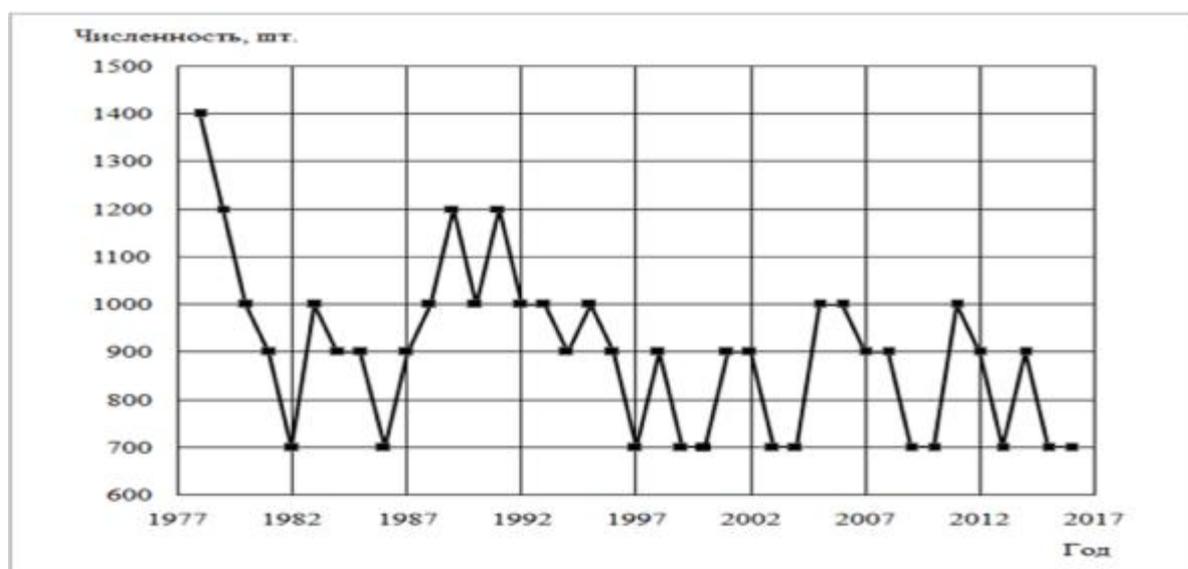


Рис. 1 Послепромысловая численность рыси (шт.) в Якутии за период с 1978 по 2016 гг.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Глушков В.М., Граков Н.Н., Козловский И.С. и др. Управление популяциями охотничьих животных. Киров, 1999. 210 с.
- [2] Данилов П.И., Русаков О.С., Туманов И.Л. Хищные звери Северо-запада СССР. Л.: Наука, 1979. 163 с.
- [3] Дьяконов А.Л. Пушной промысел в Якутии конца XVIII – середины XIX века. Якутск, 1990. 143 с.
- [4] Зайцев В.А. Позвоночные животные Северо-востока Центрального региона России (Виды фауны, численность и ее изменения). Товарищество научных изданий КМК. М., 2006. 523 с.
- [5] Млекопитающие Якутии // Тавровский В.А., Егоров О.В., Кривошеев В.Г. и др. М.: Наука, 1971. 660 с.
- [6] Мордосов И.И. К экологии рыси в Якутии // Фаунистические и экологические исследования животных Якутии. Сб. научн. трудов. Якутск, 2002. С. 101-111.
- [7] Прокопьев Н.П., Седалищев В.Т. Изменение численности и заготовок шкурок зайца-беляка в Якутии // Вестник СВНЦ ДВО РАН, 2009. № 3. С. 24-29.
- [8] Седалищев В.Т., Однокурцев В.А. К экологии обыкновенной лисицы (*Vulpes vulpes* L., 1785) Якутии // Вестник СНЦ РАН, 2012. Т. 14. № 1. С. 186-191.

- [9]Седалищев В.Т., Однокурцев В.А., Охлопков И.М. Материалы по экологии рыси (*Lynx lynx* L., 1758) Якутии // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1. С. 175-182.
- [10]Седалищев В.Т., Однокурцев В.А. Материалы по экологии росомы (*Gulo gulo* L., 1758) в Якутии // Монография «Крупные хищники Голарктики». М., 2016. С. 184-187.
- [11]Туманов И.Л. Биологические особенности хищных млекопитающих России. Санкт-Петербург: Наука, 2003. 437 с.
- [12]Чернявский Ф.Б. Млекопитающие крайнего Северо-востока Сибири. М.: Наука, 1984. 388 с.

Chapter III/37: QUANTIFYING PREY SELECTION OF NORTHERN AND SOUTHERN EUROPEAN WOLVES (*Canis lupus*)

Глава III/37: Количественная оценка пищевых объектов волков (*Canis lupus*) в северной и южной Европе

Sophie Ståhlberg*, Elena Bassi, Viviani Viviani, Marco Apollonio

DOI 10.25680/9621.2018.35.15.230

*Email: sophie.stahlberg@zoologi.su.se

Department of Natural and Environmental Science, University of Sassari, Via Muroni 25, Sassari 07100, Sassari, Italy

ABSTRACT. Wolf (*Canis lupus*) diet is determined by several ecological factors which can differ with latitude and human impact on the environment. Scats were collected and analysed for nine years in South-central Scandinavia and four years in Tuscany, Italy, where prey density, predator-prey size relation and habitat heterogeneity, were compared in different ecological perspectives. Consumption followed prey density in Scandinavia but not in Tuscany and the main prey species, moose and wild boar respectively, were more seasonally age diversified in Scandinavia than in Tuscany. The underlying mechanism is most likely related to the limited ecological diversity of landscape in Scandinavia contrasted with the higher variability of South European landscapes resulting in higher variation in prey abundance and consequently prey choice.

Резюме. Состав питания волков (*Canis lupus*) определяется несколькими экологическими факторами, которые могут различаться в зависимости от географической широты и воздействия человека на окружающую среду. Экскременты были собраны и проанализированы в течение девяти лет в южной и центральной Скандинавии и четырёх лет в Тоскане, Италия, где плотность жертв, соотношение хищников и жертв и гетерогенность ареала обитания были сопоставлены в разных экологических перспективах. В Скандинавии потребление определялось плотностью распространения добычи, и основные виды добычи, лоси и кабаны соответственно, были более сезонно диверсифицированы в Скандинавии, чем в Тоскане. Основопологающий механизм, скорее всего, связан с ограниченным экологическим разнообразием ландшафта в Скандинавии, в отличие от более высокой изменчивости ландшафтов Южной Европы, что приводит к более высокой вариации численности обитающих животных и, следовательно, выбора жертвы.

KEY WORDS: Diet composition, Scat analysis, Habitat heterogeneity, Biomass, *Canis lupus*

Ключевые слова: диетический состав, анализ экскрементов, гетерогенность среды обитания, биомасса, *Canis lupus*

INTRODUCTION

An animal exhibits a preference for a particular type of food when the proportion of that type in the animal's diet is higher than its proportion in the environment [1]. Amongst carnivores, ranked preferences are seen most clearly when actively selecting prey items that are the most profitable in terms of energy intake per unit time spent handling prey, i.e. the "functional response", classified by Holling [2]. Wolves (*Canis lupus*) are highly adaptive and behaviourally flexible carnivores that have evolved to hunt prey

widely ranging in size, although they are most commonly categorised as cursorily hunters of large ungulates. Factors affecting wolf diet in addition to prey species ecology and latitudinal differences in habitat attributes include human predation [3], agricultural policies [4], climate changes [5] and the genetic structure of populations [6]. We compare the wolf diet in Northern and Southern Europe, valuable when analysing the ongoing wolf recolonization of e.g. the Alps. We tested the hypothesis that habitat features determine the outcome of the wolf diet, as these regulate prey distribution and abundance in the different areas (Table 1, Fig. 1)

Table 1: Data of the study areas

Study areas	Scandinavia	Tuscany, Italy
coordinates	59°61' - 61°00'N - 11°17' - 16°30'E	43°48'N, 11°43'E 44°11'N, 10°23'E 43°20'N, 10°57'E
study period	1997 - 2006	2005 - 2009
study area size	17,370 km ²	8,000 km ²
altitude	50 - 1,000 m.a.s.l	100 - 2,054 m.a.s.l
snow depth	10-75 cm	0-75 cm
temperature January / July	-7°C / 15°C	8°C / 17.5°C
yearly precipitation	600 - 1,200 mm	732 - 1,500 mm
wolf mean weight kg	40.7	31.7
females	36.9	27.1
males	44.5	34.7
number of wolves	252 - 291	1300 - 1800
main prey mean bodymass	160.6 kg	33.8 kg
road density in study area	0.62 km/ km ²	1.5 km/ km ²
human density in study area	1/km ²	0.5/km ²



Figure 1 - Study areas in northern and southern European wolf territories.

MATERIAL AND METHODS

Data were collected in south-central Scandinavia, hereafter abbreviated SCA. SCA's boreal forests are among the most intensively exploited forests in the world, with less than 5% virgin forest left standing. Tuscany, hereafter abbreviated TUS, is located in North-central Italy and is a probable source of dispersing wolves to the Alps. Yearly biomass ingested from the food items were estimated on the basis of the known relationship between prey biomass consumed per collectable scat produced, using three calculations; Floyd equation: $y = 0.383 + 0.02x$, Weaver equation: $y = 0.439 + 0.008x$ and Ruehe equation $y = 0.731 + 0.00406x$, where the x = assumed live weight of prey species and y = estimated biomass consumed per scat [7,8,9]. The Weaver equation was used for seasonal biomass calculation. To investigate

prey preference, Manly's Alpha preference index, also known as Chesson's index [10] was used: $\alpha_i = (r_i/n_i) * [1/\sum(r_j/n_j)]$ where prey type r_i or r_j is the proportion in the diet and n_i or n_j the proportion in the environment. The calculations of niche width were based on seven prey groups in SCA and eight in Italy. Levin's Food Niche Breadth (FNB) index [11] was used to measure specialisation quantitatively for the wolf diet composition within SCA and TUS. Levin's index is defined as $B = 1/\sum p_{ij}^2$ where p_j = proportion of fractions of items in the diet that are of food category j . To calculate niche overlap, Pianka's index [12] was used: $O_{jk} = \sum (p_{ij} * p_{ik}) / [\sqrt{\sum p_{ij}^2 * \sum p_{ik}^2}]$.

RESULTS

In SCA, 2,159 scats were collected and analysed, whereof 90.5% contained wild ungulates, 5.7% small mammals, 0.7% birds, 0.5% domestic animals, 0.6% other prey and 2.5% vegetarian (berries and grass). 542 scats were collected in TUS, containing 89.8% wild ungulates, 1.4% small mammals, 3.2% domestic animals, 1% other preys and 5.5% fruit, berries and grass. In SCA, biomass intake concerned wild ungulates 89.1%, small mammals 10.4% and domestic animals 0.6%. TUS showed biomass intake concerning wild ungulates 95.1%, whereas small mammals 1.5% and domestic animals 3.4%. Levin's Food Niche Breadth was broader in TUS ($B = 4.0$) than in SCA ($B = 2.5$) and consequently the standardised niche breadth was higher in TUS ($BA = 0.23$) than in SCA ($BA_{335} = 0.12$). This results in a higher inter-areas niche overlap in SCA ($O_{jk} = 0.85$) than in Italy ($O_{jk} = 0.63$) using Pianka's index. In SCA the main source of biomass consumed was by one third from moose during summer, and nearly exclusively during winter. The selection of moose calves increased significantly in summer in respect to winter ($U = 1,443.5$, $n = 216$, 18 , $P = 0.05$). However, when comparing summer and winter seasons, the second prey choice, roe deer, in summer is more variable, explicitly in SCA. In TUS wild boar was the most selected all year around. Young weighing 10-35 kg were most selected in winter, while no significant difference in use of age classes was found in summer. Using Manly's alpha preference index, wolves in SCA clearly showed positive preference for moose. TUS showed highest preference of wild boar, mouflon and fallow deer.

DISCUSSION

The major component of wolf diet comes from wild ungulates followed by a minor part of small mammals and domestic animals in both areas shown by three equations, Floyd, Weaver and R  he. Moose was the main prey in Scandinavian wolf diet, having the highest density values. The intensive forest management may have resulted in an increased production of moose forage. In Italy, wild boar was the main prey species, yet less numerous than the second selected prey species, roe deer. Strongly different ungulate communities of the three Tuscan areas, generated changes in prey composition and density of the sample through years. Even if SCA territories were larger than TUS ones, TUS presented a higher heterogeneity in terms of number of prey species; the prey community was composed by only two prey species in SCA and by a total of five species in TUS. Different latitudes may reflect on abiotic and biotic habitat heterogeneity, however, the level of human utilisation of the landscape too determines wolf diet diversification. Forestry practice can be developed without huge economical losses for the forest industry, yet benefitting biodiversity including ungulates [13] and consequently large carnivores. Finally, the more varied landscape of TUS, with elevations ranging from 100 to 2,500 m.a.s.l and vegetation moving from Mediterranean scrubs to high mountains pastures is a further reason promoting its higher variability within region variability. The Tuscan wolf diet resulted to be more heterogeneous than the Scandinavian, confirmed by the Levin's and Pianka's index values.

CONCLUSIONS

1. Moose was the primary prey species and biomass source in SCA and wild boar in TUS, whereas roe deer was the secondary in both study areas. Hence, prey preference did not always correlate with prey selection.
2. Age- and size groups affects the risk of injury which was clearly shown by the high increase of juvenile prey when available to avoid injury.
3. The SCA dataset showed a continuous and stable image from 1997-2006 with negligible temporal, prey species-specific or food item variance. Contradictory, the TUS dataset 2005-2009 showed great variance.
4. The intensively exploited forest industry in SCA prevents rich species diversity opposing to the abandoned former agricultural areas in the Apennines, allowing re-forestation and species diversification.

REFERENCES

- [1]Macarthur, R.H. and Pianka, E.R. 1966. On optimal use of a patchy environment. *American Naturalist* 100, 603-609.
- [2]Holling, C.S., 1959. The components of predation as revealed by a study of small mammal predation of the European pine sawfly. *Canadian Entomologist* 91(5), 293-320.
- [3]Sidorovich, V.E., Tikhomirova, L.L., Jedrzejewska, B. 2003. Wolf *Canis lupus* numbers, diet and damage to livestock in relation to hunting and ungulate abundance in northeastern Belarus during 1990-2000. *Wildlife Biology* 9, 103-111.
- [4]Llaneza, L. and López-Bao, J.V. 2015. Indirect effects of changes in environmental and agricultural policies on the diet of wolves. *European Journal of Wildlife Research* 61, 895-902.
- [5]Mech, L.D. and Fieberg, J. 2014. Re-evaluating the Northeastern Minnesota moose decline and the role of wolves. *Journal of Wildlife Management* 78 (7), 1143-1150.
- [6]Jędrzejewski, W., Niedziałkowska, M., Hayward, M.W., Goszczyński, J., Jędrzejewska, B., Borowik, T., Bartoń, K.A., Nowak, S., Harmuszkiewicz, J., Juszczak, A., Kałamarz, T., Kloch, A., Koniuch, J., Kotiuk, K., Mysłajek, R.W., Nęczyńska, M., Olczyk, A., Teleon, M., Wojtulewicz, M. 2012. Prey choice and diet of wolves related to ungulate communities and wolf subpopulations in Poland. *Journal of Mammalogy*, 93(6), 1480-1492.
- [7]Floyd, T. J., Mech, L.D., Jordan, P.A. 1978. Relating wolf scat content to prey consumed. *Journal of Wildlife Management* 42, 528-532.
- [8]Weaver, J.L. 1993. Refining the equation for interpreting prey occurrence in gray wolf scats. *Journal of Wildlife Management*. 57, 534-538.
- [9]Ruhe, F., Ksinsik, M., Kiffner, C. 2003. Conversion factors in carnivore scat analysis: sources of bias. *Wildlife Biology* 14, 500-506.
- [10]Chesson, J. 1978. Measuring preference in selective predation. *Ecology* 59, 211-215.
- [11]Levins, R. 1968. *Evolution in changing environments*. Princeton University Press, Princeton.
- [12]Pianka, E.R. 1973. The structure of lizard communities. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4, 53-74.
- [13]Beguín, J., McIntire, E.J.B., Raulier, F. 2015. Salvage logging following fires can minimize boreal caribou habitat loss while maintaining forest quotas: An example of compensatory cumulative effects. *Journal of Environmental Management* 163, 234e245.

Часть 10 Сенсоры и технологии мониторинга Part 10 Sensors and Monitoring Technologies

Основная глава 10.1 Наземные датчики и технологии мониторинга Main Chapter 10.1 Terrestrial Sensors and Monitoring Technologies

Глава III/38: ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ЛАНДШАФТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Chapter III/38: Application of Electrophysical Methods in Landscape Research

Галина Ю. Рабинович^{*1}, Антонина Д. Позднякова¹, Лев А. Поздняков^{1,2}

DOI 10.25680/3457.2018.62.78.231

*Эл. Почта: yniimz@list.ru

1. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт мелиорированных земель» (ФГБНУ ВНИИМЗ), п. Эммаусс, д. 27, 170530, Тверская область, Россия

2. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Факультет почвоведения, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, 119991 Москва, Россия

РЕЗЮМЕ. Целью данной работы является описание принципа и возможности применения электрофизических методов – метода горизонтального электрического профилирования (ГЭП) и метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) почв. ГЭП и ВЭЗ – это экспресс-методы измерения электрического сопротивления почв на любой глубине, не нарушая почвенного покрова. Измерения проводятся специально разработанным для этих целей геофизическим прибором LandMapper[®]. Методы могут применяться для мониторинговых наблюдений различных свойств почв, для экспрессного полевого картирования и мониторинга сельскохозяйственных угодий, геологических, гидрологических и экологических изысканий; а также строительства и ландшафтного дизайна. Метод опробован на основных агроландшафтах Европы, Азии и Америки.

Abstract. Goal of this paper is to present the principle and applications of electrical geophysical methods – method of horizontal electrical profiling (HEP or mapping) and vertical electrical sounding (VES) in soil studies. HEP and VES are methods measuring soil electrical resistivity at any depth without collecting samples and disturbing topsoil. Measurements are conducted with the geophysical device LandMapper[®] which was specially designed for soil landscape research. Methods can be applied to monitor various soil properties, to fast mapping and monitoring of agro-landscapes, to geological, hydrological and ecological research; and also to construction planning and landscape design. Methods were tested in agro-landscapes of Europe, Asia and America.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: агроландшафт, метод, геофизика, удельное электрическое сопротивление, картирование почв, Евразия

Keywords: agro-landscape, method, geophysics, electrical resistivity, soil mapping, Eurasia

ВВЕДЕНИЕ

Преыдущими нашими исследованиями было установлено, что почвы не только аридных, но и гумидных территорий различаются по величинам удельного электрического сопротивления [1, 2, 3]. Причина формирования этих различий заключается в том, что под действием почвообразовательных процессов в них создается различная плотность (концентрация) подвижных электрических зарядов (катионов ЕКО и почвенного раствора). Сопротивление, таким образом, связано с широким комплексом свойств почв и является их интегральным показателем.

Процессы выщелачивания – оподзоливание, лессиваж, рассоление, осолодение и другие аналогичные процессы, увеличивая долю первичных, устойчивых минералов крупных фракций, снижают плотности подвижных электрических зарядов и увеличивают сопротивление почвы. Процессы гумусонакопления, оглеения, торфонакопления, окультуривания и другие подобные увеличивают плотность подвижных электрических зарядов и тем самым снижают его.

Таким образом, для дифференциации почв, различающихся характером либо степенью выраженности процессов почвообразования, а следовательно – свойствами и таксономическим положением – могут быть эффективно использованы электрофизические методы.

Набор электрофизического инструментария уже сейчас не мал и приносит большую пользу при точном земледелии. Но особенно важно, что электрические параметры могут быть измерены дистанционно, очень быстро и с минимальными затратами труда.

ЦЕЛЬ МЕТОДОВ

Электрофизические методы ГЭП (горизонтальное электропрофилирование) и ВЭЗ (вертикальное электрическое зондирование) должны облегчить процессы обследования и картирования различных ландшафтов. Для этих целей используются различные приборы. Наиболее удобным является портативный прибор LandMapper. Прибор разработан российскими учеными при поддержке американской компании Landviser LLC [4, 5, 6], и производится в России с 2003 года (ИП Гео-Про). Используя эти методы до отбора проб почвы можно значительно уменьшить количество необходимых образцов и точно разработать план картирования и мониторинга на основе пространственной изменчивости исследуемого участка.

ПРИНЦИП И ПРОЦЕДУРА

В основе методов ГЭП и ВЭЗ лежит измерение удельного электрического сопротивления прямолинейной симметричной четырехэлектродной установкой электродов AMNB (рисунок 1А). На электроды АВ подают ток произвольной величины (I). На электродах MN измеряют сформировавшуюся разность потенциалов (U). Электрическое сопротивление рассчитывают по формуле: $E_R = K \cdot (U/I)$, где K – коэффициент установки AMNB. $K = AM \cdot AN / MN$ (м).

Измерения проводим с помощью прибора LandMapper (рисунок 1Б). Прибор исключительно прост в эксплуатации. Электродная установка с четырьмя электродами легко заземляется на поверхности почвы, после нажатия кнопки через 4 секунды значение электрического сопротивления считывается с цифрового дисплея. Прибор измеряет электрическое сопротивление в слое почвы глубиной от 2 см до 50 м, которая устанавливается путем увеличения размера четырех-электродной установки. Измерения основаны на хорошо известном принципе "4-электрода", что позволяет избежать влияния разности потенциалов на контакте измерительных электродов и получить точные значения удельного электрического сопротивления в любой среде с сопротивлением от 0.01 Ом м до 1.5 Мега Ом м.

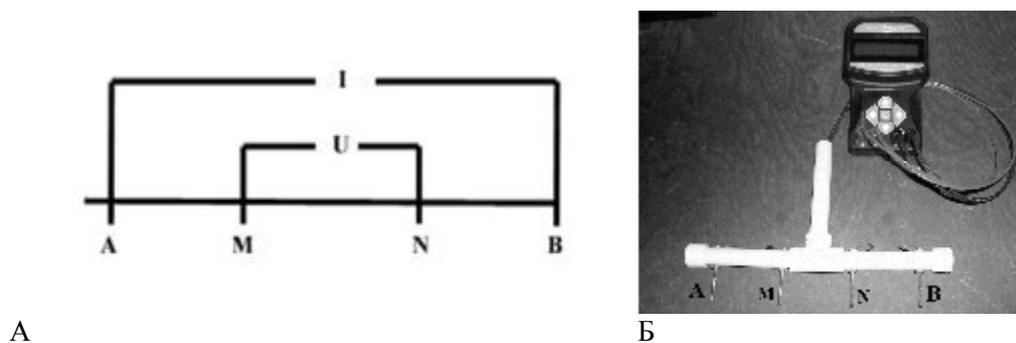


Рисунок 1 – Схема измерений удельного электрического сопротивления (А). Прибор и установка для измерений при горизонтальном электропрофилировании (Б).

Используя раму с фиксированным расстоянием между электродами, можно довольно быстро составить карту удельного электрического сопротивления на нужной нам глубине (метод ГЭП).

Наоборот, оставаясь на одной точке и постепенно увеличивая расстояние между электродами, можно "заглянуть" глубоко в почвенную толщу, изучить ее профиль, не закладывая разреза (рисунок 2). Это метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

Полуразносы электродов MN выбираются так, чтобы они размещались в средней трети соответствующих межэлектродных расстояний АВ.

Графики зависимостей электрического сопротивления от полуразноса АВ/2 называются кривыми ВЭЗ или функцией зависимости кажущегося сопротивления от полуразноса АВ/2 (рисунок 2Б). В этих кривых заключена информация об изменении сопротивления с глубиной, но не напрямую, а

через посредство разносов электродов на поверхности почвы. Понятно, что глубина измерения сопротивления сложным образом зависит от самого сопротивления и структуры почвенного профиля.

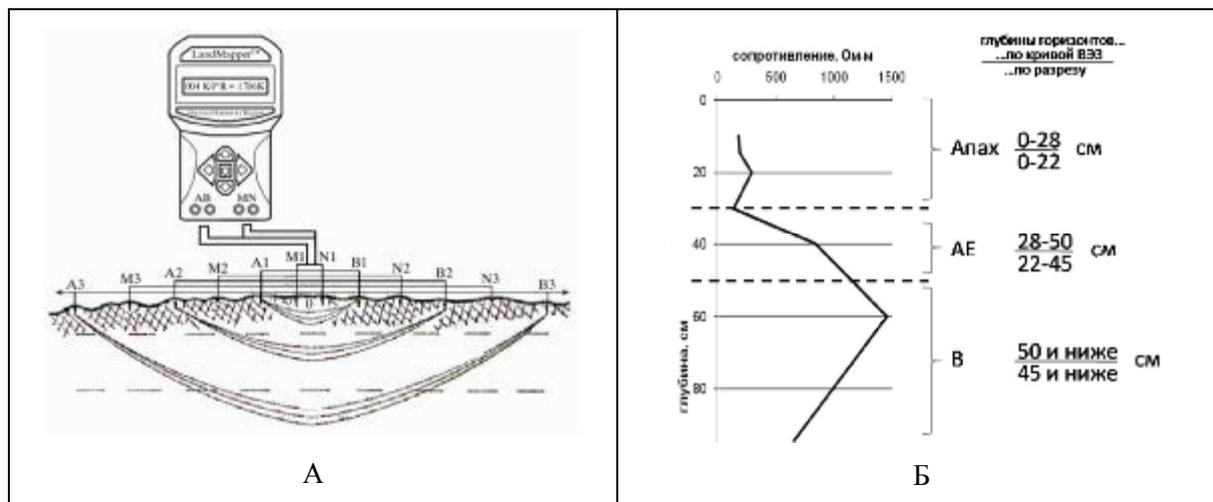


Рисунок 2 – Схема измерений в методе ВЭЗ (А), кривая ВЭЗ и результат ее интерпретации (Б)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полевые испытания прибора и методов электрофизики были выполнены нами и другими исследователями в России, Украине, Казахстане, Азербайджане, Китае, США, Канаде, и многих других странах.

На территории Евразии метод был протестирован на почвах сельхозугодий в различных природно-климатических условиях. Методы полевой электрофизики широко применяли для решения многих задач, сопутствующих мелиорации и экологическому мониторингу. На основе ГЭП и ВЭЗ проводили картирование исследуемых территорий на заданной глубине, не нарушая почвенный покров. Полученные карты-схемы для ряда торфяных массивов в Карелии и Центрального Нечерноземья, скелетных, песчаных, засоленных и других почв не только упростили и ускорили картирование, но дали также дополнительную информацию, позволившую объективно выбрать точки бурения скважин, места закладки почвенных разрезов, всевозможных мониторинговых наблюдений и т.п.

Метод ВЭЗ позволяет определять мощности горизонтов и слоев самого разного генезиса и состава, в самых разных почвах. Успех здесь во многом обусловлен различием в величинах электрических параметров. Ошибки таких подразделений слоев и горизонтов не превышали 6,2-11,5% [3].

Накоплен также опыт использования методов полевой электрофизики для изучения, оценки и идентификации гидрологической обстановки мелиорированных или подлежащих мелиорации торфяных почв. В аридной зоне аналогичные работы проведены на засоленных почвах дельты Волги и при изучении подтопления г. Астрахани.

Метод ВЭЗ позволяет также оценивать степень окультуренности торфов при формировании из них торфяных почв, определять глубины окультуренных горизонтов дерново-подзолистых почв, некоторые их особенности и ряд физических и химических свойств. Точность этих оценок относительно высока (не менее 10-15%) и вполне достаточна для практических целей.

Определение глубины иссушения торфяных почв методом ВЭЗ, проведенное в сухой вегетационный период 1995 года, показало возможность ее оценки с точностью до 7-9% этим методом. Попытки оценки глубины залегания грунтовых вод на торфяниках гумидной зоны не увенчались успехом, так как эпюра распределения влажности в торфяных почвах гумидной зоны не определяется положением грунтовой воды, к тому же достаточно большая (40-60 см.) капиллярная кайма сводит на нет такие попытки. Успешное применение методов полевой электрофизики с целью определения уровня грунтовых вод оказалось возможным лишь в аридных регионах.

Наблюдения за влажностью, при достаточной иссушенности торфяных почв в зоне действия закрытых дренажных систем, позволили также установить возможность вычленения различий в

картинах распределения влажности в зоне действия дрен различного устройства и их работоспособность, методами полевой электрофизики.

Метод ВЭЗ позволяет также оценить глубину, динамику и неоднородность промерзания и оттаивания торфяников и торфяных почв при постоянном размещении установки зондирования под снежным покровом, а также обнаруживать линзы остаточного промерзания после весеннего оттаивания и, тем самым, идентифицировать причину заболачивания блюдцеобразных понижений.

Особые успехи этих методов видятся при мониторинговых наблюдениях, т.к. позволяют проводить измерения без нарушения почв в точках наблюдений бесконечно длительное время. Поэтому представляется целесообразным дальнейшие исследования сосредоточить и в этом направлении.

ВЫВОДЫ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДОВ

Электрофизические методы применимы для экспрессного полевого картирования и мониторинга сельскохозяйственных угодий, геологических, гидрологических и экологических изысканий; а также строительства и ландшафтного дизайна. Прибор LandMapper является универсальным инструментом измерения электрического сопротивления или электропроводности почв. Он портативен, система работы довольно проста. Применяя различные установки электродов можно использовать его и в полевых и лабораторных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы ГЭП и ВЭЗ – это простые, реальные и проверенные методы оценки качества почв для любых ландшафтов.

Особые успехи этих методов видятся при мониторинговых наблюдениях, т.к. позволяют проводить измерения без нарушения почв в точках наблюдений бесконечно длительное время.

Методы полезны для оценки и картографирования почв.

Рекомендуется использовать методы электрофизики в комбинации с традиционными методами обследования почв.

ЛИТЕРАТУРА

[1]Поздняков А.И., Позднякова Л.А., Позднякова А.Д. Стационарные электрические поля в почвах. – М.: КМК Scientific Press Ltd, 1996. - 358 с.

[2]Поздняков А.И. Полевая электрофизика почв. – М.: МАИК «Наука/интерпериодика», 2001. – 187 с.

[3]Поздняков А.И., Ковалев Н.Г. Позднякова А.Д. Электрофизика в почвоведении, мелиорации, земледелии. Москва-Тверь: Изд-во «ЧуДо», 2002. - 280 с.

[4]Larisa Golovko, Anatoly Pozdnyakov, and Antonina Pozdnyakova. LandMapper ERM-02: Handheld Meter for Near-Surface Electrical Geophysical Surveys// J. FastTIMES (EEGS). – 2010. –Vol.15, Issue 4 - Agriculture: A Budding Field in Geophysics. – p.85 – 93

[5]<http://www.landviser.net/>

[6]Loke, M.H., J.E. Chambers, and O. Kuras. “Instrumentation, electrical resistivity.” In *Solid Earth Geophysics Encyclopedia (2nd Edition), Electrical & Electromagnetic*, Gupta, Harsh (ed) - Berlin: Springer, 2011. – pp 599–604. <http://www.landviser.net/content/landmapper-featured-encyclopedia-solid-earth-geophysics>.

Chapter III/39: FAST RESPONSE ANEMOMETERS AND ITS APPLICATION FROM THE VOLGA STEPPE REGION TO EASTERN SIBERIA

Глава III/39: Быстродействующие анемометры и их применение на территории от приволжских степей до Восточной Сибири

Thomas Foken*¹; Mikhail Strunin²; Mathias Göckede³

DOI 10.25680/5411.2018.19.77.232

*Email: foken@micrometeorology.de

1.University of Bayreuth, Bayreuth Center of Ecology and Environmental Research (BayCEER), D-95440 Bayreuth, Germany

2.Federal State Budgetary Institute “Central aerological observatory” of ROSHYDROMET (FSBI “CAO”), Pervomayskaya Str., 3, 141700, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

3.Max Planck Institute for Biogeochemistry, Hans-Knöll-Straße 10, D-07745 Jena, Germany

ABSTRACT. The eddy-covariance method is a tool that uses the high-frequency turbulent fluctuations within the atmosphere to determine energy and matter turbulent fluxes of different substances between the atmosphere and the underlying surface. The most important device is the sonic anemometer to measure the fluctuations of the three component wind vectors, with the first instruments developed in the 1960s in Moscow and tested in the Volga steppe region. This paper presents a general overview on ground-based sonic anemometers and Pitot tube meters for aircrafts with high response times. In this context, we evaluate methane fluxes in the Siberian permafrost area and aircraft measurements in the Lena region. Our approaches allow a spatial-frequency analysis of turbulent structures from the smallest scales to the mesoscale.

Резюме. Метод вихревой ковариации основывается на высокочастотных измерениях турбулентных пульсаций в атмосфере и применяется для изучения энергетики и природы турбулентных потоков различных субстанций между атмосферой и ниже лежащей поверхностью. Одним из наиболее важных инструментов для измерения пульсаций трех компонент вектора ветра является ультразвуковой анемометр, разработанный в 1960-х годах в Москве и испытанный в степях Волжского региона. Настоящая статья посвящена общему обзору высокочастотных звуковых анемометров для наземных измерений и быстродействующих авиационных измерителей, основанных на трубке Пито. В качестве примера представлены потоки метана, в зоне вечной мерзлоты Сибири и авиационных наблюдений в районе реки Лена. Наши подходы позволяют проводить пространственно-частотный анализ турбулентных структур от наименьших масштабов до мезомасштабов.

KEYWORDS: eddy-covariance method, sonic anemometer, methane fluxes, aircraft measurements, Volga steppe region, Chersky, Lena River

Ключевые слова: вихревой ковариационный метод, ультразвуковой анемометр, потоки метана, авиационные наблюдения, приволжский степной регион, Черский, река Лена

INTRODUCTION

The eddy covariance method [1] is nowadays a widely used observational approach for determining fluxes of energy and matter between the surface and atmosphere, with applications not only in meteorology but also in ecology and applied sciences. The first instrumentation devices that facilitated a practical realization of eddy-covariance were developed in Moscow and tested in the Volga steppe region. The presented paper gives an overview of the development of the fast response wind measurements from its early stages nearly 60 years ago to the present. The fluctuation of the vertical and horizontal wind components, together with the fluctuations of the temperature and trace gases, must be measured with a frequency of 10-20 Hz. These high sampling frequencies and the associated storage of the large amount of data were a major obstacle in the early years of application, but due to advances in the development of electronic components even higher measurement frequencies can now be realized.

THE SONIC ANEMOMETER

The most important instrument for the eddy-covariance method is the sonic anemometer. Still, after the presentation of the theoretical foundations, more than ten years of research were required until the first design of today's anemometers was finalized by Bovscheverov and Voronov [2], and only some years

later similar instruments were developed in the USA [3] and Japan. A crucial step towards the general applicability of these new instruments was the organization of sonic anemometer inter-comparison experiments, with one of the first being performed in the Volga steppe region near Tsymlyansk[4].

The first sonic anemometers used the phase shift method [2,3, Figure 1]. In this method, the ultrasonic signal emitted by the transmitter is received at several points, and wind velocities can be derived as a function of the phase difference between the transmitted and received signals. Modern sonic anemometers use the travel time principle and a direct time determination [5]. In this method, a sonic signal is transmitted from both sides of a measurement path and received on the opposite sides. Since the propagation of these signals is influenced by the wind velocity, one signal is faster than the other. The exact travel times of the sonic signals are subsequently used for the determination of the wind velocity:

$$t_{1,2} = \frac{\sqrt{c^2 - u_n^2} \pm u_d}{c^2 - u^2} d \quad (1)$$

where d is the path length, u_d is the wind component along the path, u_n is the normal component of the wind, and c is the sound velocity.

The difference of the reciprocal travel times gives the wind velocity, and the sum of the reciprocal travel times can be used to derive the sound velocity:

$$\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2}{d} u_d \quad (2)$$

$$\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} = \frac{2}{d} c \sqrt{1 - \frac{u_n^2}{c^2}} \gg \frac{2}{d} c \quad (3)$$

The sound velocity is a function of temperature and moisture

$$c^2 = 403T \frac{\partial \rho}{\partial T} + 0.32 \frac{e}{p} \frac{\partial \rho}{\partial e} \quad (4)$$

using the partial pressure of water vapor e and the air pressure p . The product of the temperature T and the moisture dependent term is called the sonic temperature and the flux that can be calculated based on the sonic temperature is the buoyancy flux, which can be transformed with the moisture flux into the sensible heat flux.

MEASUREMENT OF METHANE FLUXES OVER THE SIBIRIAN PERMAFROST REGION: PITOT-TUBE ANEMOMETER ON AIRCRAFTS

Aircraft measurements allow the application of the eddy covariance method, but instead of a sonic anemometer a multi-channel Pitot-tube and a hot-wire thermometer are used, and instead of a time series a spatial series is measured. The Russian ILYUSHIN-18D (IL-18D) is an aircraft-laboratory [7] carrying special instruments designed to measure atmospheric variables at a very high frequency during field campaigns. A gust-probe system measured the wind speed, wind direction and air temperature (see Figure 2). Turbulence measurements included horizontal (longitudinal with respect to flight direction) wind speed fluctuations, vertical wind speed fluctuations, air temperature fluctuations, and absolute air humidity fluctuations.

A high-response pressure sensor, connected to a Pitot pressure probe and static pressure holes, measured dynamic pressure. A barometer, connected to the static pressure holes of the aircraft pressure system, measured static pressure. A fast-response platinum wire thermometer, specifically designed for aircraft conditions, measured the temperature. The angle of attack was based on measured pressure differences in the holes of a spherical probe. Gyros measured variations in pitch angle, and a stable accelerometer measured variations in aircraft vertical acceleration. Doppler radar measured the horizontal components of the aircraft's ground speed; and the vertical component of the aircraft's ground speed fluctuations were calculated using the well-known gas-dynamics and dynamics equations [8]. As an example, the aircraft laboratory was deployed to conduct flux measurements along flight paths over non-homogeneous terrain in the vicinity of Yakutsk in eastern Siberia.



Figure 1 – Russian phase shift anemometer during the experiment ITCE-81 [6] at the Tsymlyansk research area (left) together with the Japanese Kaijo-Denki sonic anemometer PAT 300, working with the travel time principle (Photograph: Foken)

SURFACE FLUXES

Permafrost soils in northern high latitudes are characterized by enormous carbon stocks that are estimated to contain about 50 percent of the global below-ground carbon reservoir. With about two thirds of the Arctic being classified as wetlands, the prevalence of inundated conditions also implies that permafrost regions hold the potential to become substantial future sources of methane. This very complex region is therefore the subject of many scientific investigations. The example presented in this chapter is focused on the Chersky region in North-East Siberia [10]. In the study area, two eddy-covariance measuring complexes were installed with a sonic anemometer and a closed path gas analyzer to measure water, methane, and carbon dioxide fluxes (Figure 3).

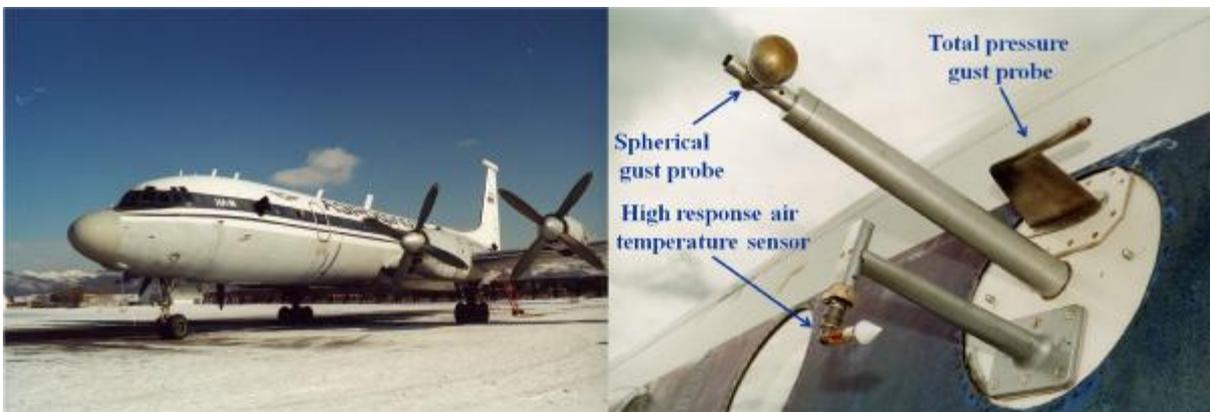


Figure 2 – Aircraft-laboratory Il-18D (left) and aircraft sensors (right) used for eddy-covariance measurements [9]



Figure 3 – Eddy-covariance towers at the Chersky research site (Photograph: Göckede). The system consists of a heated sonic anemometer (METEK USA1), an open-path gas analyzer for CO₂/H₂O (LiCor 7500, only right picture), and the inlet line for a closed-path gas analyzer for CH₄/CO₂/H₂O (Los Gatos FGGA).

CONCLUSIONS

1. Following the development of the modern sonic anemometer in Russia, since the 1960s it has facilitated the determination of direct observations of energy and matter exchange processes between surface and atmosphere, being the core instrument for the so-called eddy-covariance method.
2. The development of sonic and Pitot-type anemometers was essential for the application of the method for surface and aircraft based measurements. As shown in our examples, such measurements may significantly contribute to determine methane fluxes in the Siberian permafrost region and therefore the reduction of uncertainties regarding the role of these systems in the context of global climate change.
3. The application for aircraft measurements allows a spatial-frequency analysis of turbulent structures from the smallest scales to the mesoscale.

REFERENCES

- [1] Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D. (Eds) 2012. Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer.
- [2] Бовшеверов В.М., Воронов В.П. 1960. Акустический флюгер. Известия АН СССР, сер. Геофизика: 882-885.
- [3] Kaimal, J. C., Businger, J. A. 1963. A continuous wave sonic anemometer-thermometer. Journal of Climate and Applied Meteorology 2: 156-164.
- [4] Tsvang, L. R., Kaprov, B. M., Zubkovskij, S. L., Dyer, A. J., Hicks, B. B., Miyake, M., Stewart, R. W., McDonald, J. W. 1973. Comparison of turbulence measurements by different instruments; Tsimlyansk field experiment 1970. Boundary-Layer Meteorology 3: 499-521.
- [5] Hanafusa, T., Fujitana, T., Kobori, Y., Mitsuta, Y. 1982). A new type sonic anemometer-thermometer for field operation. Papers in Meteorology and Geophysics 33: 1-19.
- [6] Tsvang, L. R., Zubkovskij, S. L., Kader, B. A., Kallistratova, M. A., Foken, T., Gerstmann, W., Przandka, Z., Pretel, J., Zelený, J., Keder, J. 1985. International turbulence comparison experiment (ITCE-81). Boundary-Layer Meteorology 31: 325-348.

- [7]Strunin M.A., Hiyama T., Asanuma J., Ohata T. 2004. Aircraft observations of the development of thermal internal boundary layers and scaling of the convective boundary layer over non-homogeneous land surfaces. *Boundary-Layer Meteorol.* 111: 491 - 522.
- [8]Lenschow, D.H. 1972. The Measurements of Air Velocity and Temperature Using the NCAR Buffalo Aircraft Measuring System. Technical Note TN/STR-74, NCAR, Boulder, CO: 39 pp.
- [9]Струнин М.А. 2008. Развитие прерывистого конвективного пограничного слоя атмосферы над поверхностью с перемежающимися термическими свойствами, приводящее к образованию облаков кучевых форм. М. Изд. Метеорология и Гидрология. Сб. Вопросы физики облаков памяти С.М. Шметера: 362 – 391.
- [10]Kittler, F., Burjack, I., Corradi, C. A. R., Heimann, M., Kolle, O., Merbold, L., Zimov, N., Zimov, S., Göckede, M. 2016. Impacts of a decadal drainage disturbance on surface-atmosphere fluxes of carbon dioxide in a permafrost ecosystem. *Biogeosciences* 13: 5315-5332.

Chapter III/40: SOIL MAPPING WITH *GEOPHILUS ELECTRICUS*
Глава III/40: Картирование почв с помощью *GEOPHILUS ELECTRICUS*

Erika Lück*¹, Julien Guillemoteau¹, Jens Tronicke¹, Jörg Rühlmann²

DOI 10.25680/6174.2018.56.55.233

*Email: elueck@geo.uni-potsdam.de

1.University of Potsdam, Institute of Earth and Environmental Science, Karl-Liebknecht-Str. 24, 14476 Golm/Potsdam

2.Leibniz-Institute of Vegetable and Ornamental Crops, Theodor-Echtermeyer-Weg 1, 14979 Großbeeren

ABSTRACT. Near-surface geophysical techniques such as the developed *Geophilus Electricus* system have the potential to map important soil parameters. The Geophilus sensor uses an equatorial dipole-dipole array of rolling electrodes and allows for measuring the apparent electrical resistivity at five depth levels. Therefore, in addition to conductivity maps illustrating lateral variations of apparent conductivity, sounding curves are available at each measurement point. These contain information about vertical changes in electrical conductivity up to a depth of about 1.5 m. Using an appropriate inversion procedure, allows us to transform the measured data into resistivity-depth-functions. However, due to the complex parameter relationships usually observed between electrical conductivity and different soil properties, we typically can not translate our geophysical result into a single soil attribute like soil moisture or clay content. To overcome some of such limitations in interpretation, we combine our electrical data with measurements of the natural gamma radiation, which may be a good indicator for soil clay content.

Резюме. Приповерхностные геофизические методы, такие как разработанная система Geophilus Electricus, могут отображать важные параметры почвы. Датчик *Geophilus* использует экваториальную диполь-дипольную решетку прокатных электродов и позволяет измерять кажущееся электрическое сопротивление на пяти уровнях глубины. Поэтому в дополнение к картам проводимости, иллюстрирующим боковые вариации кажущейся проводимости, кривые зондирования доступны в каждой точке измерения. Они содержат информацию о вертикальных изменениях электропроводности на глубине около 1,5 м. Используя соответствующую процедуру инверсии, мы можем преобразовать измеренные данные в функции глубины удельного сопротивления. Однако из-за сложных отношений параметров, которые обычно наблюдаются между электропроводностью и различными свойствами почвы, мы, как правило, не можем перевести наш геофизический результат в единую почвенную характеристику, такую как влажность почвы или содержание глины. Чтобы преодолеть некоторые из таких ограничений в интерпретации, мы объединяем наши электрические данные с измерениями естественного гамма-излучения, что может быть хорошим показателем содержания глины в почве.

KEYWORDS: digital soil mapping, large scale, precision farming, electrical resistivity, electrical conductivity, soil heterogeneity, soil stratification, data inversion

Ключевые слова: цифровое картирование почв, крупный масштаб, точное земледелие, электрическое сопротивление, электрическая проводимость, неоднородность почвы, стратификация почвы, инверсия данных

INTRODUCTION

Soil plays a central role in landscape modeling because of its multifunctional properties. Since traditional soil mapping cannot satisfy the obvious need for high-resolution and accurate soil maps, proximal soil sensing is used as an effective approach for measuring soil properties [14]. Among all techniques, electrical conductivity (EC) and resistivity mapping are well established geophysical methods having the potential to provide information about important soil properties. The most promising and popular techniques are frequency domain electromagnetics and direct current (DC) electrical methods [3, 1]. Because the parameter of EC is better known in soil sciences, measured resistivities are often converted into EC data. Although conductivity readings are affected by soil stratification, so far farmers do not consider this information about layering. Conductivity mapping can, for example, be applied for prediction of soil salinity [7], in environmental geophysics, for archaeological prospecting and in precision agriculture [1]. Additionally, multi-sensor-platforms are used to reduce the ambiguity in the interpretation of EC data. For example, collocated data of EC and gamma measurements might help to distinguish whether high conductivity values are caused by clay or by peat.

ELECTRICAL CONDUCTIVITY MAPPING ON FARMLAND

In precision farming, maps of apparent electrical conductivity (ECa) are used for studying the in-field heterogeneity, for delineating management zones and for guiding direct soil sampling. In combination with a site specific calibration, electrical conductivity can also be used as a proxy for many other soil properties. Owing to the often observed stability of the conductivity patterns [2, 9, 12], a single mapping is sufficient. From their studies, Vitharana et al. [15] and Van Meirvenne et al. [11] concluded that electrical conductivity is one of the key properties in precision agriculture. Although, soil electrical conductivity might be indicative for many soil properties affecting yield, there is often no direct correlation observed.

THE GEOPHILUS SYSTEM

Geophilus Electricus is a soil mapping system which has been developed within different projects over the past years in cooperation between the University of Potsdam and the Leibniz-Institute of Vegetable and Ornamental Crops [8]. Working with the first multi-receiver dipole prototype configuration, data are generated with the SIP Rabbit system (SIP – spectral induced polarization) developed by Radic Research (Germany) [6] in combination with a laptop and a GPS receiver for positioning. Its design and technical specifications allow for measuring apparent complex electrical resistivity data at different depth levels up to about 1.5 m using an array of galvanic coupled electrodes. A Geophilus sounding is composed of five equatorial dipole-dipole measurements with a constant dipole length of $a = 1$ m and a varying offset b between the source dipole and the receiver dipoles (Figure 1). The Geophilus measurement system will be continuously developed. So, the current rolling electrode system was enlarged by a sixth receiver dipole and the presently used electronic unit (Delphin Technology) optimizes the voltage input automatically.

The electrical measurements of the Geophilus were recently combined with a gamma probe built by the company BLM Storkow (Germany). This gamma sensor consists of polystyrene and measures total counts of natural gamma radiation [10]. Because of its relative large volume of about 10 liters, the sensor can scan relatively quickly the gamma activity in mobile mode.

INFORMATION ABOUT SOIL STRATIFICATION

The depth of investigation depends on the used electrode configuration [13, 4]. By using multi-array systems with several electrode configurations, it is possible to measure simultaneously the ECa data for more than one depth level. Therefore, at each position a dataset known as a vertical electrical sounding (VES) can be recorded. Such data can be interpreted as a sounding curve (ECa as a function of the spacing between the electrodes) or after inversion as a resistivity-depth-function. We have developed an algorithm which performs the one-dimensional inversion of large multi-offset equatorial dipole-dipole data sets [5] as recorded with the Geophilus system. This efficient one-dimensional inversion approach allows us to

put special attention on modeling the effects of noise of mobile electrodes, which are much stronger than for data collected with fixed electrodes.

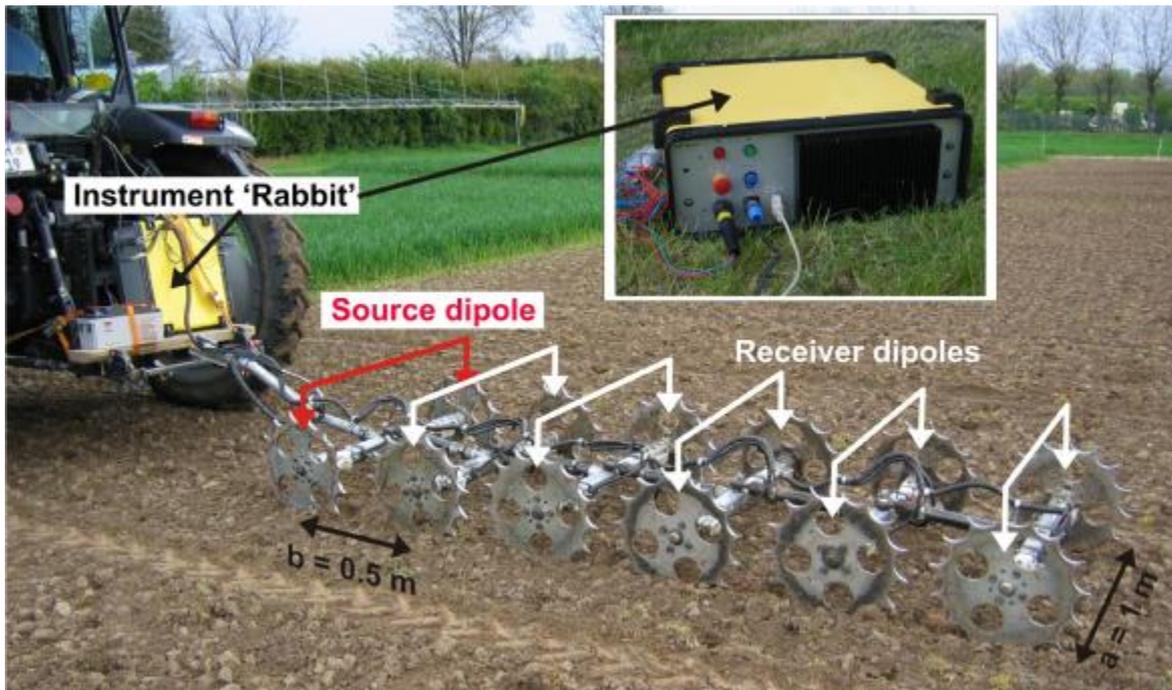


Figure 1 – Geophilus – a kinematic DC (direct current) system to map complex resistivity with an equatorial dipole-dipole array. Distances between source dipole and receiver dipoles increase stepwise from 0.5 m to 2.5 m.

FIELD DATA EXAMPLE

In the past, the applicability of the Geophilus system has been demonstrated at several sites on soils with various electrical characteristics (E_{Ca} ranging from 0.3 up to 150 mS/m). Here we present one typical data set collected on an 18 ha field in the south of Berlin where a transition zone between peat and sand is present. The thickness of the peat layer varies between 10 cm and about 1 m. Instead of the GPS receiver, a tachymeter was used for positioning. Therefore, a precise elevation model could be determined in addition to the geophysical data. The test site is a flat area with elevation differences of a maximum of 1 m. Figure 2 shows all measured raw data. The correlation between topography and soil properties is obvious. The lowland is a high conductive area with low gamma activity caused by peat. Because of the good resolution, small linear sand ribs are visible in all top soil data. To illustrate also the vertical tendency of E_{Ca} (i.e., soil layering), all E_{Ca} maps are with the same color scale. While shown channel 1 is mostly influenced by the top layer, the E_{Ca} values of channel 5 are also affected by the subsoil.

Especially for the peat regions, the E_{Ca} maps indicate a decrease of conductivity with depth, which is caused by the sand layer underlying the peat. We have inverted the data to study the stratigraphy more precisely. In Figure 3, we present two of the conductivity depth models that reflect the stratification of the test site. While the eastern part of the field can be characterized by a high conductive upper layer, the western part has a low conductive top layer. This corresponds well with the soil probing.

CONCLUSIONS

1. We developed a mobile system for mapping the electrical resistivity/conductivity within several depth levels.
2. The data deliver not only information about the lateral but also about the vertical changes of electrical properties.
3. An algorithm was developed to perform the one-dimensional inversion of large multi-offset equatorial dipole-dipole data sets.
4. A gamma sensor provides complementary data for digital soil mapping.

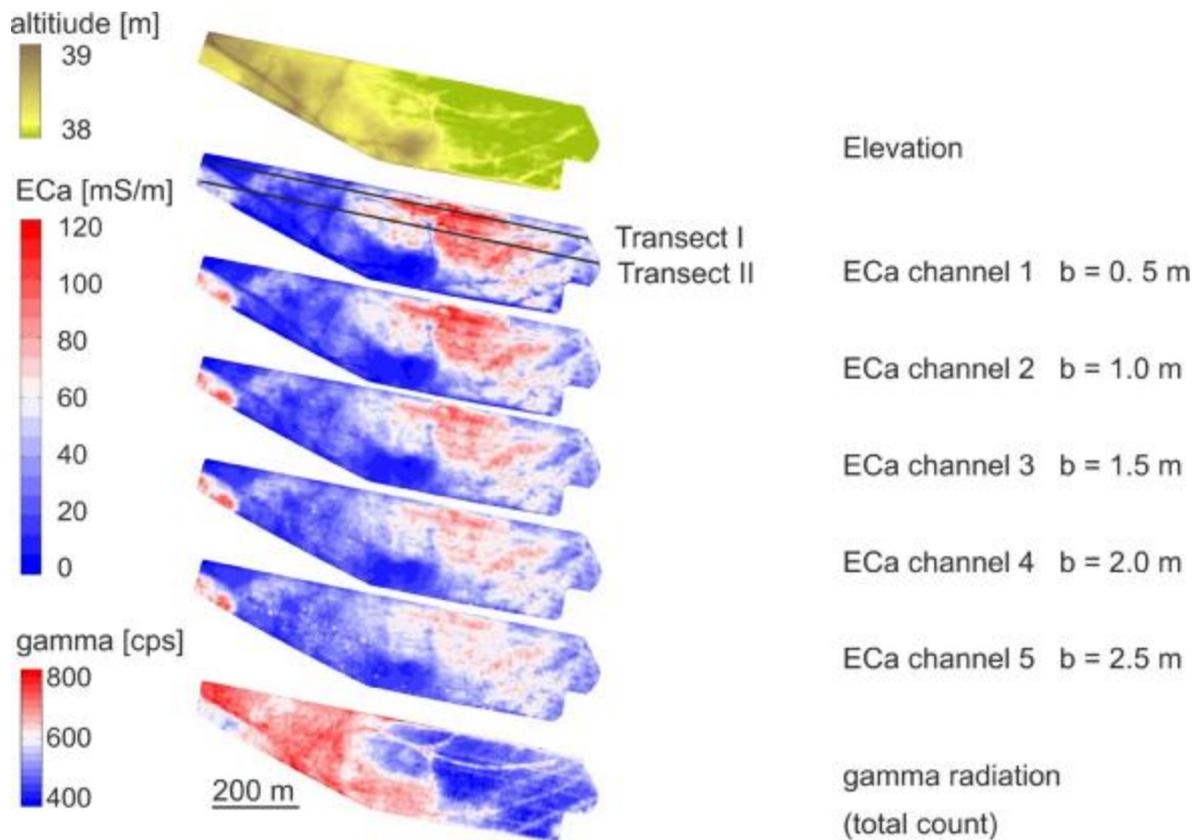


Figure 2 – Typical dataset for a Geophylus measurement consisting of an elevation map, five ECa - maps corresponding to the 5 receiver dipoles and the map of the total count of gamma radiation. I and II indicate the position of two transect for which conductivity depth models are shown in Fig. 3

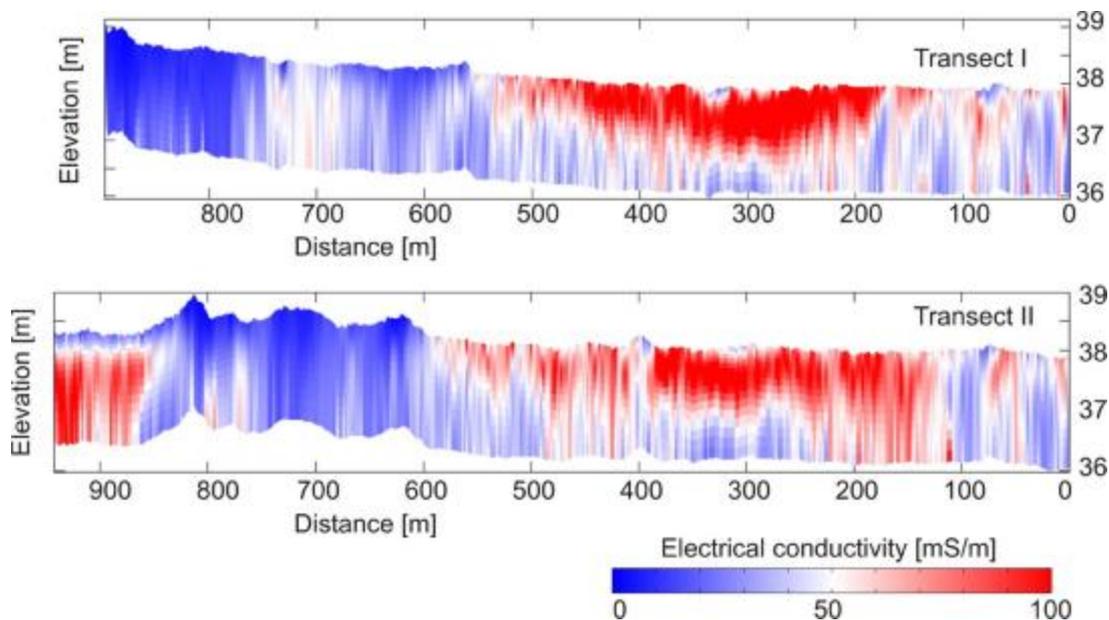


Figure 3 – Conductivity depth models for the transects I and II, the position of which is given in Fig. 2. Note that different scales have been used for distance and elevation.

REFERENCES

- [1]Corwin, D.L., Lesch, S.M. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 46, 11-43.

- [2]De Caires, S.A., Wuddivira, M.N., Bekele, I. 2014. Assessing the temporal stability of spatial patterns of soil apparent electrical conductivity using geophysical methods. *International Agrophysics*, 28, 423-433.
- [3]Doolittle, J.A., Brevik E.C. 2014. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma* 223-225, 33-45.
- [4]Gebbers, R., Lück, E., Dabas, M. Domsch, H. 2009. Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale. *Near Surface Geophysics*, 179-190.
- [5]Guillemoteau, J., Lück, E., Tronicke, J. 2017. 1D inversion of direct current data acquired with a rolling electrode system. *Journal of Applied Geophysics*, 146, 167-177.
- [6]http://www.radic-research.de/Flyer_Rabbit_171114.pdf
- [7]Lesch, S.M., Strauss, D.J., Rhoades J.D. 1995. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques – 2. An efficient spatial sampling algorithm suitable for multiple linear regression model identification and estimation. *Water resources research*, 31,387 – 398.
- [8]Lück, E., Rühlmann, J. 2013. Resistivity mapping with GEOPHILUS ELECTRICUS – Information about lateral and vertical soil heterogeneity. *Geoderma*, 199, 2-11.
- [9]Lück, E., Gebbers, R., Rühlmann, J., Spangenberg, U. 2009. Electrical conductivity mapping for precision farming. *Near Surface Geophysics*, 7, 15-25.
- [10]Lück, E., Dierke, C., Werban, U., Wunderlich, T., Al Hagrey, S.A., Petersen, H., Loonstra, E., Rühlmann, J. 2013. Comparison of mobile multi-sensor platforms at the test-site Rosslau in Germany. In: Gebbers, R., Lück, E., Rühlmann, J. (eds.) *Proceedings of 3rd Global Workshop on Proximal Soil Sensing, 26.-29. May 2013, Potsdam, Germany*, Bornimer Agrartechnische Berichte 82. Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam-Bornim, 278 - 282
- [11]Van Meirvenne, M., Islam, M.M., De Smedt, P, Meerschman, E., Van De Vijver, E., Saey, T. 2013. Key variables for the identification of soil management classes in the aeolian landscapes of north-west Europe. *Geoderma*, 199, 99-105.
- [12]Pedrera-Parrilla A., Brevik, E.C., Giráldez, J.V., Vanderlinden, K. 2016. Temporal stability of electrical conductivity in a sandy soil. *International Agrophysics*, 30, 349-357
- [13]Roy, A., Apparao, A. 1971. Depth Of Investigation In Direct Current Methods. *Geophysics*, 36, 943-959.
- [14]Viscarra Rossel, R.A., Adamchuk, V.I., Sudduth, K.A., McKenzie, N.J., Lobsey, C. 2011. Proximal Soil Sensing: An Effective Approach for Soil Measurements in Space and Time. In Donald L. Sparks, editor: *Advances in Agronomy*, Vol. 113, Burlington: Academic Press, 2011, 237-282.
- [15]Vitharana, U.W.A., Van Meirvenne, M., Simpson, D., Cockx, L., De Baerdemaeker J. 2008. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. *Geoderma*, 143, 206-215.

Chapter III/41: HIGH RESOLUTION, ON-SITE MEASUREMENT OF SOIL SURFACE SHEAR STRENGTH AND ROUGHNESS WITH NEW 4S-DEVICE

Глава III/41: Измерение прочности и шероховатости почвы с высоким разрешением в поле с новым 4s-устройством

Raimund Schneider*¹; Sören Thiele-Bruhn¹; Christian Schwab²; Aaron Schardong¹; Kyra Nele Raugewitz¹; Mathias Jackel¹

DOI 10.25680/5398.2018.26.92.234

*Email: schneider@uni-trier.de

1.University of Trier, Department of Soil Science, 54286 Trier, Germany

2.University of Trier, Technical Department for Electronics, 54286 Trier, Germany

ABSTRACT. Soil surface shear strength and roughness are two important controlling factors for soil erosion processes [1, 2]. Soil aggregate destruction and erosion starts at the weakest point of the soil surface. This means that high resolution field data are needed for process understanding and modeling. Some methods are established for on-site measurement of soil roughness and only a few for on-site measurement of soil surface shear strength. Due to a lack of experimental in-situ data with high spatial resolution for soil surface shear strength a new field device was developed to measure soil surface shear strength and roughness simultaneously. The new multitool consists of three components: i) a cutting blade combined with force transducer for shear force measurement, ii) a laser for determination of soil surface roughness and cutting depth and iii) two cameras imaging the recorded data for analysis and discussion. Multiple tests in the laboratory and on-site under regular field conditions showed that the 4S-device reproducibly determines highly resolved data on spatial and temporal changes of physical and mechanical soil surface properties.

Резюме. Прочность и шероховатость поверхности почвы являются двумя важными определяющими факторами для процессов эрозии почв [1,2]. Уничтожение и эрозия почвенного агрегата начинается в самой слабой точке поверхности почвы. Это означает, что для понимания и моделирования процессов необходимы полевые данные высокого разрешения. Существует несколько методов для измерения шероховатости грунта в поле и совсем мало для измерения сопротивления поверхности почвы на сдвиг на месте. Из-за отсутствия экспериментальных данных in situ с высоким пространственным разрешением для сопротивления поверхности почвы на сдвиг было создано новое полевое устройство, которое разработано для одновременного измерения прочности и шероховатости поверхности почвы. Новый мультитинструмент состоит из трех компонентов: i) режущего лезвия в сочетании с силовым преобразователем для измерения поперечной силы; ii) лазера для определения шероховатости поверхности грунта и глубины резания; iii) двух камер, отображающих записанные данные для анализа и обсуждения. 4S-устройство воспроизводимо определяет данные высокого разрешения о пространственных и временных изменениях физических и механических свойств поверхности почвы.

KEYWORDS: soil surface shear strength, soil surface roughness, high resolution data, on-site measurement, new field device, soil erosion

Ключевые слова: сопротивления поверхности почвы на сдвиг, шероховатость поверхности грунта, данные с высоким разрешением, измерение на месте, новое полевое устройство, эрозия почвы

INTRODUCTION

Soil erosion is a global problem. For understanding and modeling erosion processes measured high resolution on-site data are most appropriate [3, 4, 5] because most influencing soil properties like soil surface shear strength and roughness are heterogeneous even on a small scale. Stochastic modeling of soil erosion is based on this type of data to calculate probability density functions of influencing soil parameters like soil surface shear strength and roughness [4, 5]. A couple of methods have been established for on-site measurement of soil roughness (6, 7, 8). But only a few methods are used for measurement of soil surface shear strength on-site like fall-cone penetrometer and vane tester [9, 1, 10] or in laboratory like “resin plate method” [11] or “sandpaper method” [12, 13]. With all this methods average values are measured based on a certain soil area and/or volume. But it is not possible to perform data of the needed type with high spatial resolution at the point scale. To fill this gap a new field device was developed to measure soil surface shear strength and roughness simultaneously with high spatial resolution. The name “4S-device”

refers to its primary use to measure the Soil Surface Shear Strength. The goal of the following remarks is to give a brief technical device description and to point out its potential to provide appropriate high resolution data.

AIM OF THE METHOD

A new on-site device was developed and tested to deliver exact in situ point data along a measuring line of about 1 m with high spatial resolution. Data should describe the variability/heterogeneity of soil surface shear strength and roughness simultaneously, thus enabling an improved identification of the influencing parameters and processes. Furthermore, data should be useful e.g. as stochastic input parameters for erosion modeling.

PRINCIPLE AND PROCEDURE

Principle: The idea for developing a new device is based on the idea of Sidorchuk [14] to determine the shear strength of a soil surface in the laboratory by cutting a disturbed soil sample with a narrow blade. He stated that “based on the principle that the resistivity to movement of a solid body through plastic media is controlled mainly by dry friction” [14]. The first application of this concept was to modify a standard box shear apparatus in the laboratory. The aim was to measure the surface shear force of a soil sample with a combination of a fixed blade and a sensitive force transducer at a defined speed and cutting depth to calculate the shear strength (relation of shear force and related contact blade area). Tests for taking and investigating disturbed and undisturbed soil samples with the new technology were successful. Based on these results the new 4S-device for on-site measurement of undisturbed soils under field conditions was developed (Fig. 1). The new field device should be able to collect data for cutting force (shear strength) and surface roughness with high spatiotemporal resolution simultaneously while running along a guide rail over a distance of about 1 m. Multiple calibration tests have been carried out in laboratory and field to control influencing factors such as blade type, cutting depth, running velocity, running direction (uphill/downhill), soil water content, bulk density and structure (disturbed or undisturbed soil, aggregate size).

Procedure: Technical information: The 4S-device (see Fig. 1) measures 133.5 cm x 33 cm x 20 cm (LxWxH). A stainless steel frame carries two guide rails (1) on which the measurement system (2), driven by a battery-powered (3) spindle drive (4), can be moved back and forth. The measuring system consists of one cutting blade (10, industrial tool steel, 2.5 cm cutting length), two cameras (6 - top view, 7 – lateral view), one force transducer (8, measuring range 10 μ N to 100 N) and a laser scanner (9). The measurement system can be adjusted upwards and downwards.

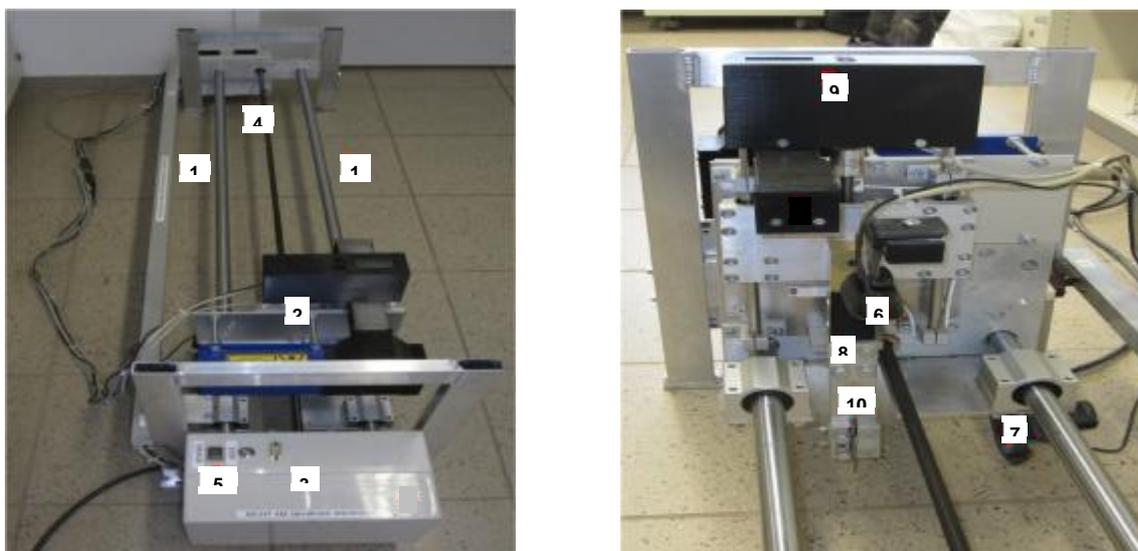


Figure 1 - 4S-Device: 1 guide rails, 2 measurement system, 3 power supply, 4 spindle drive, 5 start button, 6 camera for top view, 7 camera for lateral view, 8 force transducer, 9 laser scanner, 10 cutting blade

4S-device is controlled via new developed computer software, where advance rate (0.3 – 2.5 mm/s) and measurement interval for shear force transducer, laser and cameras (200, 500, 1000 ms) can be set. While the blade moves along the guide rails and cuts the soil's surface the force transducer records the shear force [N]. The laser scanner determines the surface roughness and by that simultaneously the cutting depth of the blade [mm] can be calculated. The two cameras take pictures of the front area of the cutting blade.

Field preparation: As far as possible, the measurement should be performed on an undisturbed soil surface with preferably sparse vegetation cover. Loose plant residuals and larger stones should be removed carefully from the soil surface of test area, without disturbing the soil surface too much. Plants can be cut down; larger roots should be left in the soil to maintain the surface structure.

TEST RESULTS

Test measurements based on the high resolution data showed a great spatial variability/heterogeneity of the soil surface shear strength even on the millimeter scale for example within and between different tillage systems. Other investigations based on sprinkling experiments also pointed out a clear small scale spatial and temporal change of shear strength and roughness at the soil surface.

During a measuring run different processes may proceed (Fig. 2): i) the soil surface or single soil aggregates are *cutted*, ii) aggregates, stones or other pieces are *pushed*, iii) thread-like structures like roots in the soil are *pulled*. The combination of force and laser measurement with the simultaneously taken pictures from front and side perspective enable to distinguish between this *cutting*, *pushing* and *pulling forces*. Examples: Figure 2.a1 (cutting process): A soil aggregate with stable position is cut. Force is increasing first up to a maximum value and then decreasing. Figure 2.a2 (cutting and/or pulling process): A flat, homogeneous soil surface is cut. Longer increase and decrease of force values is measured caused by a root or an aggregates below the surface. Figure 2.a3 (pushing process): An aggregate is detached and moved in front of the blade while interlocked several times by surrounding aggregates creating several force peaks of similar height. So the device enables to measure the maximum resisting forces of soil aggregates against displacement and vice versa thresholds for minimum pushing forces of water to move aggregates. Figure 2.a4 (cutting process): Although the cutting depth of the blade is large (about 2.5 cm) the force values are low because the soil is very loose in this area. In addition all on-site measurements revealed that the laser system is able to detect soil surface roughness on the mm-scale and to use this data for cutting depth recording as well as cutting depth correction related to the simultaneous determined shear force.

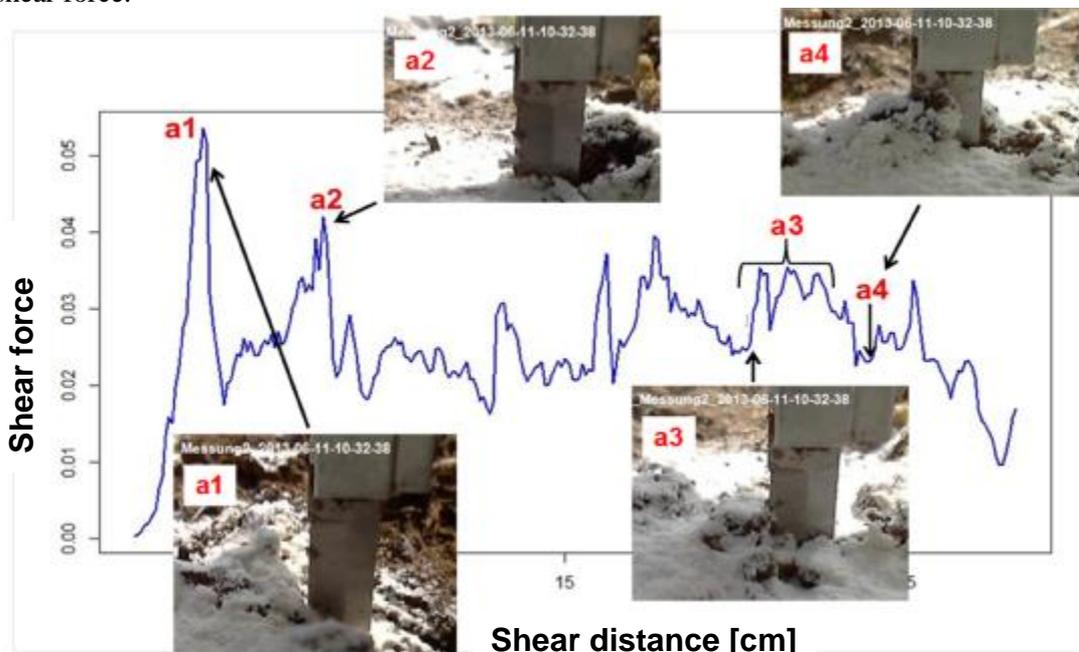


Figure 2 - Soil surface shear force of a sandy-silty fluvisol and related images for data and process understanding. (White color: powdered soil surface with flour for optimized laser reflexion, only for first device version)

APPLICATION

The applicability of the device in the field was tested in flat and sloped positions, on differently soils (Cambisol, Fluvisol, Stagnosol, stony vineyard soil), under different types of tillage (conventional & zero tillage), with and without irrigation. The results were reproducible and proved the suitability of the new 4S-device to measure soil surface shear resistance and surface roughness simultaneously under variable conditions in field and laboratory with high resolution.

CONCLUSIONS

1. The new 4S-Device enables to measure soil surface shear strength and soil roughness on-site under variable field conditions with high spatial and temporal resolution regarded to small scale (mm) soil variability/heterogeneity.
2. This may lead to a better understanding e.g. of initial and ongoing erosion processes and provide helpful input parameter for erosion modeling, especially based on stochastic processes.
3. The system can be used for all types of terrestrial and semi terrestrial soils. Problems may exist under frozen conditions (energy supply, frozen hard soil). It has not yet been tested with fibrously structured peat soils.

REFERENCES

- [1]Havaee, S., Mosaddeghi, M.R., Ayoubi, S. 2015. In situ surface shear strength as affected by soil characteristics and land use in calcareous soils of central Iran. *Geoderma*. 237-238, 137-148
- [2]Römken, M.J.M., Helming, K., Prasad, S.N. 2001. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *Catena* 46. 103–123
- [3]Nearing, M.A., Bradford, J.M., Parker, S.C. 1991. Soil detachment by shallow flow at low slopes. *Soil Science Society of America Journal* 55. 339-344
- [4]Sidorchuk, A. 2005. Stochastic modelling of soil erosion and deposition in cohesive soils. *Hydrological Processes* 19(7). 1399-1417
- [5]Sidorchuk, A. 2009. A third generation erosion model: The combination of probabilistic and deterministic components. *Geomorphology* 110 (1-2). 2-10
- [6]Merel, A.P., Farres, P.J. 1998. The monitoring of soil surface development using analytical photogrammetry. *Photogrammetric Record*. 16 (92), 331-345
- [7]Römken, M.J.M., Wang, J.Y., Darden, R.W., 1988. A lasermicroreliefmeter. *Trans. ASAE* 31, 408–413
- [8]White, E.M. 1983: Simple measurements of soil surface microrelief characteristics. *Water Res. Bull.* 19/2, 231-233
- [9]Bradford, J.M., Truman, C.C., Huang, C. 1992. Comparison of three measures of resistance of soil surface seals to raindrop splash. *Soil Technology* 5, 47–56.
- [10]Zimbone, S.M., Vickers, A., Morgan, R.P.C., Vella, P. 1996. Field investigations of different techniques for measuring surface soil shear strength. *Soil Technology* 9. 101-11
- [11]Collins-George, N., Tolmie, P., Moahansyah, H. 1993. Preliminary report on a new method for determining the shear strength of a soil surface – the resin plate method. *Soil Research* 31 (5). 539-548
- [12]Wojciga, A., Bolte, K., Horn, R., Stepniewski, W., Bajuk, E. 2009. Surface shear resistance of soils on the micro- to mesoscale. *International Agrophysics* 23 (4). 391-398
- [13]Zhang, B., Zhao, Q.G., Horn, R. and Baumgartl, T. (2001): Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. *Soil & Till. Res.* 59, 97-106
- [14]Sidorchuk, A. 2006. Final Report Marsden Fund supported project” Stochastic Mechanics of Soil Erosion.

Chapter III/42: CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR IDENTIFYING COMMON RAGWEED FROM DIGITAL IMAGES

Глава III/42: Сверточная нейронная сеть для идентификации амброзии полыннолистной на цифровых изображениях

Michael Schirrman*; Anton Ustyuzhanin, Antje Giebel, Karl-Heinz Dammer

DOI 10.25680/9498.2018.38.58.235

*Email: mschirrman@atb-potsdam.de

Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, Germany

ABSTRACT. As an invasive and allergic plant species, common ragweed, *Ambrosia artemisiifolia* L., poses threats to the environment and human health in Europe and Asia. A monitoring system for ragweed would be highly recommended to understand its propagation and combat the plant more effectively. Here, we propose a model for identifying ragweed plants out of images with cluttered field scenes based on new developments in the data science (deep-learning). We show that the use of a pre-existing convolutional neural network (AlexNet) can be used to train successfully an image classifier for ragweed identification. Convolutional neural network have a more suitable and scalable network architecture for handling images than simple feed-forward neural networks. The purpose of the paper is to describe the model and show first classification results based on an image set collected in a ragweed infested field after harvesting.

Резюме. Амброзия полыннолистная, *Ambrosia artemisiifolia* L., представляет собой инвазивный аллергенный вид растений, который несет угрозу окружающей среде и здоровью людей в Европе и Азии. Для понимания особенностей ее распространения и более эффективной борьбы с растением может быть настоятельно рекомендована система мониторинга. В работе предложена модель идентификации растений амброзии на изображениях с засоренных полей, основываясь на новых разработках в области науки о данных (глубокое обучение). Показано, что уже существующая сверточная нейронная сеть (AlexNet) может быть использована для успешного обучения классификатора изображений с целью идентификации амброзии. В сравнении с простыми нейронными сетями прямого распространения сверточная нейронная сеть имеет более подходящую и масштабируемую сетевую архитектуру для обработки изображений. Цель данной статьи состоит в том, чтобы описать предлагаемую модель и продемонстрировать первые результаты классификации на основе набора изображений, полученного в зараженном амброзией поле после уборки урожая.

KEYWORDS: common ragweed, invasive plants, neural network, deep-learning, image processing

Ключевые слова: амброзия полыннолистная, инвазивные растения, нейронная сеть, глубокое обучение, обработка изображений

INTRODUCTION

The invasive plant species common ragweed, *Ambrosia artemisiifolia* L., is a field weed problematic for maize, sunflower or beans and causes allergic and asthmatic symptoms for humans. Originally endemic in North America, common ragweed spread throughout Northern Europe and Western Russia during the last century as an invasive plant [1]. The herbaceous and erect plants have a typical fern-like appearance during flowering and pollenating and can be easily mistaken with a number of other plant species such as mugwort [2]. So, non-specialists may have their doubts when recognizing those plants even by using appropriate botanical field guides to identify ragweed correctly. If ragweed could be automatically identified from digital images taken in the environment, smartphones, agricultural machines or unmanned aerial vehicles (UAV) could be used as sensor platforms. Specifically, object oriented approaches seem to be suited for identifying ragweed from images [3]. The geo-location of positively identified ragweed plants can then be transferred to an information system to observe the propagation of ragweed for improving actively a combat system for ragweed.

AIM OF THE METHOD

Here we propose a model for the identification of ragweed from digital images. This model is based on a convolutional neural network (CNN). The aim was to identify those images that contain ragweed plants from an image set depicting cluttered field scenes without the need of specific pre-processing steps such

as image segmentation. Once a suitable model can be found, the model might be integrated in a cell phone in order to help users to differentiate ragweed from other similar plants. In this paper we explain the model and show first recognition results for a ragweed image data set taken in fields after harvesting.

MATERIAL AND METHODS

Convolutional neural networks: In a regular neural network each pixel of an input image corresponds to a single weight for a neuron in a hidden layer. This amount of weights is only manageable for very small images. For larger image sizes this direct approach would lead to an overfitting of the model. CNNs, on the other side, have a more suitable and scalable network architecture for handling images in neural networks [4]. Specifically, CNNs use at least three different types of hidden layers, i.e., convolutional layers, pooling layers and fully connected layers. The convolutional layer uses kernels or feature detectors that convolve over the image and matching thereby the filter pattern to the image. The use of many different kernels produces a stack of different feature maps. A pooling layer reduces the feature maps to the most important information, e.g., by retaining only the maximum value in a k by k neighborhood (max-pooling). By using multiple convolutional layers and pooling layer in sequence, high level features from the images can be extracted. The function of the fully connected layer is to learn the image classifier from the extracted features and the training data set. In short, convolution and pooling layer perform feature extraction and the fully connected layer performs classification. In the training phase the errors of the extracted features to the training set will be used to update all weights and filters in the network using backpropagation. CNN exploit the spatial information between the pixels of an image to reduce the complexity of a neural network via shared weighting using the filter kernels. Very recently, CNNs have been tried for identification and classification of plant images [5,6].

Implementation: For this study, we used the pre-trained CNN AlexNet designed by Krizhevsky et al. [4]. It takes as input, RGB images with the dimensions 227×227 . The feature extraction section consists of 5 convolution layers and max pooling layers connected interchangeably with each other. It uses the Rectified Linear Unit (ReLU) as activation function after each convolution layer. The classification section consists of 3 fully connected layers and a Softmax output layer.

The image data were collected in a ragweed infested field after harvesting between August 25 and October 20, 2016. The time-frame encompassed different growth stages of the ragweed plants. In total, 850 images were taken with a consumer grade camera with 18 mpix and 55mm lens (Canon EOS 550D). One half of the images were taken from ragweed plants whereas the other half of the images were taken from non-ragweed, herbaceous plants located in the same field.

The images were collected during daytime without flash between 10:00 and 16:00 h. The targeted plants were not artificially shadowed during image recording. The only constraint was that the images were taken from a rather nadir position 1.50 m above the plants.

The only pre-processing steps performed on the images before presenting them to the CNN were a zero-center normalization as well as a bi-linear interpolation for resampling into the correct AlexNet format. For model testing, the image set was randomly split into training and test set with different ratios ranging from 10/90 to 90/10 in steps of 10. Ragweed and other plant images were equally allocated within both sets. We only trained the last fully-connected layer of the AlexNet CNN model. The weights of the remaining layer were left unchanged.

RESULTS

In Figure 1, the activations of the channel in convolution layer 5 with the highest importance for the CNN model are shown for an example image. Specifically, the slender leaves with its fern-like appearance are very influential on the CNN model.

The estimation accuracy of models with using 425 images as training (0.5 test/training ratio) was greater than 80% (Figure 2). This means that there is an at least 80% chance of differentiating correctly that a new image contains either ragweed plants or other plants. Repeating those models five times with different random chooses of images yielded nearly the same results, which underlines the robustness of the CNN model. The false negative rate was below 20%, which means that lesser than 20% of the ragweed images were not recognized as containing ragweed by the model.

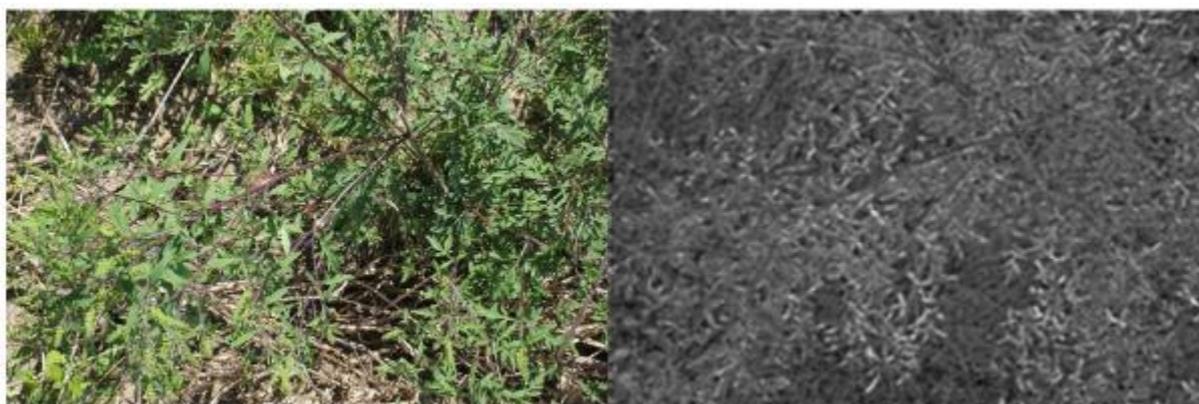


Figure 1 - A random photo depicting ragweed plants as used in the CNN model (left). The activations of the strongest channel in convolution layer 5 for the example image. Brighter tones indicate stronger influences on the CNN models than darker tones (right).

CONCLUSIONS

1. We could effectively build an image classifier from a pre-existing CNN (AlexNet) for differentiating ragweed plants from images taken in a ragweed infested field without giving care about varying lighting conditions during image acquisition.
2. Images need no sophisticated pre-processing such as segmentation between plant and background before presenting them to the CNN model.
3. The CNN model has potential to be integrated on a smart platform for fast identification of ragweed. However, the model needs still to be improved by including more and diverse images and the training should be extended to the feature extraction layers.

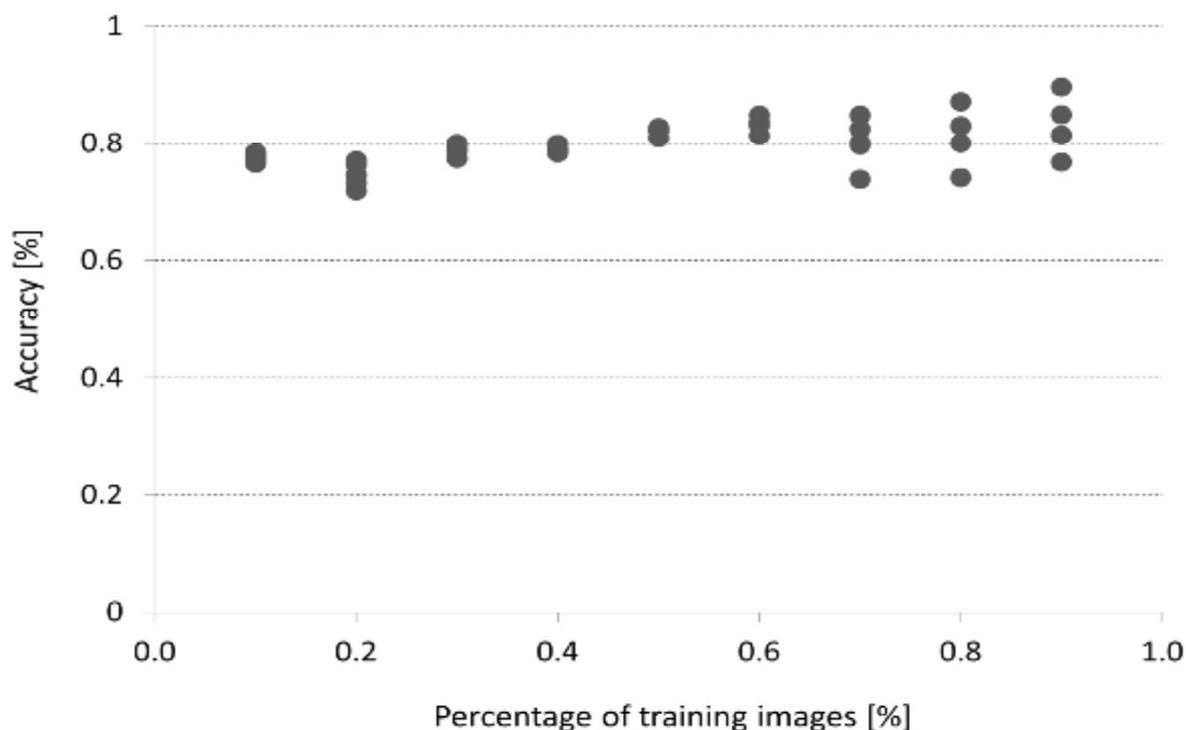


Figure 2 - Model validation results

REFERENCES

- [1]Makra L., Matyasovszky I., Hufnagel L., Tusnady G. 2015. The history of ragweed in the world. Appl. Ecol. Env. Res. 13, 489–512.

- [2]Buttenschön, R. M., Waldspühl, S., Bohren, C. Guidelines for management of common ragweed, *Ambrosia artemisiifolia*. University of Copenhagen, 2010.
- [3]Ustyuzhanin, A., Dammer, K.-H., Giebel, A., Weltzien, C., Schirrmann, M. 2017. Discrimination of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) and mugwort (*Artemisia vulgaris*) based on bag of visual words model. *Weed Technology*, 31(02), 310–319.
- [4]Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E. 2012. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In *Advances in neural information processing systems* (pp. 1097–1105). <http://papers.nips.cc/paper/4824-imagenet-classification-with-deep-convolutional-neural-networks>. Accessed 25 September 2017.
- [5]Dyrmann, M., Karstoft, H., & Midtby, H. S. (2016). Plant species classification using deep convolutional neural network. *Biosystems Engineering*, 151, 72–80. doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.08.024.
- [6]Lee, S. H., Chan, C. S., Wilkin, P., & Remagnino, P. (2015). Deep-Plant: Plant Identification with convolutional neural networks. In *Image Processing (ICIP), 2015 IEEE International Conference on* (pp. 452–456). IEEE. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7350839. Accessed 3 November 2016.

Основная глава 10.2 Подходы и применения дистанционного зондирования Main Chapter 10.2 Remote Sensing Approaches and Applications

Chapter III/43: REMOTE SENSING BASED NET PRIMARY PRODUCTIVITY ESTIMATION – RESULTS FROM 16-YEARS GLOBAL MODELLING FOR EUROPE, CENTRAL ASIA AND WESTERN SIBERIA

Глава III/43: Оценка чистой первичной продуктивности на основе дистанционного зондирования - Результаты 16-летнего глобального моделирования для Европы, Центральной Азии и Западной Сибири

Christina Eisfelder*; Ursula Gessner; Markus Tum; Julian Zeidler

DOI 10.25680/9801.2018.64.16.236

*Email: christina.eisfelder@dlr.de

German Aerospace Center (DLR), German Remote Sensing Data Center (DFD), Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling, Germany

ABSTRACT. Remote sensing satellites are able to regularly and consistently observe the Earth’s surface and can provide important input data for vegetation modelling. In this chapter we present modelled Net Primary Productivity (NPP) for Europe, Central Asia and western Siberia derived with the remote sensing data driven Biosphere Energy Transfer Hydrology (BETHY/DLR) model. The presented NPP time-series spans the 16-year period 2000-2015. We show spatial distribution of mean annual NPP for the area of interest as well as time-series of monthly NPP data for selected exemplary locations. The derived NPP data can support sustainable land management and assist to understand interactions between vegetation and climate as well as the impact of human activities on vegetation productivity.

Резюме. Спутники дистанционного зондирования могут регулярно и последовательно контролировать земную поверхность и предоставлять важные входные данные для моделирования растительности. В этой работе представлена полученная путем моделирования современная чистая первичная продуктивность (NPP) для Европы, Центральной Азии и Западной Сибири, полученная с помощью биосферной гидротрансформационной гидрологической модели (BETHY/DLR). Представленные временные ряды NPP охватывают период в 16 лет, с 2000 по 2015 гг. Показано распределение среднегодовой NPP для интересующей зоны, а также временные ряды ежемесячных данных NPP для отдельных образцовых участков. Полученные данные NPP могут обеспечить устойчивое управление земельными ресурсами и способствовать пониманию взаимодействия между растительностью и климатом, а также воздействия антропогенной деятельности на продуктивность растительности.

KEYWORDS: carbon, modelling, net primary productivity, remote sensing, satellite data, time series, vegetation

Ключевые слова: углерод, моделирование, чистая первичная продуктивность, дистанционное зондирование, спутниковые данные, временные ряды, растительность

INTRODUCTION

Earth observation satellites allow monitoring the Earth's surface on a regular and consistent basis. They are able to provide information for large and remote areas globally. Time series of satellite data can be used to observe changes on the land surface and derive information about the status of the vegetation. This can be valuable input for vegetation models, which aim to calculate net primary productivity (NPP). NPP provides information about the biomass production by green vegetation. It is usually measured in mass of carbon per unit area per unit time (e.g. $C\ m^{-2}\ year^{-1}$). Estimation of NPP is important for understanding the carbon cycle and possible interactions between vegetation and climate as well as human activities [1,2]. It provides information about vegetation productivity which is important information for efficient and sustainable land management [3,4].

In this chapter we present exemplary results for Europe, Central Asia and western Siberia from global NPP modelling with the Biosphere Energy Transfer Hydrology (BETHY/DLR) model.

THE BETHY/DLR MODEL

BETHY/DLR is a soil-vegetation-atmosphere-transfer (SVAT) model [5]. It is used to model photosynthesis of terrestrial ecosystems. BETHY/DLR has previously been used for regional modelling of NPP in several areas worldwide. It was for example used for assessing NPP and biomass in semi-arid regions of Kazakhstan [6,7,8], for analyzing land degradation in South Africa [9], for quantifying productivity and energy potential of agricultural and forest areas in Europe [10,11] and for investigating NPP time-series for China [12]. In this chapter, we present results from NPP modelling with an enhanced version of BETHY/DLR [13] for the 16-year period from 2000 to 2015.

As model input, satellite-derived leaf area index (LAI) data from the Copernicus Global Land Service [14] with 1 km spatial resolution was used to describe vegetation condition and phenology. Continuous time-series of air temperature, precipitation, wind speed, and cloud coverage from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-Interim reanalysis [15,16] provide information about meteorological conditions. Further input data for BETHY/DLR comprise time-series of atmospheric CO_2 concentration [17], an albedo map [18], soil types [19], climate zones from Koeppen-Geiger [20], and topography [21]. As land cover input the classification from the global land cover database for the year 2000 (GLC2000) [22] was used.

SPATIAL NPP DISTRIBUTION

The map in figure 1 presents the mean annual NPP for 2000-2015 for Europe, Central Asia and western Siberia. Regions with low NPP are shown in yellow to light green. High productivity areas are shown in dark green to blue colors. Bare areas according to the GLC2000 land cover map are masked as well as water bodies.

Within the presented area, regions of highest productivity are located in western Europe with forest cover or agricultural land use. Lowest productivity can be observed in high mountain areas in the Alps and Scandinavia, in the tundra, and the arid steppe and deserts of Central Asia.

TEMPORAL NPP DISTRIBUTION

The model BETHY/DLR calculates NPP with a high temporal resolution of one day. Based on these time-series, sums of NPP for any desired time-period can be derived. Figure 2 shows time-series for selected locations within the area of interest. In these diagrams, the monthly NPP is plotted for the 16 years from 2000-2015. The first diagram shows exemplary monthly NPP for an agricultural area in Germany, the second diagram shows monthly NPP for an evergreen forest in Russia, the third diagram for a grassland area in South Kazakhstan, and the fourth diagram shows monthly NPP for a sparsely vegetated area in West Kazakhstan. The location of the diagrams is indicated with red triangles in figure 1.

The time-series depict the typical seasonal cycle of the temperate zone including reduced vegetation activity or dormancy in winter, start of growing season in spring with a peak of productivity in summer and senescence in autumn.

There are obviously large differences between absolute NPP values and the duration of vegetation growth within a year between the different locations due to different land cover/land use and climatic conditions. For the individual locations variations between years become visible.

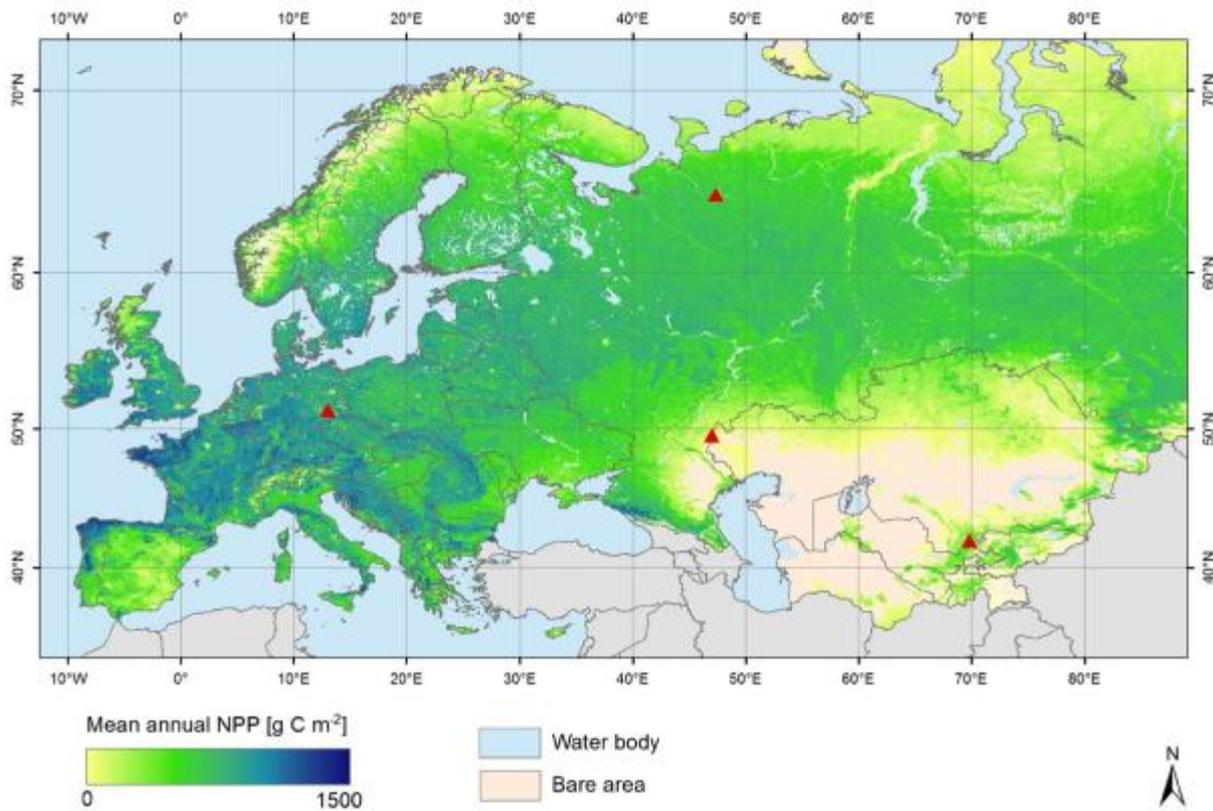


Figure 1 – Mean annual NPP for the years 2000-2015 derived with BETHY/DLR for Europe, Central Asia, and western Siberia. The red triangles show the locations of the time-series diagrams from figure 2.

CONCLUSIONS

1. We present results from 16-years global NPP modelling with BETHY/DLR for Europe, Central Asia, and western Siberia.
2. The model BETHY/DLR provides NPP time-series with a temporal resolution of one day at a spatial resolution of the land cover and LAI input data of ~ 1 km. With higher resolution input datasets the spatial resolution of the NPP output can be increased.
3. Spatial distribution of mean annual NPP clearly shows differences in vegetation productivity.
4. Exemplary diagrams of monthly NPP time-series show differences in NPP for individual locations; for each location variations between years become obvious.
5. The NPP data provide important information for sustainable land management and can be applied e.g. to quantify productivity losses due to droughts, support monitoring of land degradation, and as base data for retrieving livestock carrying capacity.
6. Further analyses can help to better understand interactions between vegetation and climate as well as the impact of human activities on vegetation productivity.

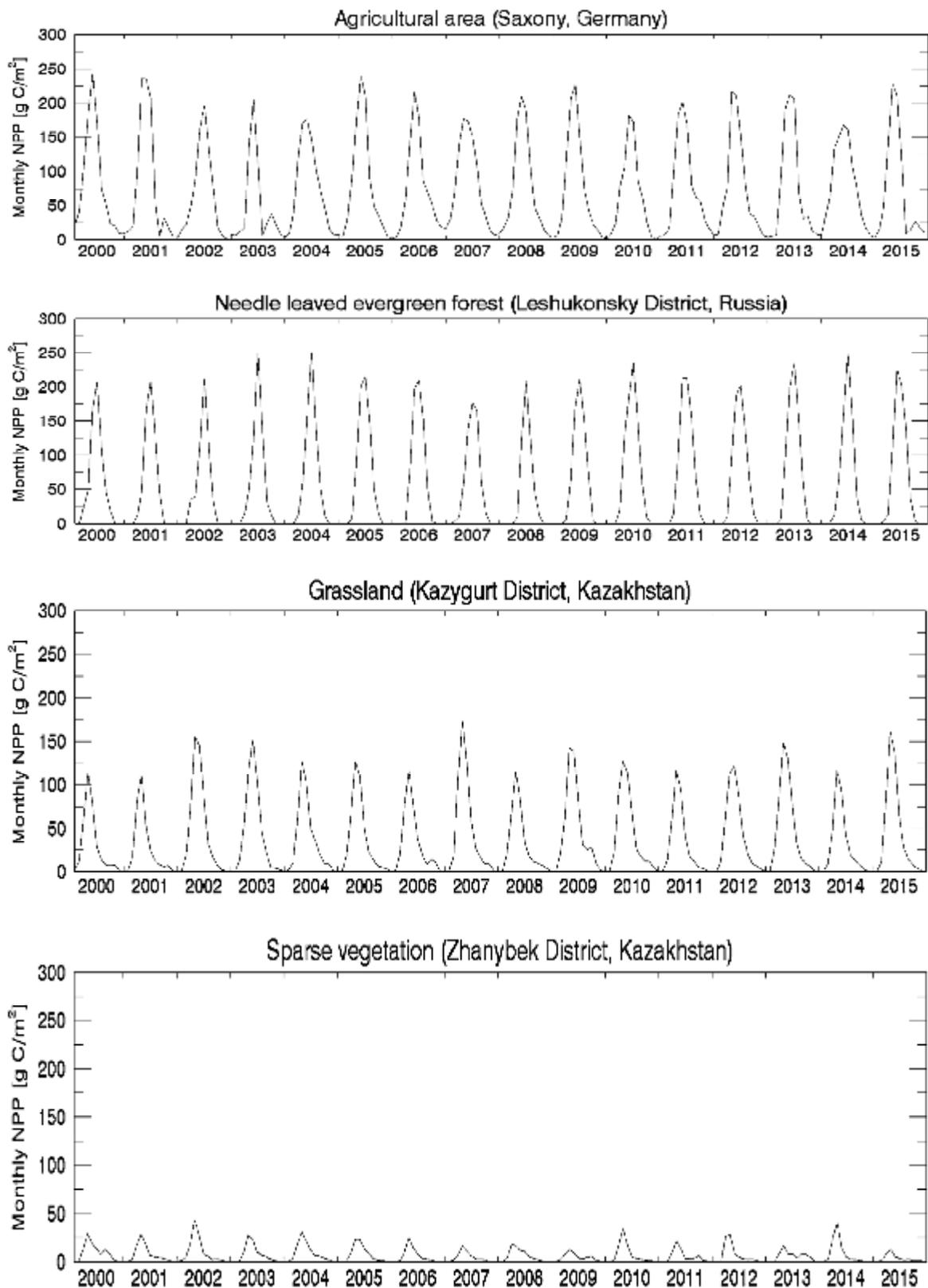


Figure 2 – Diagrams showing 16-year time-series of monthly NPP for selected exemplary land cover and locations: agricultural area in Germany, evergreen forest in Russia, grassland in South Kazakhstan, and sparse vegetation in West Kazakhstan. The locations of the diagrams are indicated with red triangles in figure 1.

REFERENCES

- [1] Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., et al. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999, *Science* 300 (5625), 1560e1563
- [2] Le Quéré, C., Peters, G.P., Andres, R.J., Andrew, R.M., Boden, T.A., Ciais, P., et al. 2014. Global carbon budget 2013, *Earth Syst. Sci. Data* 6, 235e263
- [3] Kariyeva, J., van Leeuwen, W.J.D. 2012. Phenological dynamics of irrigated and natural drylands in Central Asia before and after the USSR collapse. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 162, pp. 77-89
- [4] Hankerson, B., Schierhorn, F., Müller, D. 2017. Zwischen ökologischen und ökonomischen Zwängen: Weidenutzung und Tierproduktion in Kasachstan. *IAMO Jahreszahl* 19, pp. 45-54
- [5] Wißkirchen, K., Tum, M., Günther, K.P., Niklaus, M., Eisfelder, C., Knorr, W. 2013. Quantifying the carbon uptake by vegetation for Europe on a 1 km² resolution using a remote sensing driven vegetation model. *Geoscientific Model Development*, 6, pp. 1623–1640
- [6] Eisfelder, C., Kuenzer, C., Dech, S., Buchroithner, M.F., 2013. Comparison of two remote sensing based models for regional net primary productivity estimation – a case study in semi-arid Central Kazakhstan. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, doi:10.1109/JSTARS.2012.2226707.
- [7] Eisfelder, C., Klein, I., Niklaus, M., Kuenzer, C. 2014. Net primary productivity in Kazakhstan, its spatio-temporal patterns and relation to meteorological variables. *Journal of Arid Environments*, 103: 17-30. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2013.12.005
- [8] Eisfelder, C., Klein, I., Bekkulyeva, A., Kuenzer, C., Buchroithner, M.F., Dech, S. 2017. Above-ground biomass estimation based on NPP time-series – A novel approach for biomass estimation in semi-arid Kazakhstan. *Ecological Indicators*, 72, pp. 13–22
- [9] Niklaus, M., Eisfelder, C., Gessner, U., Dech, S. 2015. Land Degradation in South Africa - A Degradation Index Derived from 10 Years of Net Primary Production Data. In: *Remote Sensing Time Series Revealing Land Surface Dynamics*, Editors: Kuenzer C., Dech, S., Wagner, W.; Springer, Chapter 12, pp. 247-267
- [10] Tum, M., Günther, K. 2011. Validating modelled NPP using statistical yield data. *Biomass and Bioenergy* 35, pp. 4665-4674
- [11] Tum, M., McCallum, I., Kindermann, G., Günther, K.P. 2013. Sustainable Bioenergy Potentials for Europe and the Globe. *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*, S1, pp. 1-10
- [12] Eisfelder, C., Kuenzer, C. 2015. Investigating Fourteen Years of Net Primary Productivity Based on Remote Sensing Data for China. In: *Remote Sensing Time Series Analyses revealing Land Surface Dynamics*, Editors: Kuenzer C., Dech, S., Wagner, W.; Springer, Chapter 13, pp. 268-288
- [13] Tum, M., Zeidler, J.N., Günther, K.P., Esch, T. 2016. Global NPP and straw bioenergy trends for 2000–2014. *Biomass and Bioenergy* 90, pp. 230-236
- [14] Baret, F., Weiss, M., Lacaze, R., Camacho, F., Makhmara, H., Pacholczyk, P. et al. 2013. GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part1: principles of development and production, *Remote Sens. Environ.* 137, 299e309
- [15] Berrisford, P., Dee, D., Poli, P., Brugge, R., Fielding, K., Fuentes, M., Kallberg, P. Kobayasha, S., Uppala, S., Simmons, A. 2011. The ERA-Interim archive. In: *ERA report series*, No. 1, Version 2.0, ECMWF: Reading, UK
- [16] Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, pp. 553–597
- [17] National Institute for Environmental Studies 2011. NIES GOSAT Product Format Descriptions, first ed.
- [18] Gio-GL 2015. Gio Global Land Component – Lot I “Operation of the Global Land Component”, Product User Manual, Surface Albedo – Version 1, SPOT/VGT, GIO-GL Lot 1 consortium.
- [19] FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC 2009. Harmonized World Soil Database (Version 1.1). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria
- [20] Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A. 2007. Updated world map of the Koeppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633e1644
- [21] USGS 1996. GTOPO30, Global 30-Arc-Second Elevation Data Set. U.S. Geological Survey, EROS Data Center, Sioux Falls, South Dakota
- [22] Bartholomé, E., Belward, A.S. 2005. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 26, pp. 1959-1977

Chapter III/44: METHODS OF ASSESSING VEGETATION DYNAMICS AND PASTURE POTENTIALS IN HIGH MOUNTAIN REGIONS

Глава III/44: Методы оценки динамики растительности и пастбищных потенциалов в высокогорных регионах

Kim André Vanselow*¹; Harald Zandler²; Cyrus Samimi^{3,4}

DOI 10.25680/2272.2018.40.68.237

*Email: kim.vanselow@fau.de

1. Institute of Geography, University of Erlangen-Nuremberg, Wetterkreuz 15, 91058 Erlangen, Germany

2. Environmental Consultant, Vienna, Austria

3. Department of Geography, University of Bayreuth, Bayreuth, Germany

4. BayCEER, University of Bayreuth, Bayreuth, Germany

ABSTRACT. In this chapter, we present an approach for the assessment of vegetation dynamics and pasture potential with satellite data. In the first part, we explain how to map vegetation with a combination of field work and remote sensing. We discuss the issues of rugged terrain and background effects that occur when using remote sensing in drylands and mountains. We show how this can be solved by using suitable indices of hyperspectral and multispectral data. Furthermore, we give an introduction to remote sensing time series analysis to account for the effects of temporal vegetation variations. In the second part, we highlight field and laboratory methods for the estimation of forage biomass and quality. The combination of the presented methods is an ideal solution for assessing the pasture potential and sustainability issues in dry mountains.

Резюме. В этой главе представлен подход для оценки динамики растительности и пастбищного потенциала по спутниковым данным. В первой части объяснено, как составить карту растительности с помощью сочетания полевых работ и дистанционного зондирования. Обсуждены проблемы пересеченной местности и фоновые эффекты, возникающие при использовании дистанционного зондирования в засушливых и горных районах. Показано, как можно решить эту проблему, используя подходящие индексы гиперспектральных и мультиспектральных данных. Кроме того, дано введение в анализ временных рядов дистанционного зондирования для учета влияния временных изменений растительности. Во второй части освещены полевые и лабораторные методы оценки биомассы кормов и их качества. Комбинация представленных методов является идеальным решением для оценки пастбищного потенциала и проблем их устойчивости в сухих горах.

KEYWORDS: pasture potential, vegetation dynamics, high mountains, arid environments, remote sensing, nutrition analysis, statistical models, machine learning

Ключевые слова: пастбищный потенциал, динамика растительности, высокогорье, засушливые территории, дистанционное зондирование, анализ питания, статистические модели, машинное обучение

INTRODUCTION

The assessment of a region's pasture potential is a complex task as it comprises several subsidiary studies. Information about the prevailing vegetation, its distribution, and dynamics is needed, including the availability of biomass and forage quality. For large areas, remote sensing has proven to be a suitable tool for vegetation mapping [1], which is the basis for estimating the pasture potential. However, remote sensing approaches are challenging in drylands and mountains due to considerable background effects or rugged terrain. Here, we present a method for the assessment of vegetation dynamics and pasture potential with remote sensing data (Fig. 1), based on research experience in the dry Pamir Mountains of Central Asia (Fig. 2).

ASSESSING VEGETATION IN DRY MOUNTAIN AREAS

In pasture potential studies, data on vegetation cover, distribution, type and dynamics has to be gathered. For vast and sometimes hardly accessible areas, such as the mountains of Central Asia, remote sensing is an accepted tool to evaluate vegetation [2, 3]. However, there are three main obstacles: rugged terrain, background effects, and temporal vegetation variations.

Particularly in mountains, with steep slopes resulting in different illumination effects, a sound orthorectification, e.g. by applying a geometric physical model, is a basic requirement for further image interpretation [4]. Furthermore, in mountainous environments, primarily topographic gradients regulate species distributions and, thus, should be included in the mapping process [5].

Another big issue of remote sensing based vegetation mapping in drylands and mountains occurs from the often scarce vegetation cover and from the predominant growth form: dwarf shrubs. Both factors lead to the fact that the signal of green vegetation, which is usually used to map vegetation with remote sensing methods, is relatively low. Low vegetation cover values cause problems with soil background effects. Additionally, dwarf shrubs have a large share of woody biomass, i.e. non-photosynthetic tissue [6]. Zandler et al. [7] showed that the use of Hyperion hyperspectral remote sensing data reveals an increased performance compared to traditional multispectral sensors and therefore is a promising solution to cope with these problems. Apart from sensing spectral properties of green vegetation, hyperspectral sensors are also able to capture reflective features of other plant tissue, like lignin or cellulose. However, it has to be stated that the modeling errors are still large. Therefore, additional variables, such as texture or topography, should be included into the mapping process. Furthermore, space-borne hyperspectral sensors, such as Hyperion, are currently at an experimental stage. At the moment, no long-term time series of hyperspectral data is available. However, forthcoming launches of new hyperspectral sensors (e.g. EnMAP) are forward-looking innovations for improving vegetation mapping and biomass prediction in the world's arid mountains.

Frequently, vegetation mapping based on remote sensing relies only on one or a few satellite scenes. However, vegetation and its pasture potential are not static but respond to changing conditions over time. Therefore, to account for these dynamic properties, time series of satellite images are needed. Although we recommend the utilization of hyperspectral data if available, we still have to rely on the opportunities given by the established multi-spectral sensors if we currently want to include vegetation dynamics. However, vegetation indices able to cope with soil noise should be included when applying multispectral sensors in respective environments. Vanselow and Samimi [8] showed that background-effect adapted vegetation indices, the inclusion of topographic variables and vegetation texture variables derived from high-resolution satellites [9], lead to better predictive mapping performance of vegetation in dry mountains compared to classical vegetation indices. These findings are backed by results on biomass modeling in the Tajik Pamirs [10, 11]. The relationship between vegetation parameters and such multivariate sets of explanatory variables can be assessed by using statistical models or machine learning processes that are capable of handling high dimensional data.

Popular sensors for remote sensing time-series analysis are MODIS or AVHRR. However, their resolution is too coarse to derive estimations of the pasture potential from the resulting vegetation maps. High resolution images are provided by sensors such as Sentinel 2 or RapidEye but they are relatively young tools limiting long term vegetation trend analysis. Alternatively, Landsat provides multispectral data in a sufficient spatial and temporal resolution and a comparatively long time series since 1972. Furthermore, this data is free of charge.

Here, we present a workflow how to use Landsat data for the evaluation of vegetation dynamics. In order to obtain an image time series with comparable values over the entire observation period, the images should be pre-processed, including radiometric and geometric preparations [12]. Then, spectral indices and transformations that are well adapted for vegetation monitoring (e.g. MSAVI2) are calculated. After completing the time series, change detection can be conducted to assess vegetation dynamics. Change in ecosystems can be divided into three classes: seasonal, gradual, or abrupt. Seasonal change is mostly dependent on annual temperature and rainfall interrelations, which alter plant phenology. Gradual change can be caused by interannual climate variability (such as trends in mean annual rainfall) or land degradation (e.g. caused by grazing) and land management. Abrupt change is caused by disturbances and extreme events (e.g. deforestation, debris flows, floods, fires). Therefore, a suitable change detection method has to be able to differentiate between these classes. A technique that fulfills these prerequisites is e.g. the BFAST algorithm invented by Verbesselt et al. [13].

In addition to the remote sensing component, field plots have to be set up, where the variable of interest is recorded. This data serves as training and test data for the remote sensing based classification or regression with statistical models or machine learning processes. Finally, we want to emphasize that monitoring solely based on satellite data is usually insufficient and that field based ground truthing is necessary to evaluate model accuracy.

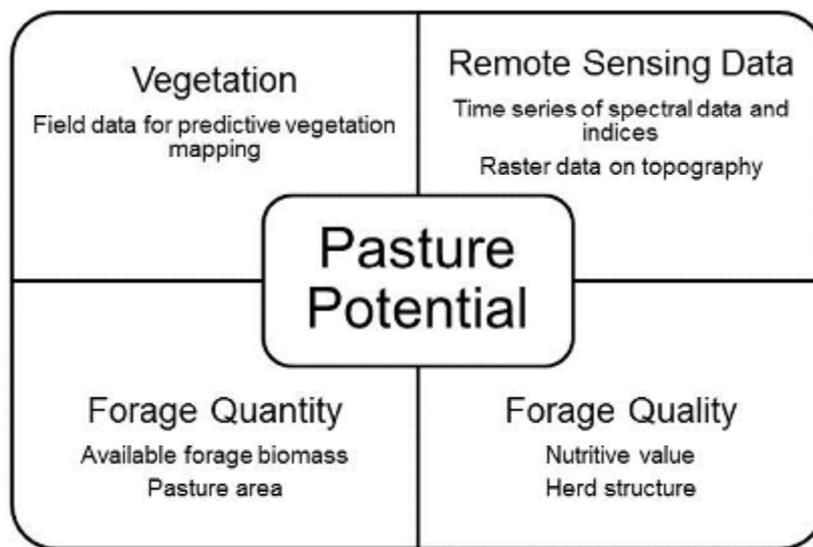


Figure 1 – Graphical summary on the required data for the assessment of the pasture potential.

ASSESSING THE PASTURE POTENTIAL

To extend the evaluation of vegetation to the assessment of the pasture potential, additionally data on biomass and forage quality as well as pasture management have to be collected.

The pasture potential of an area can only be evaluated in relation to the animals' forage needs. Therefore, a basic methodological requirement is an overview of the spatiotemporal variability of pasture use, livestock numbers and densities, herd composition, and knowledge about the access of pasture land. Suitable methods include the analysis of legal and administrative documents and (geo)statistical data, standardized questionnaires, GIS models of physical pasture accessibility, and interviews with pasture users and experts [14].

A widely-used approach to determine the yield of pastures is to set up so-called exclosures. These are fenced plots where grazing is eliminated. It is assumed that on such sites, vegetation can grow unbiased and hence reveals its net primary production. In addition, standing biomass may be measured using a high number of plots, representatively distributed over the entire study area, to account for the productivity bias from temporal and spatial variability of precipitation or grazing. These field sites are finally linked to satellite data. At the plots, biomass quantity is collected in repeated measurements in different seasons and phenological states. The usual way is to clip the available biomass at each plot. As this is a time-consuming task, we recommend complementing the clipping by estimation methods such as the point-intercept method (see e.g. [15, 16]). Then, knowledge about the animals' diet and the available forage plants has to be collected. This includes the examination of existing literature, interviews with herders and livestock keepers as well as livestock observations.

Simultaneously to the assessment of the forage quantity, its quality needs to be estimated. The most limiting factor for ruminants is the nutritive value of forage. According to van Soest [17], it can be classified into the three components feed consumption, digestibility, and energetic efficiency. Each of these components is dependent on the characteristics of available forage plants and the livestock species. Feed consumption is primarily controlled by the palatability of the available plants and by the forage selection. Both are subject to change depending on the animal species. Therefore, an adequate description of feed consumption should include information on animal species, sex, body weight and nutritional status [17, 18]. To understand what can be regarded as a forage plant, a detailed study of the feeding habits of the different livestock animals is necessary. This can be assessed by interviews with livestock keepers and by livestock observations. Estimating the digestibility of forage is a key factor in fodder value analyses, because the available energy in the forage can't be directly analyzed but is highly correlated with digestibility [19]. The calculation of the Total Digestible Nutrients (TDN) according to Weiss et al. [20] is an accepted method. Furthermore, grazing habits have to be taken into account as they determine the energetic efficiency. A certain amount of the consumed energy will be lost by actions such as forage intake, movement, digestion, lactating, etc. and is therefore unavailable for carrying out work or producing meat [21]. Here, we suggest the following workflow to assess forage quality: First, a detailed examination of the available literature on forage plants and forage preferences of the different livestock animals should be

carried out. Then, this data should be complemented by interviews on important forage plants with livestock keepers and by livestock observations to assess which plant is part of the animals' diet. Subsequently, samples of the identified forage plants are collected and their nutritive value is analyzed in the laboratory. Since fodder values, above all protein and fibre content, are season-dependent, samples should be taken from both the vegetation period and dormancy. To evaluate the metabolizable energy content of a specific forage plant as accurately as possible, formulas derived from measured interrelations represent a good tool to deduce the energy content from relatively simple indicators (see e.g. [22]). The nutritive value can be analyzed, e.g. by the Weender-van Soest Analysis [17]. Subsequently, the digestible nutrients and metabolizable energy are calculated with adequate equations. These results can be averaged for different vegetation units to represent mean forage qualities per average biomass unit.

To sum up, the remote sensing classification approach is used to spatially map and differentiate the different vegetation units. Subsequently, predicted biomass values and the average nutritive values of the vegetation units are used to calculate the availability of metabolizable energy (MJ/ha) in each pixel, which determines the pasture potential. The comparison of the seasonal numbers of livestock in the pastures and the composition of the herds allows for an appraisal of the grazing impact and thus an evaluation of possible overuse.



Figure 2 – Grazing yaks on the arid Eastern Pamir Plateau, Tajikistan. Photo by Kim Vanselow

CONCLUSIONS

1. Remote sensing is complex but feasible and necessary. New sensors have high potential.
2. Good field (biomass, forage quality) and socioeconomic data (livestock quantity and demographics, pasture accessibility) are essential.
3. Combination of methods represents ideal solution for assessing pasture potential and sustainability issues.

REFERENCES

- [1]Eisfelder, C., Kuenzer, C.,Dech, S. 2012. Derivation of biomass information for semi-arid areas using remote-sensing data. *International Journal of Remote Sensing* 33(9), 2937-2984.
- [2]Van Etten, E.J.B. 1998. Mapping vegetation in an arid, mountainous region of Western Australia. *Applied Vegetation Science* 1(2), 189-200.

- [3] von Wehrden, H., Zimmermann, H., Hanspach, J., Ronnenberg, K., Wesche, K. 2009. Predictive mapping of plant species and communities using GIS and Landsat data in a southern Mongolian mountain range. *Folia Geobotanica* 44(3), 211-225.
- [4] Gascon, F., Cadau, E., Colin, O., Hoersch, B., Isola, C., Fernández, B.L., Martimort, P. 2014. Copernicus sentinel-2 mission: Products, algorithms and Cal/Val. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*.
- [5] Dirnböck, T., Dullinger, S., Gottfried, M., Ginzier, C., Grabherr, G. 2003. Mapping alpine vegetation based on image analysis, topographic variables and Canonical Correspondence Analysis. *Applied Vegetation Science* 6(1), 85-96.
- [6] Oldeland, J., Dorigo, W., Wesuls, D., Jürgens, N. 2010. Mapping bush encroaching species by seasonal differences in hyperspectral imagery. *Remote Sensing* 2(6), 1416-1438.
- [7] Zandler, H., Brenning, A., Samimi, C. 2015. Potential of space-borne hyperspectral data for biomass quantification in an arid environment: Advantages and limitations. *Remote Sensing* 7(4), 4565-4580.
- [8] Vanselow, K.A., Samimi, C. 2014. Predictive mapping of dwarf shrub vegetation in an arid high mountain ecosystem using remote sensing and random forests. *Remote Sensing* 6(7), 6709-6726.
- [9] Kelsey, K.C., Neff, J.C. 2014. Estimates of aboveground biomass from texture analysis of landsat imagery. *Remote Sensing* 6(7), 6407-6422.
- [10] Zandler, H., Brenning, A., Samimi, C. 2015. Quantifying dwarf shrub biomass in an arid environment: Comparing empirical methods in a high dimensional setting. *Remote Sensing of Environment* 158, 140-155.
- [11] Schumacher, P., Mislimeshova, B., Brenning, A., Zandler, H., Brandt, M., Samimi, C., Koellner, T. 2016. Do red edge and texture attributes from high-resolution satellite data improve wood volume estimation in a semi-arid mountainous region? *Remote Sensing* 8(7), 540.
- [12] Hecheltjen, A., Thonfeld, F., Menz, G. 2014. Recent Advances in Remote Sensing Change Detection – A Review. In: I. Manakos and M. Braun (eds). *Land Use and Land Cover Mapping in Europe*, Springer, Dordrecht, 145-178.
- [13] Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., Culvenor, D. 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment* 114(1), 106-115.
- [14] Vanselow, K.A., Kraudzun, T., Samimi, C. 2012. Grazing practices and pasture tenure in the Eastern Pamirs: The nexus of pasture use, pasture potential, and property rights. *Mountain Research and Development* 32(3), 324-336.
- [15] Mueller-Dombois, D., Ellenberg, H. 1974. *Aims and methods of vegetation ecology*. Wiley, New York.
- [16] Samimi, C., Kraus, T. 2004. Biomass estimation using Landsat-TM and -ETM+. Towards a regional model for Southern Africa? *GeoJournal* 59(3), 177-187.
- [17] van Soest, P.J. 1994. *Nutritional ecology of the ruminant*. Cornell Univ. Press, Ithaca, NY.
- [18] Committee on Nutrient Requirements of Small Ruminants 2007. *Nutrient requirements of small ruminants. Sheep, goats, cervids and new world camelids*. The National Acad. Press, Washington, DC.
- [19] Robinson, P.H. 2001. Estimating the Energy Value of Ruminant Feedstuffs In: *Proceedings, 31st California Alfalfa and Forage Symposium*. Modesto, CA.
- [20] Weiss, W.P., Conrad, H.R., St. Pierre, N.R. 1992. A theoretically-based model for predicting total digestible nutrient values of forages and concentrates. *Animal Feed Science and Technology* 39(1-2), 95-110.
- [21] Cañas, C.R., Quiroz, R.A., León-Velarde, C., Posadas, A. no year. Determination of Metabolizable Energy for Grazing. *Production Systems & Natural Resources Management Department Working Paper 5*. CIP (International Potato Center), Lima.
- [22] Rutzmoser, K., Hartmann, S., Diepolder, M. 2007. Schätzgleichungen zur Energieberechnung bei Versuchen im Grünland und Feldfutterbau. In: *Die Zukunft von Praxis und Forschung in Grünland und Futterbau*. Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, Straubing.

Глава III/45: АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ГОРНЫЕ
ЛАНДШАФТЫ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Chapter III/45: Analysing Climate Change Impacts on Mountain Landscapes of the Northern
Caucasus

Вера В. Виноградова*, Татьяна Б. Титкова, Елена А. Белоновская, Раиса Г. Грачева

DOI 10.25680/5335.2018.60.49.238

*Эл. Почта: vvvinog@yandex.ru

Институт географии РАН, Старомонетный пер. 29, 119017, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ. В работе показана роль климатического фактора в наблюдаемых изменениях границ и состояния субальпийских ландшафтов Северного Кавказа, на которых наблюдалась трансформация системы землепользования. Оценка изменений тепло- и влагообеспеченности производилась для территории 42–44° с.ш. 42–45.5° в.д. с использованием вегетационного индекса (NDVI), индекса вегетационных условий (VCI), спутникового индекса климатических экстремумов (SCEI), суммы активных температур (температура воздуха выше +10°C) и осадков. Установлено, что в начале XXI в. в предгорьях увлажнение уменьшается, а в районах среднегорий отмечается рост увлажнения. Оценка суммы активных температур и осадков для периода современного потепления (1981–2010 гг.) по сравнению с предшествующим периодом (до потепления 1951–1980 гг.), показывает увеличение суммы активных температур и осадков, которые способствуют увеличению продуктивности растительных сообществ, о чем свидетельствует рост вегетационного индекса (NDVI) в начале XXI в. и восстановление естественных границ высотных ландшафтных поясов.

Abstract. Changes in the boundaries of high-altitude mountain belts can be treated as a proof of climate change. These changes were caused by termination of human activities. The article demonstrates the role of climatic factors in changes of the boundaries and state of sub-alpine landscapes in the North Caucasus, where the transformation of land use system was observed. The estimate of changes in heat and humidity was made for the territory of 42–44°N 42–45.5°E using vegetation index (NDVI), the index of vegetation conditions (VCI), Satellite Climatic Extremes Index (SCEI) and the sum of active temperatures (air temperature above + 10 °C). In the foothills moisture decreases, whereas in the middle mountains the increase in moisture is observed. The estimate of the amount of active temperatures and precipitation for the period of modern warming (1981–2010) compared to the previous period (1951–1980) shows the increase of these parameters in the early twenty-first century. These changes cause the increase in vegetation. It is evidenced by the growth of vegetation index (NDVI) and regeneration of natural boundaries of altitude zones at the beginning of the twenty-first century in this area.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: изменения климата, горные ландшафты, вегетационный индекс (NDVI), индекс вегетационных условий (VCI), спутниковый индекс климатических экстремумов (SCEI), сумма активных температур

Keywords: climate change, mountain landscapes, vegetation index (NDVI), index of vegetation conditions (VCI), satellite climatic extremes index (SCEI), sum of active temperatures

ВВЕДЕНИЕ

Изменения климатических условий могут приводить к существенным сдвигам границ высотных горных ландшафтных поясов. Однако, изменения границ могут быть также следствием прекращения хозяйственной деятельности, связанной с использованием горных экосистем. В настоящее время трансформация горного землепользования, прежде всего горного животноводства привела к резкому сокращению пастбищной нагрузки на горные травяные экосистемы Северного Кавказа. Орографические особенности северного макросклона Большого Кавказа – чередование параллельно расположенных хребтов и межгорных котловин – обуславливает локальное перераспределение тепла и влаги на склонах различной экспозиции. На южных и восточных склонах межгорных котловин выделяют: горные степи, развитые в диапазоне высот 1100–1400 м над уровнем моря; горные луговые степи на высотах 1400–2000 м; горные остепненные луга – в пределах высот 2000–2400 м. На северных и западных склонах на месте вырубленных лесов возможно формирование послелесных лугов с элементами остепнения. [1, 2].

В настоящее время в среднегорьях Северного Кавказа идут процессы восстановления естественных границ высотных поясов: расширение горно-лесного пояса и восстановление сосновых лесов на южных склонах; восстановление горных луговых степей и остепненных субальпийских лугов на месте бывших земледельческих террас и зарастание северных склонов березовым криволесьем. Целью работы является выявление климатической составляющей эти процессов.

ЦЕЛЬ И ПРИНЦИП МЕТОДА

Оценка изменений тепло- и влагообеспеченности территории производилась на основании спутниковых и наземных измерений. Для территории 42–44° с.ш. 42–45.5° в.д. для летнего сезона по спутниковым данным. Использовались данные (https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table), центра LP DAAC NASA: LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER. Все параметры имеют разрешение 0.05 × 0.05° (в среднем 5600 × 5600 м). Дополнительно для района проведения полевых исследований в Цейском и Уаллагкомского ущельях использовались данные NDVI (модель MOD13A3 по спутнику MODIS/Terra) за май–август 2000–2014 гг. с разрешением 1 × 1 км (территория 42,7–43° с.ш. 43,7–44° в.д.).

Вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) применяется в качестве индикатора состояния растительности. Концепция вегетационного индекса базируется на разном отражении радиационных потоков растительным покровом в видимом (0,58–0,68 мкм) диапазоне солнечного спектра (канал K1) и ближнем инфракрасном (0,725–1,10 мкм) диапазоне (канал K2). Разности между оценками отражения в этих каналах с последующей нормировкой на их сумму используются для вычисления NDVI:

$$NDVI = K2 - K1 / K2 + K1 \quad (1)$$

Вегетационный индекс имеет высокую чувствительность к осадкам и коррелирует с запасами зеленой фитомассы. Этот вывод подтверждается исследованиями на засушливых землях умеренных широт Евразии [3, 4].

Индекс вегетационных условий (VCI) определяется следующим образом:

$$VCI_i = 100 (NDVI_i - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}), \quad (2)$$

где $NDVI_i$ – текущее месячное значение i года, а $NDVI_{max}$ и $NDVI_{min}$ – максимальное и минимальное значение NDVI в данной точке, соответственно [5]. Индекс вегетационных условий изменяется от 0 до 100%, отражая изменения погодных условий вегетации от сухих до влажных.

Спутниковый индекс климатических экстремумов (SCEI) – используется для выявления засух и переувлажнения после обильных осадков. Он представляет собой сумму отклонений от многолетнего среднего, NDVI, альbedo, температуры поверхности, нормированных на среднее квадратическое отклонение [6]:

$$SCEI_i = -(\Delta A_i / \sigma A + \Delta T_{si} / \sigma T_s) + (\Delta NDVI_i / \sigma NDVI), \quad (3)$$

где ΔA_i – аномалия альbedo за i год; σA – среднее квадратическое значение альbedo за базовый период; ΔT_{si} – аномалия температуры поверхности за i год; σT_s – среднее квадратическое значение температуры поверхности за базовый период; $\Delta NDVI_i$ – аномалия NDVI за i год; $\sigma NDVI$ – среднее квадратическое значение NDVI за базовый период.

На основании ранее проведенных исследований с использованием индекса вегетационных условий VCI [7], были выбраны два контрастных по степени увлажнения периода начала XXI века. Период 2000–2006 гг. можно характеризовать, как переходный от более влажного – конца XX века (1987–1999 гг.) к засушливому периоду 2007–2013 гг.

По данным метеорологической сети была проведена оценка суммы активных температур (температура воздуха выше +10°C) и осадков для периода современного потепления (1981–2010 гг.) по сравнению с предшествующим периодом (до потепления – 1951–1980 гг.) и отдельно для начала XXI века (2000–2010 гг.). Суммы активных температур и осадков были рассчитаны по данным метеорологической сети климатического архива ВНИИГМИ-МЦД.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вегетационные индексы. Анализ индекса вегетационных условий (VCI), построенных для двух периодов 2000–2006 гг. и 2007–2013 гг. показывает, что для исследуемой территории в первый – более влажный период на большей части территории (на высотах 500–1000 м н. у. м.) отмечаются условия достаточного увлажнения – $VCI > 70\%$. На склонах Большого Кавказа индекс вегетационных условий значительно ниже, его значения составляют 40–60%, что соответствует нормальному увлажнению. Во второй – более засушливый период для южной части ЕТР, ситуация меняется. В

предгорьях увлажнение уменьшается и индекс VCI снижается на 5–10%, а в районах среднегорий и высокогорий он растет на 5–15%. Таким образом, среднегорья и высокогорья во второй период переходят в зону достаточного увлажнения и благоприятных условий вегетации.

Спутниковый индекс климатических экстремумов (SCEI) растет во второй период в зоне среднегорий и высокогорий, где условия из засушливых становятся нейтральными и влажными. Индекс растет на 0,5–1,5 единицы. На остальной территории, и особенно на равнине и в предгорьях – засушливость увеличивается, индекс уменьшается на 0,5–1,5 единицы.

Изменения вегетационного индекса (NDVI) в 2007–2013 гг. по сравнению с 2000–2006 гг. показывают рост вегетационного индекса в горном лесо-лугово-степном, субальпийском и альпийском поясах Большого Кавказского хребта. На остальной территории, и особенно, в районе Скалистого хребта, в предгорьях и на равнине вегетационный индекс уменьшается в начале XXI века.

Для более детального исследования закономерностей изменения вегетационных индексов в районах проведения полевых исследований (Цейское и Уаллагкомское ущелье) использовались данные NDVI с разрешением 1×1 км.

Для этой территории отмечается рост NDVI и улучшение состояния растительности во второй период (2007–2014 гг.) на северном склоне Большого Кавказского хребта, в горно-луговом, субальпийском и альпийском поясах до высот порядка 2800 м н. у. м. Снижение NDVI наблюдается в верхних частях склонов южной экспозиции, оно особенно характерно для Скалистого хребта.

Анализ изменений индекса вегетационных условий (VCI) в начале XXI века показывает рост увлажнения и улучшение условий вегетации в горно-луговом, субальпийском и альпийском поясе (в зоне отступления ледников), приводящее к восстановлению растительности и зарастанию склонов. Значения индекса вегетационных условий в 2007–2014 гг. по сравнению с 2000–2006 гг. увеличиваются на 10–15% и соответствуют нормальному увлажнению. На высотах ниже 1000–1400 м и в районе Скалистого хребта этот индекс уменьшается на 10–15%, что приводит к ухудшению условий вегетации.

Как и для вегетационного индекса можно отметить рост трендов VCI с высотой. Тренд становится положительным на высотах порядка 1400 м н. у. м и достигает максимума в альпийском поясе на высотах 2800–3000 м н. у. м (рисунок 1).

В Цейском ущелье максимальные тренды VCI наблюдаются на южных склонах от среднегорного до альпийского пояса, а Уаллагкомском ущелье – в горно-лугово-степных ландшафтах на южных склонах, и в березовом криволесье на северных склонах.

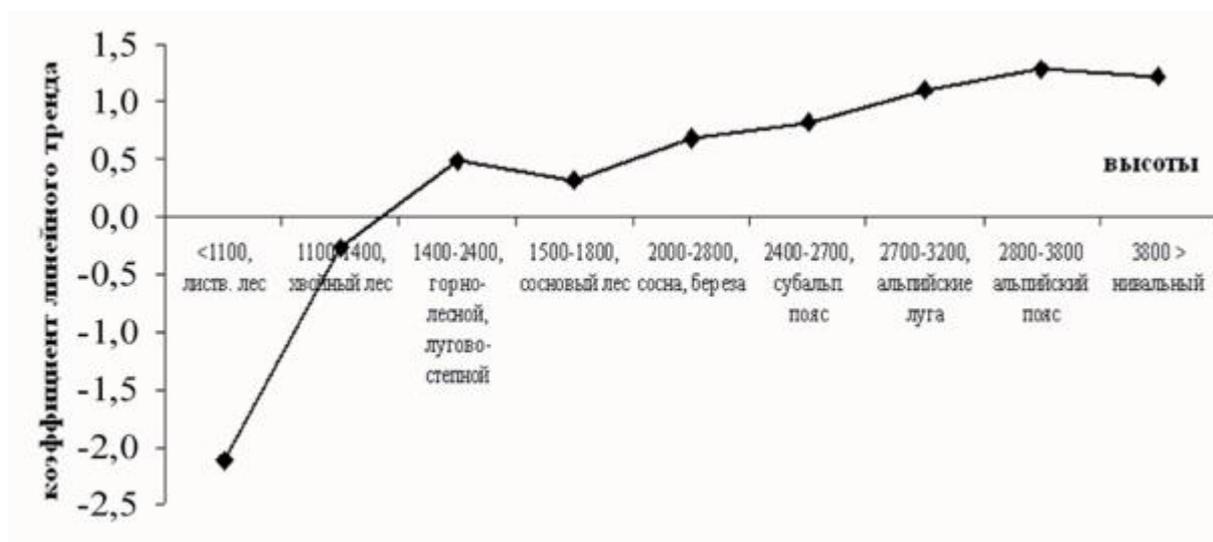


Рисунок 1– Изменение линейного тренда индекса вегетационных условий (VCI) с высотой (2000–2014 гг.)

Метеорологические параметры. По данным метеорологической сети была проведена оценка суммы активных температур (температура воздуха выше $+10^{\circ}\text{C}$) и осадков для периода современного потепления (1981–2010 гг.) по сравнению с предшествующим периодом (до потепления – 1951–1980 гг.) и отдельно для начала XXI века (2000–2010 гг.). При потеплении климата, на рассматриваемой территории наблюдается рост суммы активных температур на $100\text{--}150^{\circ}\text{C}$, как для

равнинных станций, так и для станций, расположенных в среднегорье. В начале XXI века увеличение суммы активных температур продолжилось, причем более активное на востоке территории и для станций, расположенных в среднегорье. Продолжительность периода активной вегетации увеличилась на 3–7 дней. Также в период современного потепления климата, и особенно, за последнее десятилетие практически на всей территории наблюдается увеличение сумм осадков, как в целом за год, так и в летний период. Таким образом, в горных районах Северного Кавказа изменения климатических условий, а именно, потепление, удлинение вегетационного периода и увеличение сумм осадков благоприятствует восстановлению растительности.

Изменения ландшафтов. В межгорных котловинах Северного макросклона Большого Кавказа формируется специфический микроклимат. В пределах котловин происходит перераспределение тепла и влаги по склонам различной экспозиции. В результате лесная растительность распространяется только на влажных северных и западных склонах. На хорошо прогреваемых сухих склонах южной и восточной экспозиций развиваются травяные сообщества горных степей и остепненных лугов.

Основные массивы травяных экосистем лесо-лугово-степного пояса в межгорных котловинах распаивались в течение многих столетий. Постепенное забрасывание пашни и трансформация ее в пастбищно-сенокосные угодья в документально датированных случаях позволяет предполагать, что длительность формирования современного растительного покрова в этом высотном поясе составляет 50–100 лет в зависимости от удаления от селений [8].

Динамика растительных покровов хорошо согласуется с тенденциями изменения спутниковых вегетационных индексов. Улучшение условий вегетации (VCI) и рост вегетационного индекса (NDVI) отмечаются практически для всех ландшафтов, кроме типичной горной степи, расположенной на сильно эродированных при выпасе крутых склонах, где развивается разреженный степной покров. На таких участках мы наблюдаем уменьшение индекса вегетационных условий (VCI). Линейный тренд VCI также отрицательный.

Для лесо-лугово степного, субальпийского и альпийского поясов в начале XXI века характерны положительные тренды индексов VCI и NDVI и увеличение этих индексов в 2007–2014 гг., по сравнению с 2000–2006 гг., свидетельствующие об улучшении условий вегетации. Это подтверждается расширением горно-лесных массивов, которое происходит в основном от верхних к нижним частям склонов, и пока затрагивает только послелесные разнотравно-злаковые луга, которые использовались преимущественно как сенокосы еще лет 20 назад (рисунок 2). В субальпийском и альпийском поясах также наблюдается значимый рост вегетационного индекса (NDVI) и индекса вегетационных условий (VCI), и максимальные положительные тренды этих индексов, говорящие, об улучшении условий произрастания травянистой растительности. Расширение альпийского пояса происходит также за счет зарастания склонов, освободившихся в результате таяния ледников.



Рисунок 2 – Зарастание склонов, которые раньше использовались в сельском хозяйстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В начале XXI века наблюдается рост суммы активных температур и увеличение осадков, которое неоднозначно проявляется в разных высотных поясах. В предгорьях и до высот порядка 1000 м над уровнем моря отмечается увеличение засушливости и ухудшение условий вегетации. В зоне среднегорий и выше происходит рост увлажнения и улучшение условий вегетации.
2. В горно-луговом, субальпийском и альпийском поясе наблюдается улучшение вегетационных условий, приводящее к восстановлению зонально-обусловленного растительного покрова и облесению склонов. На высотах ниже 1000–1400 м, и на равнине отмечается ухудшение условий вегетации и рост засушливости. Значимые тренды вегетационного индекса (NDVI) и индекса вегетационных условий (VCI) становится положительным на высотах порядка 1400 м н. у. м и достигают максимума в альпийском поясе на высотах 2800–3000 м н. у. м.
3. Климатические изменения и ослабление хозяйственной деятельности на рассматриваемой территории действуют однонаправленно и будут способствовать восстановлению растительности в зоне среднегорий и высокогорий и, в частности горно-луговых ландшафтов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Асоян Д.С., Белоновская Е.А., Чернавская М.М. 2013. Межгорные котловины Северной Осетии-Алании. Известия РАН. Сер. геогр. 3, 71–85.
- [2] Грачева Р.Г., Белоновская Е.А. 2010. Современное состояние пасторальных экосистем Центрального Кавказа. Известия РАН. Сер. геогр. 1, 90–102.
- [3] Золотокрылин А.Н., Коняев К.В., Титкова Т.Б. 2000. Зависимость между аномалиями индекса вегетации и месячных сумм осадков в зоне умеренного и недостаточного увлажнения // Исследование Земли из Космоса. 6, 74–78.
- [4] Kogan F.N. 1997. Global Drought Watch from Space. Bulletin of the American Meteorological Society. 78, 621–636.
- [5] Kogan F.N. 1987. Vegetation index for areal analysis of crop conditions. In Proceedings of the 18th Conference on Agricultural and Forest Meteorology. American Meteorological Society, West Lafayette, Indiana. 103–107.
- [6] Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. 2011. Новый подход к мониторингу очагов опустынивания. Аридные экосистемы. 17, 3(48), 14–22.
- [7] Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. 2010. Исследование засухи на юго-востоке Европейской России в конце XX – начале XXI века по спутниковым данным. ПЭММЭ 2010. XXIII, 128–137.
- [8] Грачева Р.Г., Белоновская Е.А., Шоркунов И.Г. 2014. Преобразованные ландшафты Центрального Кавказа. Геоморфологи. 5, 78–93.

Глава III/46: ЭКСПАНСИЯ АГРОЛАНДШАФТА И СОСТОЯНИЕ ОСНОВНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ТЕРРИТОРИИ СИНЬЦЗЯН-УЙГУРСКОГО АВТОНОМНОГО РАЙОНА КНР (БАССЕЙНЫ РЕКИ ИЛЕ И ОЗЕРА ЭБИ-НУР) ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ СЪЁМКИ 1990-2017 гг.

Chapter III/46: Expansion of Agro-Landscape and State of Main Water Objects in the Territory of the Xinjiang Uygur Autonomous Region of China (Basins of River Ile and Lake Ebi-Nur) during 1990-2017 on the Base of Satellite Data

Алексей Терехов*^{1,2}; Максат Калимолдаев¹; Иван Пак¹; Светлана Долгих²

DOI 10.25680/5480.2018.56.20.239

*Эл. Почта: aterekhov1@yandex.ru

1. Институт информационных и вычислительных технологий, ул. Пушкина 125, 050010 Алматы, Казахстан

2. РГП Казгидромет, проспект. Абая 32, 050022 Алматы, Казахстан

РЕЗЮМЕ. На основе спутниковых данных LANDSAT 5,7,8 (447 сцен периода 1990-2017 гг.) разработаны методики и проведён мониторинг территории Синьцзян-Уйгурского автономного района КНР, относящейся к бассейнам трансграничной реки Иле (КНР-Казахстан) и оз. Эби-Нур (КНР). Целями мониторинга являлись: анализ экспансии агроландшафта в межгорных долинах, запас воды в озере Эби-Нур и основных водохранилищах на притоках реки Иле (КНР) (Капшагайское на р. Текес и Жарынтайское на р. Каш). Спутник регистрирует, примерно 3-8 % годовой рост площади пашни в бассейнах оз.Эби-Нур и реки Иле. Изменение размера озера Эби-Нур согласовано с динамикой всей Балхаш-Алакольской озерной системой. Рост площади озёрной системы в последние 20 лет указывает на существование текущего климатического тренда на увеличение объёма речного стока в хребтах Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня. Сочетание мониторинга размеров водного зеркала с 3-D моделью рельефа местности (SRTM-2000 Elevation) даёт возможность осуществлять оперативный мониторинг запаса воды в резервуарах, диагностировать водность сезона и особенности антропогенного водопотребления.

Abstract. On base of 447 scenes of LANDSAT-5,7,8 dated 1990-2017 years the monitoring of the territory of Xinjiang-Uighur Autonomous Region CHINA was carried out. The monitoring area belongs to the basins of the trans-boundary river Ile (Kazakhstan and China) and lake Ebi-Nur (China). The monitoring objectives were: the agricultural landscape expansion and water deposit estimation in Ebi-Nur Lake and main river Ile basin reservoirs (Kapchagai reservoir – river Tekes and Zharyntai one's – river Kas). The satellite registered about 3-8 % annual growth of arable land in the basins of Lake Ebi-Nur and the river Ile basin. The change of the Lake Ebi-Nur area is coordinated with dynamics of the entire Balkhash-Alakol Lake System. The growth of the area of this lake system in the last 20 years indicates the current climate trend leading to an increase of river runoff in the ranges of the Central and Inner Tien Shan. The combination of the monitoring of the reservoir's water surface with a 3-D terrain model (SRTM-2000 Elevation) enables to carry out operational monitoring of water deposit, to diagnose the season water availability and the characteristics of the anthropogenic water consumption.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трансграничные водные ресурсы, спутниковые данные, агроландшафт, картирование пахотных земель, площадь водного зеркала, запас воды в водохранилище

Keywords: transboundary water resource, satellite data, agro-landscape, arable land mapping, water level area, water deposit in reservoirs

ВВЕДЕНИЕ

Климатический дефицит воды в бассейнах трансграничных (Казахстан-КНР) рек (р. Иле [годовой сток на границе -12 куб. км] и р. Кара-Ертис [9 куб. км]) делает весьма актуальным вопрос межгосударственного вододелия. Территория КНР, относится к верховьям речных бассейнов, что даёт ей географическое преимущество при вододелии. Трансграничные водные ресурсы могут использоваться в КНР не только в рамках бассейнов соответствующих рек, но и для обводнения соседних, «зависимых территорий», куда вода может поступать с помощью каналов и водоводов. Основные изменения землепользования в КНР связанные с водными ресурсами, это трансгрессия агроландшафтов (поливная пашня) и регулирование речного стока с помощью водохранилищ. В связи с этим многолетний спутниковый мониторинг параметров землепользования и состояния

водных объектов на сопредельной территории СУАР КНР имеет высокую востребованность в вопросах информационной поддержки двусторонних (Казахстан-КНР) переговоров по водodelению трансграничных водных ресурсов.

ЦЕЛЬ

Диагностика состояния водных объектов и объёмов сельскохозяйственного водопотребления на территории СУАР КНР, в рамках бассейнов трансграничных рек и зависимых территорий, а также её многолетние изменения являются целями данной работы. Спутниковые снимки представляют собой практически единственный источник объективной информации о развитии сельского хозяйства и параметрах регулирования речного стока трансграничных ресурсов на территории КНР в условиях ограниченного доступа к наземной информации.

ПРИНЦИП И ПРОЦЕДУРА

Спутниковые данные LANDSAT 5,7,8 (пространственное разрешение 30 м); доступные на свободной основе на интернет ресурсах USGS [<https://glovis/usgs/gov>] имеют наиболее глубокий архив (с 1983 года). Технические характеристики этих многозональных снимков достаточны для детального анализа некоторых параметров сельскохозяйственного землепользования [1,2] и мониторинга размера водных зеркал [3]. Сельскохозяйственное землепользование (растениеводство) организуется через систему полей, спектральные характеристики которых в ключевые периоды времени существенно отличаются от других типов подстилающей поверхности. В СУАР КНР практикуются достаточно крупные поля, картирование которых может эффективно осуществляться на базе спутниковой съёмки LANDSAT 5,7,8 с разрешением 30 метров. Решение задачи картирования пахотных земель основывалось на стандартных методах неконтролируемой классификации (ISODATA) с дополнительным экспертным контролем [3]. Задача мониторинга размера водных зеркал озёр и водохранилищ методически близка к задаче картирования пахотных земель. Отличием является то, что спектральные характеристики водной поверхности всегда существенно отличаются от других типов подстилающей поверхности. Компенсация атмосферных помех, в ряде случаев, также требует экспертного вмешательства. При наличии батиметрической информации (модель 3D рельефа местности [SRTM-2000 Elevation] до начала строительства водохранилища) размер водного зеркала водохранилища однозначно определяет текущий запас воды в нём. Спутниковые данные системы LANDSAT-7,8 с 8-дневным периодом обновления позволяют детально восстанавливать сезонный режим работы водохранилищ, который в свою очередь тесно связан с водностью года. Информация по водности сезона на территории КНР исключительно важна для оптимизации работы водохранилищ в Казахском секторе бассейна р. Иле.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Четырёхкратное покрытие спутниковой съёмкой LANDSAT (1993, 2003, 2010, 2016 гг.) китайской части бассейна р. Иле (сцена WRS-2: 146x30) и бассейна оз. Эби-Нур (сцена WRS-2: 146x29) позволило провести картирование пахотных земель и оценить темпы экспансии агроландшафта (поливная пашня) за период 1993-2016 гг. (Рисунок 1). Регистрируются высокие темпы освоения и ирригации целинных земель, около 3-8% в год, за период 2003-2016 гг. При этом, более высокие темпы роста площади поливной пашни наблюдаются в бассейне оз. Эби-Нур (8.1%), имеющем ограниченные собственные водные ресурсы, в отличие от долины р. Иле (2.7%), где отсутствует дефицит воды.

Многолетняя (1990-2016 гг.) динамика размера оз. Эби-Нур диагностировалась на основе 254 снимков LANDSAT (сцена WRS-2: 146x29). В целом, многолетний режим озера Эби-Нур схож с режимом озера Балхаш (крупнейшее озеро региона, площадь зеркала около 18 тыс. км²). Оба озера относятся к Балхаш-Алакольской озерной системе. Многолетний тренд на рост размера, существующий у оз. Балхаш, вероятно, компенсирован возрастающей антропогенной нагрузкой (поливная пашня) у оз. Эби-Нур, (Рисунок 2). Тем не менее, представляется весьма вероятным, что в настоящее время имеет место рост объёмов речного стока в приграничных к Казахстану горных хребтах Внутреннего Тянь-Шаня, расположенных на территории СУАР КНР.

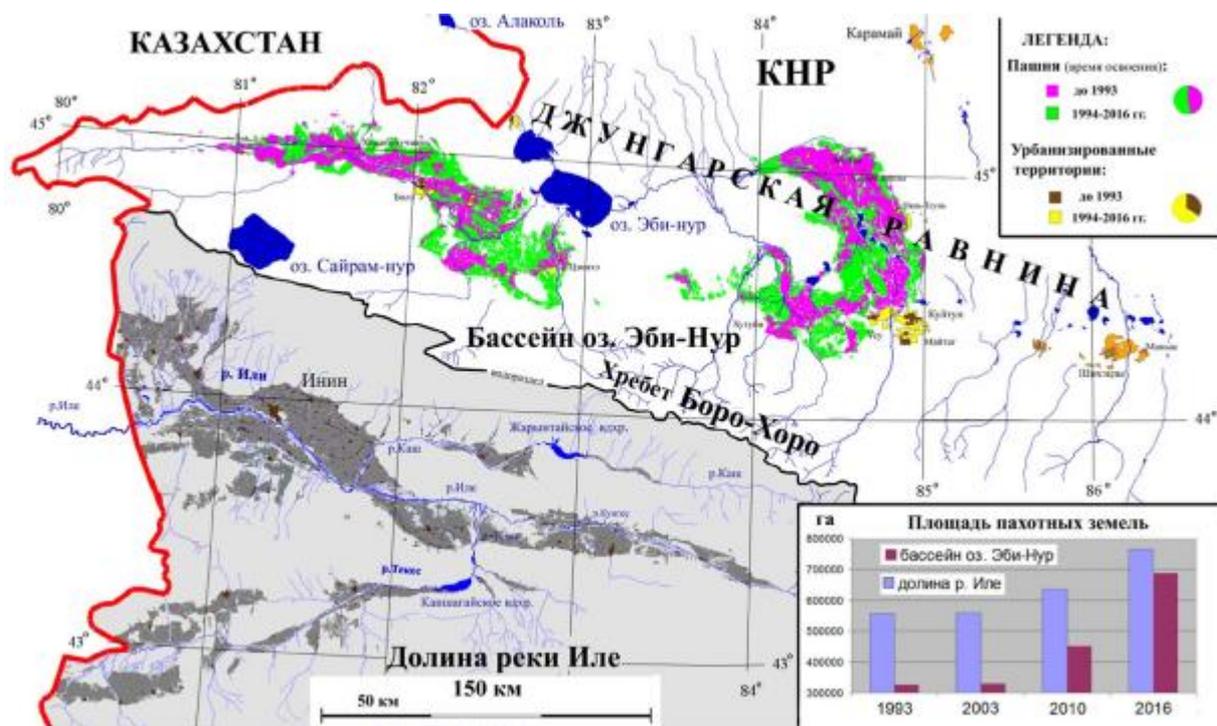


Рисунок 1 - Картосхема расположения пахотных земель на сопредельных с Казахстаном территориях СУАР КНР (бассейн оз. Эби-Нур и китайская часть бассейна р. Иле). Построено на основе спутниковых данных LANDSAT.

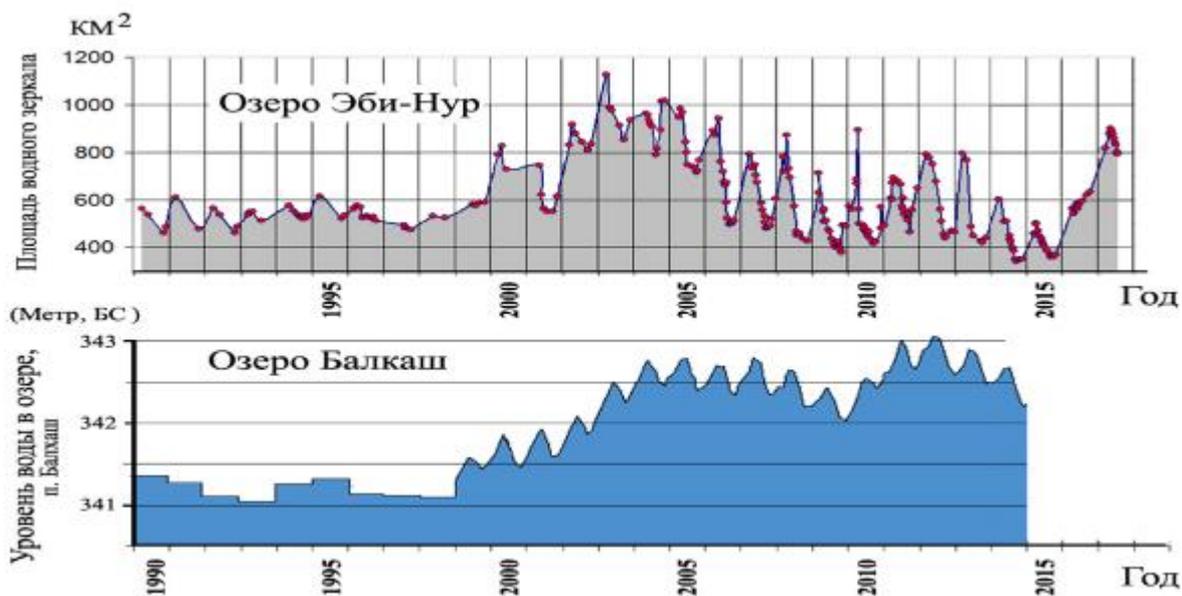


Рисунок 2 - Динамика наполненности двух озёр Балкаш-Алакольской системы (оз. Эби-Нур [КНР] и оз. Балкаш [Казахстан]) в период 1990-2017 гг. Оз. Эби-Нур – спутниковые оценки площади зеркала; оз. Балкаш – уровень воды в пос. Балкаш.

Спутниковый мониторинг площади водных зеркал доминирующих водохранилищ китайского сектора бассейна реки Иле (Капшагайское на р. Текес и Жарынтайское на р. Каш) за период 2007-2017 годов на основе 191 снимка LANDSAT (сцена WRS-2: 146x30), позволил оценить параметры взаимодействия (объём обмена водой) между водными резервуарами и речным стоком. Регулирование стока трансграничной р. Иле на территории Китая с помощью водохранилищ на основных её притоках (р.Каш и р.Текес) имеет два аспекта. Первый, связан с изменением гидрографа рек Каш и Текес [4]. Второй, с сезонными режимами заполнения и сбрасывания водохранилищ. Опе-

ративные оценки запаса воды в рабочих частях водохранилищ, приведенные экстраполяцией к суточным данным, дают ценную информацию о водности сезона в китайской части бассейна р. Иле (Рисунок 3).

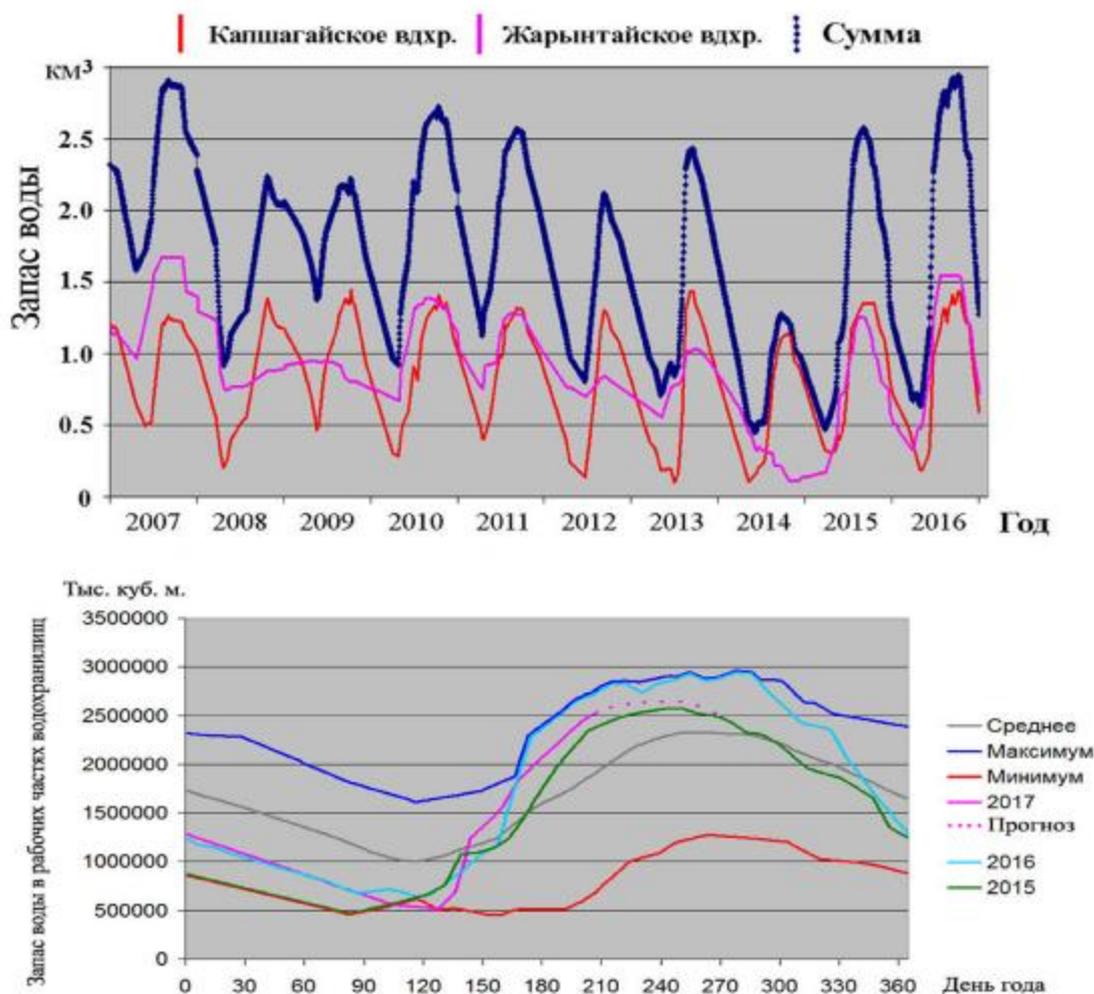


Рисунок 3 - Запасы воды в рабочих частях доминирующих водохранилищ китайского сектора бассейна р. Иле (Капшагайское [р.Текес] и Жарынтайское [р.Каш]) в период 2007-2017 гг. Построено на основе спутниковых данных LANDSAT.

ВЫВОДЫ

Многолетний спутниковый (LANDSAT) мониторинг, с высокой частотой (20-40 покрытий в год), сопредельных территорий СУАР КНР, в том числе в рамках трансграничных речных бассейнов, даёт основу для диагностики, как сельскохозяйственного сектора (площадь поливной пашни и её изменения), так и ряда гидрологических параметров. В первую очередь это касается, наполненности озёр и водохранилищ. В оперативном плане эта информация важна для понимания уровня сезонной водности трансграничной реки, и соответственно оптимизации работы гидротехнических объектов на территории Казахстана. В долгосрочном аспекте, интересен уровень экономического развития сопредельных территорий, его изменения в течение последних лет, и связанная с этим нагрузка на водные ресурсы. Эта информация важна для вопросов, связанных с процессом согласования межгосударственного (Казахстан – КНР) деления трансграничных водных ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Существующая в USGS инфраструктура спутникового LANDSAT мониторинга и свободного Интернет доступа к этой архивной/оперативной информации позволяет любым пользователям решать широкий круг задач, связанных с изменениями на подстилающей поверхности Земли, вызванными климатической изменчивостью и антропогенными причинами.

2. Спутниковый мониторинг территории СУАР КНР указывает на 3-8% годовой рост площадей поливной пашни в течение последних 14 лет. Наполненность оз. Эби-Нур находится под влиянием двух разнонаправленных факторов. Первый, текущая климатическая изменчивость в регионе, направлена на рост объёмов стока горных рек Тянь-Шаня. Вторая – рост водозабора на ирригацию с/х угодий, расположенных в его бассейне.
3. Спутниковый мониторинг водохранилищ в бассейне р. Иле позволяет оценивать текущие запасы воды в рабочих частях и диагностировать водность сезона.
4. Многолетний спутниковый мониторинг является эффективным инструментом оценки разномасштабных по времени процессов, характеризующих водообеспеченность территорий, от многолетней трансгрессии агроландшафтов, до сезонной динамики запаса воды в водохранилищах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kraemer, R., Prishchepov, A., Dara, A., Kuemmerle, T., Müller, D., Radeloff, V., Terekhov, A., Frühauf, M. Long-term agricultural land-cover change and potential for cropland expansion in the former Virgin Lands area of Kazakhstan// *Environ. Res. Lett.*10(2015) 054012
- [2] Fritz, S., See, L., McCallum, I., You, L., Bun, A., Albrecht, F., Schill, C., Perger, C., Duerauer, M., Havlik, P., Mosnier, A., Thornton, P., Wood-Sichra, U., Herrero, M., Becker-Reshef, I., Justice, Ch., Hansen, M., Gong, P., Abdel Aziz, S., Cipriani, A., Cumani, R., Cecchi, G., Conchedda, G., Ferreira, S., Gomez, A., Haffani, M., Kayitakire, F., Malanding, J., Mueller, R., Newby, T., Nonguierma, A., Olusegun, A., Ortner, S., Ram, R., Rocha, J., Schepaschenko, D., Schepaschenko, M., Terekhov, A., Tiangwa, A., Vancutsem, Ch., Vintrou, E., Wenbin, W., van der Velde, M., Dunwoody, A., Kraхner, F., Obersteiner, M. Mapping Global Cropland and Field Size// *Global Change Biology* (2015) 21, PP.1980-1992, doi:10.1111/gcb.12838
- [3] Терехов, А., Пак, И., Долгих С. Данные LANDSAT 5,7,8 и ЦМР в задаче мониторинга Капчагайского водохранилища на реке Текес (Китайская часть бассейна р. Иле) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* - 2015. -Т.12.- №6 . - С.174-182.
- [4] Терехов, А., Долгих, С., Никифорова Л. Китайский сектор бассейна р. Иле: спутниковая диагностика изменений гидрографа реки Текес в результате строительства в 2006 году Капчагайского водохранилища (КНР) // *Гидрометеорология и Экология* – 2016. - №4 (83).- С.24-31.

Глава III/47: РАЗВИТИЕ МЕТОДА ДИСТАНЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ И КЛАССИФИКАЦИИ АКВАЛАНДШАФТОВ

Chapter III/47: Development of a Method of Remote Spectrometry for Assessing the State of Aquatic Ecosystems and Classification of Aquatic Landscapes

Борис Л. Сухоруков*^{1,2}, Николай В. Решетняк²

DOI 10.25680/9000.2018.56.65.240

*Эл. Почта: bls-phys@yandex.ru

1. Институт водных проблем РАН, Гидрохимический отдел, просп. Стачки, 198, 344090 Ростов-на-Дону, Россия

2. Гидрохимический институт, просп. Стачки, 198, 344090 Ростов-на-Дону, Россия

РЕЗЮМЕ. Гиперспектральная аппаратура, устанавливаемая на природоресурсных спутниках Земли, позволяет получать спектры подстилающей поверхности со спектральным разрешением около 1 нм. Для разработки корректной процедуры атмосферной коррекции спутниковой информации требуется сравнение спектральных характеристик различных ландшафтов с верхнего (спутникового) и нижнего (с высоты от метров до десятков метров) уровней. С этой целью представлены спектры коэффициентов спектральной яркости (СКСЯ) нижнего уровня для ряда водных объектов Европейской части России в диапазоне длин волн 420–750 нм с высоким разрешением. Дано объяснение спектральных особенностей СКСЯ в понятиях оптически активных (видимых) компонентов водной экосистемы: минеральных взвешенных веществ, растворенных органических веществ, фитопланктона, фикоцианина. Предложена типизация аквальных ландшафтов и их фаций по форме СКСЯ. СКСЯ нижнего уровня для различных водных объектов являются самоценной информацией для ландшафтоведения.

Abstract. A hyperspectral apparatus, mounted at natural-resource observing satellites, provides spectra of the underlying surface with a spectral resolution of about 1 nm. In order to develop the correct procedure for the atmospheric correction of satellite data a comparison of spectral characteristics of different landscapes from the top (satellite) and the bottom (the height from meters to tens of meters) layers has to be done. With this purpose the bottom layer high resolution spectra of coefficients of spectral brightness (SCSB) for the water bodies of European part of Russia in the wavelength range from 420 to 750 nm are presented. The spectral features of SCSB are explained in terms of optically active (visible) components of aquatic ecosystems: mineral suspended solids, dissolved organic substances, phytoplankton, and phycocyanin. The typology of aquatic landscapes and their facies is proposed basing on the form of SCSB. The bottom layer SCSB for various water bodies provide valuable information for landscape studies.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционная спектрометрия, аквальные ландшафты, экосистема, Европейская часть России

Keywords: remote sensing spectrometry, aquatic landscapes, ecosystem, European Russia

ВВЕДЕНИЕ

Развитие приборной базы дистанционной спектрометрии (ДС), как и развитие методов интерпретации спектрометрической информации позволяет использовать данные ДС в различных областях науки, в том числе и физической географии. Очевидно, что появление гиперспектральной аппаратуры, устанавливаемой на специализированных природоресурсных спутниках Земли, дает дополнительную возможность разделять объекты физической географии на классы по их спектральным свойствам. Особое место занимает проблема изучения аквальных ландшафтов, до настоящего времени еще не решенная [1, 2]. Но технические трудности, связанные с обработкой спутниковой информации, подверженной мешающему влиянию атмосферы, еще не преодолены. Поэтому перспективным направлением изучения аквальных комплексов является изучение их спектральных свойств дистанционно, но на нижнем уровне, с высоты от метров до десятков метров, в видимом диапазоне со спектральным разрешением около 1 нм.

ЦЕЛЬ МЕТОДА

Водные объекты (ВО), входящие в геостемы и экосистемы, являются предметом изучения и географов и экологов. Но, если вопросам изучения состояния водных экосистем или качества воды с точки зрения экологов, гидрохимиков, лимнологов, посвящено большое количество работ, то, насколько нам известно, работ, посвященных систематизации аквальных ландшафтов, чрезвычайно мало. Изучение аквальных природных комплексов дает во многом разрозненные сведения, нуждающиеся в их систематизации [1, 3]. Поэтому в настоящей работе вниманию географов предложена спектрометрическая информация, полученная на различных ВО, показывающая изменчивость спектральных свойств крупных рек, как в течение гидрологического года, так и при перемещении измерительной аппаратуры по их сечению.

ПРИНЦИП И ПРОЦЕДУРА

Принцип работы большинства современных спектрометров аналогичен. Солнечный свет попадает на подстилающую поверхность (природную геосистему). Преобразованный за счет различных взаимодействий со всеми элементами геосистемы (рассеяние, поглощение) свет формирует поток восходящего излучения. Через объектив и приемную щель это излучение попадает на диспергирующий элемент спектрометра – дифракционную решетку. Разложенный в спектр свет регистрируют многоканальным детектором. Число каналов спектрометров может изменяться от 512 до 2048. Качество получаемой информации определяется качеством дифракционной решетки (количеством штрихов на миллиметр) и количеством каналов детектора. Для всех подобных спектрометров спектральное разрешение меньше 1 нм, и «избыточно» для экосистемных исследований.

В качестве измерительной информации нами использованы нормализованные спектры коэффициентов спектральной яркости (СКСЯ). По определению, коэффициент яркости $r(m, m_0, \gamma)$ равен отношению интенсивности отраженного света $I(m, m_0, \gamma)$ к интенсивности света, рассеянного ортотропной абсолютно белой площадкой, расположенной на верхней границе рассеивающего слоя, равной $E_0 \rho$ [4]:

$$r(m, m_0, \gamma) = \frac{I(m, m_0, \gamma)}{\rho \times E_0} \quad (1)$$

Здесь $m = \cos J$, $m_0 = \cos J_0$, J, J_0, γ – соответственно полярные и азимутальный углы, определяющие условия распространения падающего под углом J_0 светового пучка.

С другой стороны, СКСЯ зависит от концентраций, C_i , оптически активных (видимых) компонентов, изменяющих комплексный показатель преломления водной среды, где индекс i принимает значения мв – минеральные взвешенные вещества, ров – растворенные органические вещества, фп – фитопланктон, фц – фикоцианин.

Из литературных данных известно, что форма СКСЯ ВО изменяется при различном соотношении видимых компонентов. При увеличении $S_{фп}$ красный максимум смещается от 695 нм до 710 нм и более [5]. Оранжевый минимум на длине волны около 620 нм свидетельствует о появлении в водной среде синезеленых микроводорослей фитопланктона, содержащего фикоцианин [6]. Большое количество $S_{мв}$ приводит к смещению главного максимума СКСЯ с 510 нм до 560 нм и даже до 580 нм и его «размытию». Растворенное органическое вещество поглощает в синей области спектра и понижает СКСЯ в этой области.

Для решения задач систематизации и классификации СКСЯ не требуется выполнять абсолютные измерения. Достаточно измерять яркость восходящего от подстилающей поверхности излучения по отношению к яркости эталона – горизонтально расположенной ортотропно рассеивающей пластины. Эталон может быть изготовлен из молочного стекла или баритованной бумаги. Сравнение спектров яркости рассеянного от этих материалов солнечного света с аналогичным спектром от спрессованной из $BaSO_4$ таблетки, показало их незначимое спектральное отличие в исследуемой нами области 420–750 нм.

В нашем подходе состояние экосистемы определяется именно формой СКСЯ [7]. Такой качественный подхода обусловлен смещением максимумов и минимумов СКСЯ в процессе развития биоты водной экосистемы. Соотношение же максимумов и минимумов на одном СКСЯ вполне достаточно для характеристики состояния и экосистемы, и геосистемы в целом.

АППАРАТУРА

Наиболее технически совершенный портативный спектрометр, по-видимому, USB2000 фирмы Ocean Optics или его обновленная версия USB2000+. Кроме того, можно указать спектрометры AvaSpec-2048, спектральный диапазон 200–1100 нм или S41 фирмы LaserLS спектральный диапазон 390–810 нм, использованный нами при получении представленной информации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведем СКСЯ нескольких ВО Европейской части России, обладающих известными свойствами: рр. Дон, Волга, Кубань, Цимлянского водохранилища. Известно, что по химическим показателям в верхнем течении р. Волга содержание растворенных органических веществ повышено. В р. Кубань за счет впадения большого числа притоков, сформированных ледниковыми реками, чрезвычайно высоко содержание минеральных взвешенных веществ. Глубина нижнего бьефа Цимлянского водохранилища более 20 м, водообмен водохранилища намного меньше, чем рек, следовательно, за счет процессов седиментации вода в глубоководной части водохранилища содержит значительно меньше чем в реках количество минеральных взвешенных веществ. Река Дон – типичная равнинная река с невысокой скоростью течения.

Зная особенности формирования КСЯ, проанализируем информативность СКСЯ, представленных на рис.1.

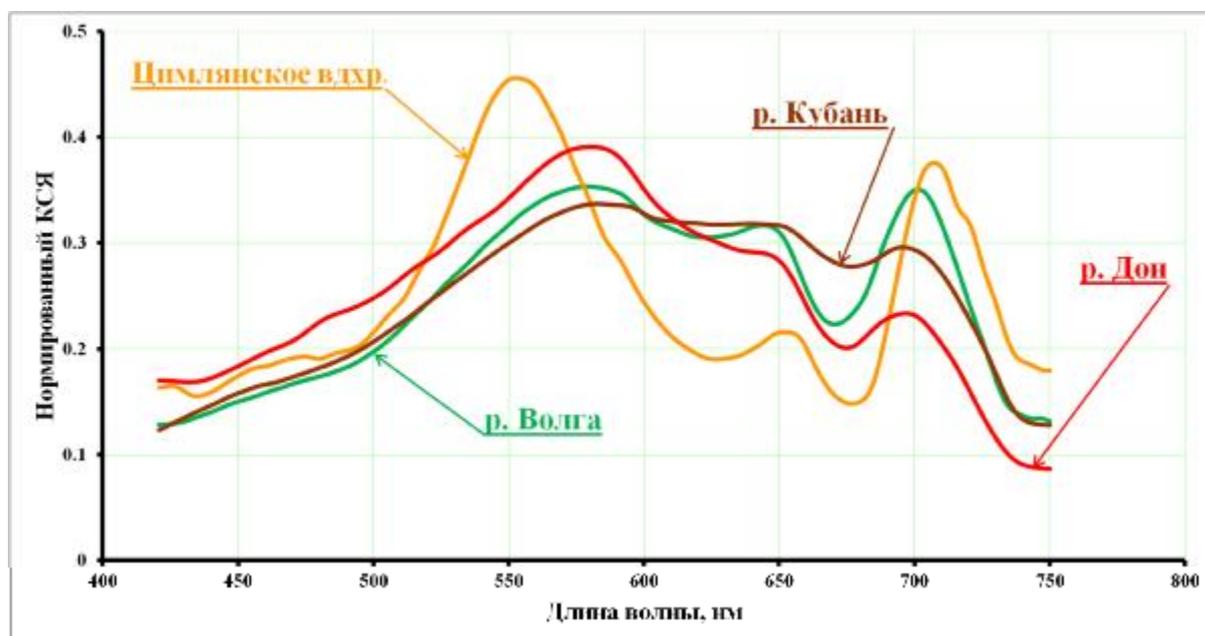


Рисунок 1 – СКСЯ различных водных объектов юга Европейской части России

Главный резкий максимум СКСЯ Цимлянского водохранилища смещен в коротковолновую сторону до 510 нм, что указывает на малое $S_{мв}$. Красный максимум, на длине волны более 700 нм, указывает на высокое содержание фитопланктона [5]. Минимум на длине волны около 630 нм, указывает на значительное количество в водной экосистеме фикоцианина $S_{фц}$ [6] и, как следствие, на появление синезеленых микроводорослей. Следовательно СКСЯ «типа Цимлы» характеризует геосистему потенциально токсичную (высокое $S_{фц}$) с малым содержанием $S_{мв}$ и высоким $S_{фп}$.

Размытый, куполообразный главный максимум на СКСЯ р. Кубани указывает на высокое значение $S_{мв}$. Неявно выраженный максимум на длине волны около 695 нм говорит о невысоких значениях $S_{фп}$ – это своеобразная водная геосистема «типа Кубань» с практически отсутствующей биотической составляющей.

Форма СКСЯ р. Волга указывает на повышенное $S_{ров}$: коротковолновая «синяя» часть ниже всех остальных спектров. На высокое содержание $S_{фп}$ указывает максимум на длине волны 700 нм, $S_{фц}$ также велико, о чем можно заключить по появлению минимума на длине волны около 620 нм. На достаточно высокое $S_{мв}$ указывает размытый главный максимум на длине волны около 570 нм: геосистема «типа Волга».

По форме СКСЯ р. Дон можно отметить невысокое S_{mb} , заметное содержание фитопланктона в котором в это время, чрезвычайно мало содержание синезеленых. Геосистема «типа Дон» незначительно отличается от предыдущей, но меньшее S_{mb} и более высокое S_{rov} позволяют их различать по форме СКСЯ.

На примере р. Дон показано изменение характерных для различных ВО особенностей СКСЯ в течение гидрологического сезона (рис.2).

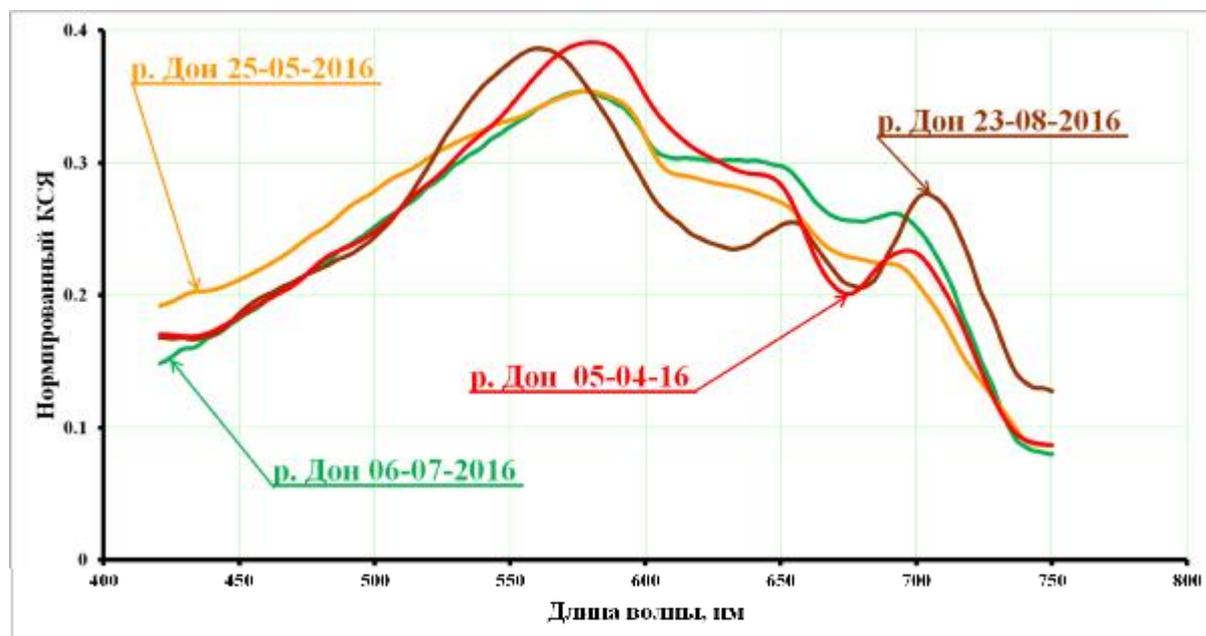


Рисунок 2 –СКСЯ р. Дон в различные гидрологические сезоны

В апреле наблюдается бурное развитие фитопланктона, но в его составе отсутствуют синезеленые микроводоросли (отсутствует минимум на длине волны около 620 нм). Затем количество фитопланктона существенно уменьшается (СКСЯ от 25.05). Увеличение S_{fp} и появление синезеленых отмечено 06.07. Цветение синезеленых наблюдается 23.08. В этот период времени геосистему можно отнести к геосистеме «типа Цимла», но более широкий главный максимум позволяет отличить СКСЯ этих ВО. В октябре форма СКСЯ (на рис не приведен) становится аналогичной по форме СКСЯ от 25.05.

Еще более впечатляющие результаты дает спектрометрическая съемка реки по ее сечению. На рис.3 представлено схематичное изображение нормализованных СКСЯ, измеренных с мостового перехода через р. Дон. Высота съемки на всем протяжении была около 30 м.

На рис. 3 «г» представлен СКСЯ вод «типа Дон», мутных продуктивных, в период летнего развития водной экосистемы. Относительно резкий максимум на длине волны около 560 нм, указывает на небольшое количество минеральных взвешенных веществ, S_{mb} – мало. Более высокое S_{mb} отражают СКСЯ на рис. 3 «в». Видно, что съемку выполняют в период развития фитопланктона и появления синезеленых микроводорослей. На рис. 3 «е» и 3 «ж» представлены СКСЯ поверхностей, на которых отсутствует и вода и растительность (максимальное значение КСЯ на длине волны 750 нм). Промежуточные состояния геосистемы представлена на СКСЯ на рис 3 «б», это спектральное изображение ветлэндов. Соответственно, СКСЯ такого типа можно отнести к аквафации «типа ветлендов. На рис. 3 «а» и 3 «д» представлены СКСЯ практически «чистой» растительности, но специфические особенности в области длин волн около 560 нм указывают на то, что эта растительность содержит в себе значительное количество воды: аквафация «водной растительности».

Таким образом, спектрометрическая информация, полученная на различных участках геосистем, включая водные экосистемы, чрезвычайно разнообразна и может быть использована для описания особенностей аквальных ландшафтов и их классификации. Спектрометрическая информация высокого разрешения может быть рекомендована в качестве инструмента изучения геосистем.

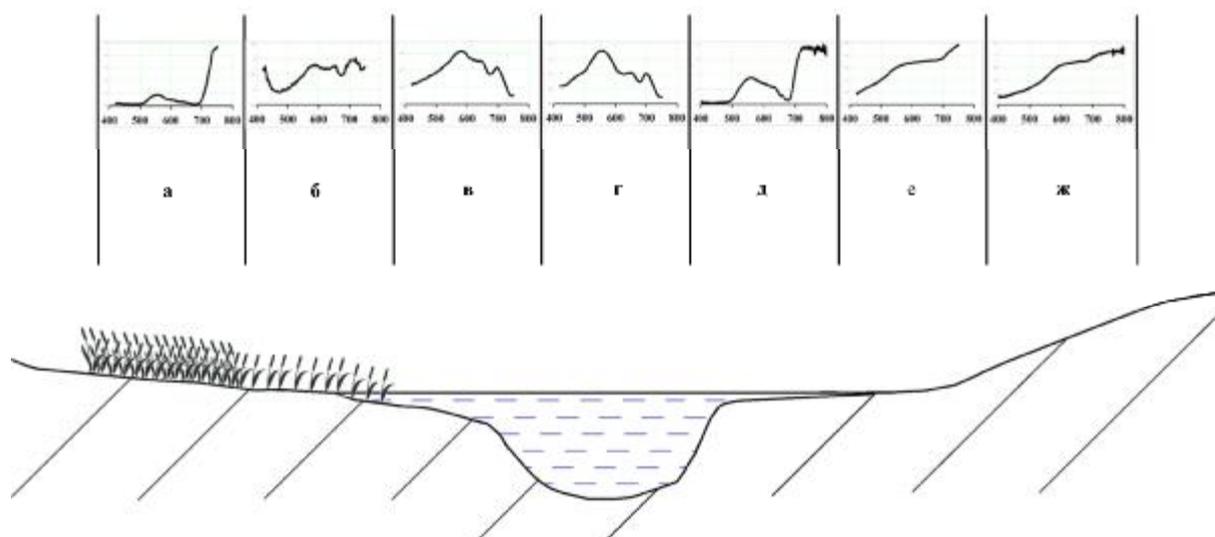


Рисунок 3 – Схема сечения реки и СКСЯ различных фаций аквального ландшафта: а – заросли камыша; б – редкие заросли камыша; в – левый берег, мелководье; г – судоходный участок у правого берега; д – колонии нитчатых, выброшенных на берег; е – мокрый песок; ф – влажная почва

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен метод классификации аквальных ландшафтов и их фаций по СКСЯ видимого диапазона с разрешением около 1 нм, получаемым на нижнем уровне.
2. Представлены СКСЯ различных типов, характерные для ряда водных объектов Европейской части России.
3. Метод может быть положен в основу классификации аквальных ландшафтов, по спектральной (гиперспектральной) информации природоресурсных спутников Земли.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Назаров Н.Н. Аквальные геосистемы наземных ландшафтов: история вопроса, теория, классификация // *Вопр. физ. географии и геоэкологии Урала*. Пермь, 2002. С. 3 - 14.
- [2] Наговицын А.В., Фролова И.В. Основы ландшафтоведения: учеб. пособие. Перм. гос. ун-т. - Пермь, 2008. - 156 с.
- [3] Хованский А.Д. Геохимия аквальных ландшафтов. Ростов н/Д Изд-во Ростовского, ун-та 1993. 240 с.
- [4] Шифрин К.С. Введение в оптику Океана - Л.: Гидрометеиздат, 1983.- 278 с.
- [5] Gitelson, A.A., 1992. The peak near 700 nm on reflectance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. *Int. J. Remote Sens.* 13, 3367–3373.
- [6] Jupp, D.L.B.; Kirk, J.T.O.; Harris, G.P. 1994. Detection, identification and mapping of cyanobacteria – Using remote-sensing to measure the optical-quality of turbid inland waters. *Austral. J. Mar. Freshwater Res.* 45: 801– 828.
- [7] Сухоруков Б.Л., Ковалева Г.Е., Новиков И.В. Оценка трофности водных объектов по данным дистанционной спектроскопии высокого разрешения видимого диапазона электромагнитного спектра // *Водные ресурсы*, 2017, №1, С.79-90.

Глава III/48: СПУТНИКОВЫЙ ИНДЕКС КЛИМАТИЧЕСКИХ ЭКСТРЕМУМОВ ЗАСУШЛИВЫХ ЛАНДШАФТОВ SCEI

Chapter III/48: Satellite Index of Climatic Extremes of Arid Landscapes SCEI

Александр Н. Золотокрылин*; Татьяна Б. Титкова**

DOI 10.25680/4063.2018.14.28.241

Email: [*azolotokrylin1938@vandex.ru](mailto:azolotokrylin1938@vandex.ru), [**ttitkova@vandex.ru](mailto:ttitkova@vandex.ru)

Институт географии Российской академии наук, Старомонетный пер., 29, 119017, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ. Предложен универсальный спутниковый индекс для одновременного детектирования климатических экстремумов (Satellite Climatic Extremes Index, SCEI) – засух и переувлажнения после обильных осадков на засушливых землях. SCEI представляет собой алгебраическую сумму отклонений от многолетнего среднего влажности почвы, NDVI, альбедо, температуру поверхности, нормированных на их среднее квадратическое отклонение. Обсуждаются особенности его использования для изучения динамики опустынивания на примере Северо-Западного Прикаспия.

Abstract. A satellite index for detecting climatic extremes, such as droughts and over-humidification after heavy precipitation at drylands, has been suggested. The Satellite Climatic Extremes Index (SCEI) was calculated as summed deviations from the long-term average values (normalized SD) of soil moisture, NDVI, albedo, surface temperature. Peculiarities of SCEI in case of studying desertification dynamics in the North-West Caspian region are discussed.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: засушливые земли, климатические экстремумы, SCEI, альбедо, температура поверхности, NDVI, влажность почвы, MODIS.

Keywords: dryland, climatic extremes, SCEI, albedo, surface temperature, NDVI, soil moisture, MODIS.

ВВЕДЕНИЕ

Экстремальность климата засушливых земель обусловлена в основном экстремальностью осадков. Она проявляется чаще всего в повторяющихся засухах и реже в обильных осадках, вызывающее кратковременное переувлажнение почвы. Пространственно-временная изменчивость этих экстремумов влияет на биофизические тенденции засушливых земель, которые важны для понимания причин опустынивания и его последствий.

Надежной информацией о климатических экстремумах становится спутниковый мониторинг таких биофизических параметров и их аномалий, как влажность почвы, вегетационный индекс (NDVI), альбедо и температура поверхности. В настоящее время эти параметры, за исключением влажности почвы, регулярно вычисляются с 2000 г. по данным спутниковых наблюдений радиометром MODIS.

Опыт применения спутниковых биофизических параметров накоплен в основном для детектирования засух в региональном и глобальном масштабах. В начале был предложен индекс вегетационных условий (VCI), как функция NDVI, а несколько позднее индекс температурных условий (TCI), как функция температуры поверхности, и, наконец, комбинация VCI и TCI – индекс состояния (здоровья) вегетации (VHI) (Kogan, 1990,1995). Вскоре стали известны другие индексы засухи, построенные на комбинации альбедо и температуры поверхности или NDVI и альбедо (Ghulametal, 2004). Но до сих пор не было предложено универсального спутникового индекса для одновременного детектирования климатических экстремумов – засух и переувлажнений применительно к засушливым землям.

ЦЕЛЬ МЕТОДА

Использование спутниковой информации о подстилающей поверхности помогает нивелировать недостаток метеорологических данных. Цель состоит в обосновании спутникового индекса климатических экстремумов (Satellite Climatic Extremes Index, SCEI), который по физическому смыслу может быть, как отрицательным (засуха), так и положительным (локальное и кратковременное переувлажнение). В работе предполагается детальное описание методики оценки SCEI и обсуждение особенностей его использования для изучения динамики опустынивания.

Применение индекса рассматривается на примере засушливых земель Северо-Западного Прикаспия.

ПРИНЦИП И ПРОЦЕДУРА

Пространственно-временное изменение биофизических параметров засушливых земель прямым или косвенным образом отражает экстремальность климата, которая проявляется в отклонениях (аномалиях) от многолетнего среднего значений влажности почвы (SWI), NDVI, альбедо и температуры поверхности. Например, на начальном этапе засухи возникает отрицательная аномалия влажности почвы и растения начинают испытывать недостаток влаги. На уровне растительной ассоциации из-за изменения физиологических процессов цвет ассимиляционных органов меняется в сторону пожелтения видов растений, наименее устойчивых к недостатку влаги. Возникает отрицательная аномалия NDVI, вызывающая положительную аномалию альбедо поверхности. Энергия, которая раньше тратилась на транспирацию и испарение почвы, расходуется на турбулентный прогрев воздуха и почвы. В результате формируется положительная аномалия температуры поверхности и воздуха. Таким образом, засуху можно выразить через индекс, который является отрицательной функцией аномалий биофизических параметров.

В период, когда осадки и влажность почвы выше среднееголетних значений, для засушливых земель характерны положительные аномалии влажности почвы, NDVI и отрицательные аномалии альбедо и температуры поверхности. В этом случае индекс, как функция аномалий биофизических параметров становится положительным.

Изложенное выше качественное объяснение индекса климатических экстремумов засушливых земель может быть формализовано и представлено в виде:

$$SCEI_i = \Delta NDVI_i / \sigma NDVI + \Delta SWI_i / \sigma SWI - (\Delta A_i / \sigma A + \Delta T_{s_i} / \sigma T_s) \quad (1)$$

где ΔA_i – аномалия альбедо за i год; σA – среднееквдратическое значение альбедо за базовый период (в данном случае за 2000-2011 гг.); ΔT_{s_i} – аномалия температуры поверхности за i год; σT_s – среднееквдратическое значение температуры поверхности за базовый период; $\Delta NDVI_i$ – аномалия NDVI за i год; $\sigma NDVI$ – среднееквдратическое значение NDVI за базовый период; ΔSWI_i – аномалия влажности почвы за i год; σSWI – среднееквдратическое значение влажности почвы за базовый период.

Из-за неполноты данных о влажности почвы правомерно использовать выражение (1) в сокращенном виде:

$$SCEI_i = NDVI_i / \sigma NDVI - (\Delta A_i / \sigma A + \Delta T_{s_i} / \sigma T_s) \quad (2)$$

Значения, полученные по формуле (2), нормируются на их среднееквдратическое отклонение, чтобы исключить незначимые («шумовые») значения индекса, т.е. лежащие в диапазоне среднееквдратического отклонения.

$$SCEI_i = SCEI_i / \sigma SCEI \quad (3)$$

В этом случае значения индекса показывают менее -1 засуху и более 1 - переувлажнение.

Градации SCEI:

- < -2 - сильная засуха,
- < -1 –засуха,
- 1 – 1 –нормальные условия,
- > 1 – переувлажнение,
- > 2 – сильное переувлажнение.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим на примере засушливых земель Северо-Западного Прикаспия применение индекса SCEI для изучения динамики опустынивания.

Территория охватывает целиком Северо-Западный Прикаспий и часть Северного Прикаспия и ограничена 45-51° N и 44-51° E. Территория представлена сухими субгумидными, семиаридными и аридными землями. В работе использованы данные альбедо, среднемесячной температуры поверхности, NDVI (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products) Центра LP DAAC NASA: LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER. Все параметры имеют

разрешение 0.05x0.05° (в среднем 5600x5600 м). Анализировались данные за сроки: 9-25 мая, 26мая-9 июня, 10 -25июня, 26июня-11июля, 12-27июля, 28июля-12августа, 13-28августа для периода 2000-2011гг..

Для альbedo (BRDF-Albedo Model Parameters 16-Day L3 0.05Deg CMG) бралась модель MCD43C1 версии 005. Значения индекса растительности NDVI (Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG) были получены по данным модели MOD13C1 – варианта 005. Для средне-месячной температуры поверхности (Land Surface Temperature and Emissivity Monthly L3 Global 0.05 Deg CMG) использовалась модель MOD11C2 версии 005, с периодичностью 8 дней. По двум 8 дневным срокам вычислялось среднее за период 16 дней, идентичным периодам для альbedo и NDVI.

Распределение индекса SCEI на территории в мае и июне 2010 г. представлено на рис.1 а, б, на котором выделяются ареалы с засухой (индекс менее -1). Внутри ареалов с умеренной засухой прослеживаются ареалы с сильной засухой (индекс менее -2). Также присутствуют ареалы переувлажнения (индекс более 1) и сильного переувлажнения (индекс более 2). Ареалы со значением аномалии индекса, меняющегося в пределах стандартного отклонения (от -1 до 1), не закрашены. Как видно из рис.1а, в период 9-25 мая несколько очагов засухи возникло преимущественно в северных и восточных районах территории. Их общая площадь не превышала 20% от всей территории. Одновременно на территории наблюдались три крупных очага переувлажнения.

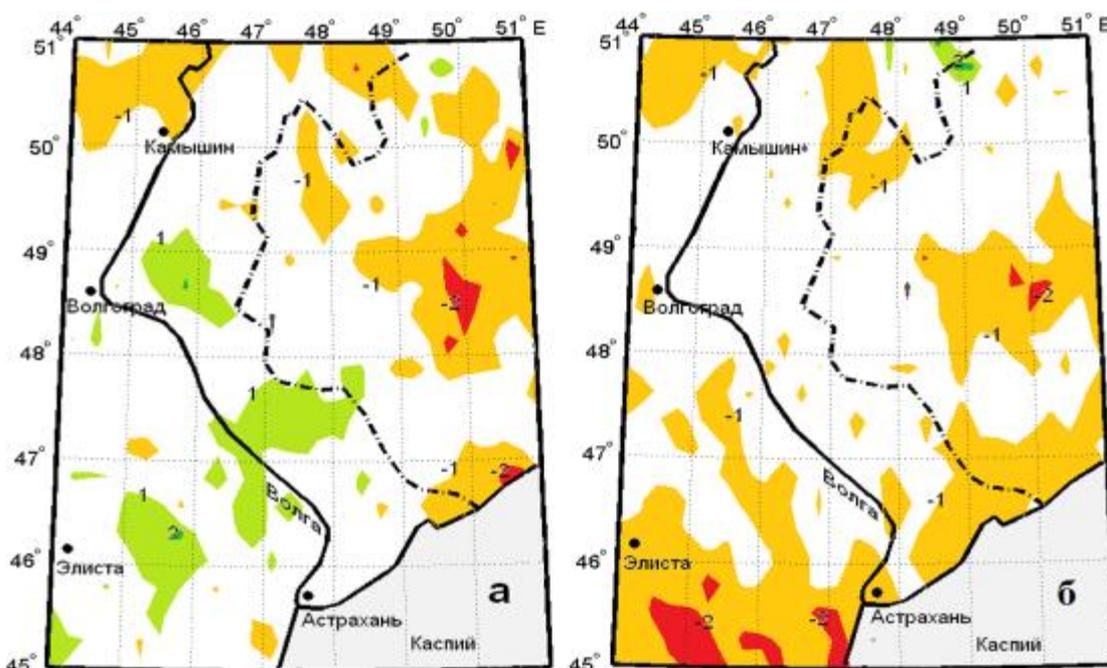


Рисунок 1. Распределение индекса климатических экстремумов (SCEI) засушливых земель 2010г., осреднение 0.25°x0.25°: а) 9-25 мая, б) 10-26 июня.

Площадь очагов засухи была примерно в два раза больше очагов переувлажнения. Соответственно площадь индекса, близкого к норме, составила около 70%. Площадь очагов с сильной засухой была выше площади с сильным переувлажнением, а их общая площадь не превышала 2%.

Через месяц (10-25 июня) засуха охватила уже 45% территории (рис.1б). Рост площади очагов с сильной засухой до 5% указывает на то, что возросла и ее интенсивность. Северные и восточный очаги засух уменьшились, но в то же самое время началось распространение засухи с южных и юго-западных районов территории. До 44% сократилась территория индекса близкого к норме. Очаги переувлажнения не сохранились.

В дальнейшем наблюдалось распространение засухи на север и объединение ее с северными очагами. Интенсивность засухи также повысилась. Своего апогея засуха достигла в период 28 июля – 12 августа, а затем ее интенсивность стала снижаться во второй половине августа.

Таким образом, динамика и площадь засухи 2010 г., в виде очагов, хорошо просматривается при картографировании индекса SCEI. В июне засуха возникла в южных и юго-западных районах и

стала распространяться на север, где произошло объединение с северными очагами. В июле засуха охватила большую часть территории.

ВЫВОДЫ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДА

Предлагаемый индекс SCEI косвенно отражает климатические экстремумы, что требует его сравнения с данными метеорологических наблюдений. Отрицательный индекс SCEI по физическому смыслу наиболее близок к экстремальной атмосферно-почвенной засухе (ОАЗ). Согласно критерию Гидрометцентра России, ОАЗ возникает в сезон вегетации, когда в течение не менее 30 дней подряд при среднесуточной температуре воздуха выше 25°C осадки не превышают 5 мм в сутки.

Сравнение повторяемости отрицательного индекса SCEI с повторяемостью ОАЗ на исследуемой территории показало их удовлетворительное согласие. Уверенно определяется по критерию ОАЗ обширные июньские засухи 2007 и 2009-2010 гг. При этом сильная разреженность метеорологической сети не позволила вычислить площади распространения засухи в другие месяцы и годы. Применение спутникового индекса климатических экстремумов SCEI помогает решить эту проблему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Был предложен универсальный спутниковый индекс для одновременного детектирования климатических экстремумов – засух и переувлажнений, применительно к засушливым землям.
2. Сравнение повторяемости отрицательного индекса SCEI с повторяемостью экстремальной атмосферно-почвенной засухе на исследуемой территории показало их удовлетворительное согласие.
3. Картографирование индекса климатических экстремумов засушливых земель SCEI позволяет отслеживать динамику и площадь засухи виде очагов.
4. Применение спутникового индекса климатических экстремумов SCEI позволяет уменьшить неопределенность в понимании современной тенденции динамики регионального климата и опустынивания. При этом становится уже не критичным недостаток рутинных метеорологических данных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ghulam A., Qin Q., Wang L., Zhan Z. and Wang D., 2004. Development of Broadband Albedo Based Ecological Safety Monitoring Index. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), September 20-24, 2004, Anchorage, Alaska, Egan Convention Center, USA. Vol. VI. PP.4115-4118.
- [2] Kogan F.N. 1990. Remote sensing of the impact on vegetation in non-homogeneous areas. International Journal of Remote Sensing, 11, pp. 1405-1419.
- [3] Kogan F.N. 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Advances in Space Research, 15, pp. 91-100.

Глава III/49: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ И КАРТОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕГРАДИРОВАННЫХ ЗАСУШЛИВЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ
Chapter III/49: Using Cosmic Data and Cartographic Methods for the Evaluation of Degraded Dry Agrolandscapes

Шахислам Лайсханов*^{1,2}, Азимбай Отаров¹, Игор Савин³, Арсений Жоголев³, Сакен Дуйсеков¹

DOI 10.25680/7906.2018.90.88.242

*Эл. Почта: shah_394@mail.ru

1.Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии им. У.У. Успанова, г. Алматы, Казахстан.

2.Казахский государственный женский педагогический университет, г. Алматы, Казахстан.

3.Почвенный институт им. В.В. Докучаева, г. Москва, Россия

РЕЗЮМЕ. Проведен анализ возможности определения степени засоления почв путем косвенного и прямого дешифрования космических LANDSAT (архивные). Установлено, что косвенное дешифрирование засоления по спектральным характеристикам изображений растительности в достаточно сильной степени зависит от фазы роста сельскохозяйственных культур (сроков съемки). А архивные снимки LANDSAT TM с помощью нормализованного индекса засоленности почв (NDSI) позволяет на полуколичественном уровне составить карты засоления и карта динамики засоленности почв. На основе компьютерного анализа снимков LANDSAT TM установлено, что засоленность почв объекта исследования за период с 1987 по 2014 годы увеличилась за счет значительного уменьшения площади незасоленных почв на 41,5% и увеличения площадей слабо- и средnezасоленных почв 34,9%, появились также ранее отсутствовавшие контуры сильнозасоленных почв на 6,6% общей обследованной площади.

Abstract. We conducted an analysis of determining the degree of soil salinity by indirect and direct decoding of space LANDSAT archive data. It was found that the indirect decoding of salinity according to the spectral characteristics of vegetation images depends to a rather strong extent on the phase of growth of agricultural crops (the timing of the survey). The archive images of LANDSAT TM with the help of the normalized soil salinity index (NDSI) make it possible to compile salinity maps and a map of the dynamics of saline soils at a semi-quantitative level. Based on the computer analysis of the LANDSAT TM images, it was found that the soil salinity of the research object for the period from 1987 to 2014 increased due to a significant decrease in the area of non-saline soils by 41.5% and an increase in areas of weakly and moderately saline soils of 34.9%. Formerly absent contours of highly saline soils were now 6.6% of the total surveyed area.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Агроландшафты, засоление почвы, дешифровка космических снимков, регрессионный анализ.

Keywords: Agrolandscapes, soil salinity, decoding of space images, regression analysis

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время воздействие антропогенного фактора зачастую превышает максимально допустимые нормы, разрушая природные комплексы. Деграция агроландшафтов, прежде всего проявляется в расширении водной и ветровой эрозии, понижении уровня грунтовых вод, загрязнении, заболачивании, также в засолении орошаемых и неорошаемых почв [1]. Особенно в аридных регионах, где продуктивность сельского хозяйства связано с орошением земель, почвы являются наиболее подверженным к засолению компонентом агроландшафта. На Всемирном атласе опустынивания [2] выделялось шесть групп деграции: водная эрозия, ветровая эрозия, снижение плодородия почв, засоление, заболачивание и снижение уровня грунтовых вод. Из них засоление рассматривалось самой актуальной проблемой для Центральной Азии и Казахстана. Изучение данного вопроса с традиционными методами исследования путем проведения крупномасштабной солевой съемки и картирования засоления почв в основном из-за дороговизны сейчас практически не используются. В связи с этим, в настоящее время возникает острая необходимость в разработке космических методов мониторинга засоления почв, создание которых считается одним из актуальных новых направлений в изучение динамики изменения засоленных почв. Эти методы принципиально отличаются от своего аналога –

наземного способа исследования солевого режима почв оперативностью, точностью и сравнительной дешевизной. Обзор научных публикаций последнего времени показывает, что проблема анализа динамичности засоленных почв на больших территориях в настоящее время не решена [3-11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа проводилась путем проведения синхронной по месту и по времени космической и наземной съемки почв территории исследования. Для этой цели путем проведения наземного рекогносцировочного обследования массива были выбраны контрастные по засолению почв подспутниковые участки и для исследования многолетней динамики засоления почв, проведен сбор спутниковых данных LANDSAT за прошлые годы из открытых источников.

На объекте исследования, как и на всей территории Шаульдерского массива орошения ведущими культурами являются – кукуруза на зерно и люцерна [12]. Основываясь на биологических особенностях этих культур, длины их срока вегетации и на данных фондовых материалов Института почвоведения, в качестве срока проведения как космической, так и наземной съемки была выбрана последняя декада июля месяц. При этом было сделано допущение, что в это время кукуруза будет находиться перед фазой выметывания, а люцерна в начале фазы цветения (второго укоса), т.е. на посевах этих культур в это время есть возможность замера вегетационного индекса как наземным, так и космическим способами.

Что касается методов обработки спутниковых данных и дешифрирования состояние засоленности почв, то можно выделить следующие основные подходы:

- расчет вегетационных индексов, позволяющих идентифицировать засоление почв;
- статистические модели и методы (множественная регрессия, метод главных компонент, метод максимального правдоподобия, регрессия частных наименьших квадратов);
- геостатистические методы (кригинг, кокригинг, модифицированный кригинг) [13].

Для дешифрирования космических снимков использован регрессионный анализ связи между величиной электропроводности, измеренной в поле, и данными космической съемки. Регрессионный анализ проводили в среде программы STATISTICA 7.0. В качестве независимых переменных использовались три группы предикторов – спектральные каналы спутника Landsat, вегетационные индексы, описывающие состояние растительности и отношение каналов не относящиеся к вегетационным индексам. Регрессионный анализ проводился отдельно по видам сельскохозяйственных культур для каждого исследуемого слоя почвы (0-20 см, 20-50 см, 50-100 см).

Наземные исследования проведены согласно «Общесоюзной инструкции ...» и «Руководство по проведению ...» [14, 15]. Кроме того, при проведении полевых работ были использованы новейшие оборудования для изучения засоленности почв и систем глобального позиционирования. Для проведения солевой съемки, наряду с традиционным методом (закладка разрезов, бурение скважин), был использован также и полевой переносной солемеры «Прогресс 1Т». Для уточнения контуров засоленных почв по космическим снимкам был использован GPS 18 “Garmin” в паре с ноутбуком «ASUS», а для определения координат точек разрезов использована система глобального позиционирования GPS “Garmin 62s”.

Таким образом, можно сказать, что для составления карты засоления почв и исследования многолетней динамики этого процесса привлечены все необходимые методы и методологий исследования почв.

Работа была начата из создания основных слоев ГИС территории Шаульдерского массива орошения (объекты исследования), включающие в себя границу орошаемых участков, населенные пункты, автомобильные дороги, озера, реки, оросительную сеть и другие. Все слои, составляющие ГИС были получены путем дешифрирования космического снимка Pleiades за 2014 год, а также частично были использованы карты землепользования местных фермеров. После проведения полевых работ в ГИС были добавлены точки полевых наблюдений, а также результаты космической съемки территории исследований.

Также был осуществлен анализ наличия архивных спутниковых данных на территорию исследований. Установлено, что в архиве с 1985 по 2014 годы в свободном доступе имеются достаточное количество (46 снимков) изображений LANDSAT высокого пространственного разрешения [16]. Эти изображения в дальнейшем были использованы в качестве основы для выявления динамичности засоления почв региона исследований.

Оценка динамики засоленности почв проводилась с помощью построения карт засоленности почв за разные промежутки времени.

Применялось два подхода к построению карт засоленности почв. Первое на основе регрессионного анализа между данными полевых исследований и данными полученными по космическим снимкам, и второе с помощью автоматической классификации изображения.

Регрессионный анализ проводили в среде программы Statistica v 7.0 для каждого слоя почвы (0-20см, 20-50см, 50-100см) и отдельно для посевов люцерны и кукурузы. Выборка для полей засеянных кукурузой составила 25 точек, для полей с люцерной - 30 точек. Для регрессионного анализа использовались следующие предикторы:

1. Спектральные каналы спутника Pleiades 1A/1B: Band1, Band2, Band3, Band4;

2. Вегетационные индексы, описывающие состояние растительности [17]:

$$NDVI = (Band4 - Band3) / (Band4 + Band3);$$

$$IR_R = Band4 / Band3;$$

$$SQRT = \sqrt{Band4 / Band3};$$

$$VEGI = Band4 - Band3;$$

$$TND\ VII = \sqrt{(Band4 - Band3) / (Band4 + Band3)} + 0,5;$$

$$GNDVI = (Band4 - Band2) / (Band4 + Band2); \quad NDGR = (Band2 - Band3) / (Band2 + Band3);$$

3. Отношения каналов Pleiades 1A/1B:

$$B/G = Band1 / Band2;$$

$$R/G = Band3 / Band2;$$

$$B/NIR = Band1 / Band4;$$

$$B/R = Band1 / Band3;$$

$$NIR/G = Band4 / Band2.$$

В результате проведения регрессионного анализа для космического снимка Landsat 8OLI за 15 июля 2014 года статистически значимая регрессия с коэффициентом детерминации (R^2) равным значению 0,51 была выявлена только для слоя 20-50 см. под посевами кукурузы.

Множественные регрессии также строились для космического снимка Landsat за 284 день (октябрь) 2014 года, однако, они также имели очень низкие значения коэффициентов детерминации (R^2), около 0.3. Единственная значимая регрессия была построена для одного 50-100 см слоя почв под кукурузой. Наилучшими предикторами оказались 5 и 4 каналы снимка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленная выше закономерность в какой-то мере можно объяснить тем, что в условиях Шаульдерского массива орошения полив кукурузы начинается в фазу 7-8 листьев, это по времени конец июня месяц и заканчивается во второй половине августа месяц. За это время проводится 4-5 полива с оросительной нормой 600-700 м³/га. Эти поливы способствуют опреснению верхнего пахотного слоя почв, что может довольно сильно снизить силу связи засоления почв и спектральных свойств космического снимка.

Поскольку не удалось построить достаточно надежные регрессионные модели с использованием снимков для построения карт засоленности использовался другой подход с использованием классификации изображения и определения засоленности по индексу NDSI. Так как в большинстве случаев поля в регионе исследований забрасываются в связи с высокой засоленностью почв, то сначала строились маски заброшенных полей. Для этого использовалась пара космических снимков Landsat за соседние года, чтобы исключить временно неиспользуемые поля. На снимках 2013 и 2014 года за 280-285 дни (октябрь) заброшенные поля дешифровывались автоматически в программе ILWIS 3/31 с помощью классификации по обучающей выборке методом «наибольшего подобия». Классификация проводилась в комбинации каналов (4-3-2). На снимке 1988 года все поля оказались используемыми. Таким образом, были выделены заброшенные поля, почвы на которых считались наиболее засоленными.

Менее засоленные почвы дешифрировались по космическим снимкам Landsat на срок за вторую половину осени, когда на снимках видно открытая поверхность почвы: 312 день 1988 года (октябрь) и 332 день 2014 года (ноябрь). Для каждого снимка рассчитывался нормализованный индекс засоления (NDSI). Использовалась вариация индекса с каналами 5 и 4 спутника Landsat, так как именно эти каналы наиболее часто встречались в качестве значимых предикторов при построении регрессионных моделей засоления:

$$NDSI = (Band5 - Band4) / (Band5 + Band4),$$

где Band4, Band5 – соответствующие каналы спутника Landsat.

Затем, изображения индексов NDSI были разделены на 3 класса, соответствующих незасоленным, слабозасоленным и средnezасоленным почвам. В качестве границ классов использовались квантили, посчитанные в программе Statistica по снимку за 332 день 2010 года. Значения квантилей: $p(0.33) = 0.26$ и $p(0.66) = 0.28$. Далее, объединением масок сильнозасоленных почв (неиспользуемые поля) и масок незасоленных, слабозасоленных и средnezасоленных почв были получены итоговые карты засоленности за 1988 и 2014 года, на основе которых нам удалось посчитать площади засоленных почв объекта исследования (рисунок 1).

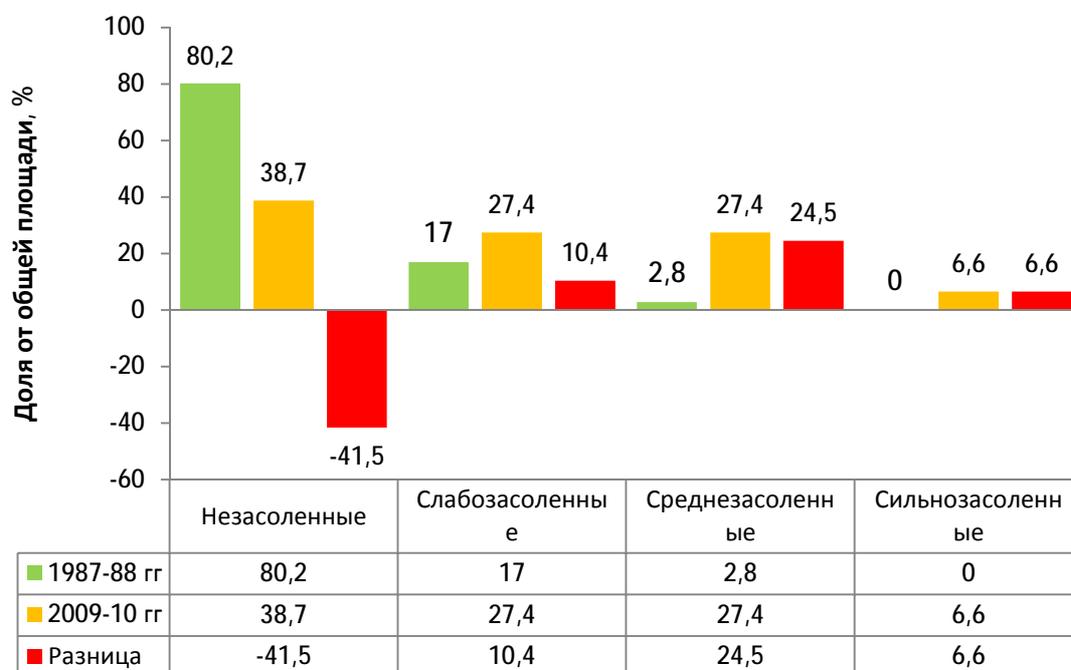


Рисунок 1 - Динамика засоления почв за период с 1987 по 2014 годы

За счет уменьшения площади незасоленных почв увеличились площади средне- и сильнозасоленных почв, соответственно на 10,4 и 224,5 процента или на 235,3 или 555,2 гектаров. Появились контуры сильнозасоленных почв, которые занимают 6,6% обследованной площади. То есть в результате исследования динамики засоления почв космическим методом установлено, что за последнее 26 лет в условиях Шиликского и Актюбинского сельских округов Шаульдерского массива идет прогрессирующее засоление почв. Сильным засолением охвачены в основном периферийные части массива и концевые части основных оросителей, а контуры средnezасоленных почв, которые встречаются повсеместно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С помощью регрессионного анализа связи между спектральными свойствами и архивных снимков LANDSAT и электропроводностью орошаемых почв удалось построить регрессионные модели засоленности только для отдельных слоёв почв под кукурузой, да и то недостаточно статистически надежных, что видимо, связано с неподходящим выбором сезона съёмки.
2. Карты засоления и карта динамики засоленности были построены на полуколичественном уровне с использованием автоматизированной классификации изображения по обучающей выборке методом «максимального подобия» и деления изображения почв по значению индекса засоленности NDSI.
3. С наилучшей точностью были выделены сильнозасоленные почвы, в то время как почвы с другими степенями засоления были выделены с меньшей точностью.
4. Тем не менее, проведенный с использованием архивных снимков LANDSAT TM анализ показал, что засоленность почв объекта исследования за период с 1987 по 2014 годы значительно увеличилась. Это произошло за счет значительного уменьшения площади незасоленных почв и увеличения площадей слабо- и средnezасоленных почв.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Ковда В.А. Проблемы опустынивания и засоления почв аридных регионов мира / отв.ред. Е.И. Панкова, И.П. Айдаров. – М: Наука, 2008. – 415 с.
- [2]UNEP. World Atlas of Desertification. London: Edward Arnold. Электронный ресурс: <http://www.unep.org>.
- [3]Боровский В.М. Формирование засоленных почв и галогеохимические провинции Казахстана. - Алма-Ата: Наука КазССР, 1982. 256 с.
- [4]Отаров А., Ибраева М., Усипбеков М., Wilkomirski В., Suska-Malawska М. Краткая характеристика почвенного покрова и анализ современного состояния плодородия почв Южно-Казахстанской области // Почвоведение и агрохимия. - 2008. - №1 - С. 68-76.
- [5]Al-Khaier F. Soil salinity detection using satellite remote sensing. - Master thesis, 2003. - 70 p.
- [6]Ambast S.K. Monitoring and evaluation of irrigation system performance in saline irrigated command using satellite remote sensing and gis // Interne Mededeling, Report 471. - Netherland: Winand Staring Centre, 1997. - 106 p.
- [7]Brena J., Sanvincete H., Pulido L. Salinity assessment in Mexico. In Use of remote sensing techniques in irrigation and drainage /ed. A. Vidal and J.A. Sagardoy. - Rome: FAO, 1995. - P. 179-184.
- [8]Hick P.T., Russel W.G. Some spectral considerations for remote sensing of soil salinity // Australian Journal of Soil Research – 1990. – Vol. 28 (3). - P. 417-431.
- [9]Masoud A.A., Koike K. Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: A case study in the Siwa region, NW Egypt // Journal of Arid Environments. – 2006. - № 66(1). - P. 151–167.
- [10]Nasir M.K. Rastoskuev V.V., Shalina E.V. Mapping salt-affected soils using remote sensing indicators – a simple approach with the use of GIS IDRISI // Proc. Asian Conf. on RS. - ,2001, Singapore. – P. 56-61.
- [11]Weng Y., Gong P., Zu Z. Soil salt content estimation in the Yellow River delta with satellite hyperspectral data // Can. J. Remote Sensing. - 2008. - Vol. 34. - № 3. - P. 259-270.
- [12]Природные кормовые угодья Отырарского района Южно-Казахстанской области Республики Казахстан (очерк). Агенство РК по управлению земельными ресурсами: Комплексное изыскательское отделение дочернее государственное предприятие КИО НИЦзем. – Алматы, 2001. – 98 с.
- [13]Laiskhanov Sh.U., Otarov A., Savin I.Y., Tanirbergenov S.I., Mamutov Zh.U., Duisekov S.N., Zhogolev A. Dynamics of Soil Salinity in Irrigation Areas in South Kazakhstan // Polish Journal of Environmental Studies. – 2016. – Vol. 25. - №6. P. 2469-2475
- [14]Общесоюзная инструкция по почвенным обследованиям и составлению крупномасштабных почвенных карт землепользования. - М.: Колос, 1973. – 95 с.
- [15]Руководство по проведению крупномасштабного почвенного обследования в Казахской ССР. - Алма-Ата, 1979. – 137 с.
- [16]Earth Resources Observation and Science Center (EROS). Электронный ресурс: <http://glovis.usgs.gov>.
- [17]Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. – 2011. - №2. – С. 98-102.

**Глава III/50: ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И
НАЗЕМНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПО-
ЛЕЙ ПОЧВ ДЛЯ КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА**

**Chapter III/50: Application of Remote Sensing Data and Ground Automated Monitoring of the
Temperature Field of Soils for Cartographic Modeling of Soil Cover**

Светлана Кудряшова*¹, Александр Чумбаев¹, Игорь Пестунов², Анна Безбородова¹, Светлана Курбатская³, Сергей Рылов², Юрий Синявский²

DOI 10.25680/1463.2018.67.60.243

*Эл. Почта: sva@issa.nsc.ru

1. Институт почвоведения и агрохимии, пр. Академика Лаврентьева 8/2, 630090, Новосибирск, Россия
2. Институт вычислительных технологий, пр. Академика Лаврентьева 6, 630090, Новосибирск, Россия
3. ГБУ Убсунурский международный центр биосферных исследований, ул. Интернациональная 117а, 670067, Кызыл, Россия

РЕЗЮМЕ. Рассмотрена возможность использования дистанционных и автоматизированных исследований температурного поля почв для целей картографического моделирования почвенного покрова тундрово-степных комплексов Алтае-Саянского региона. С использованием основных положений методологии SCORPAN и количественных характеристик температурного режима, полученных в результате совместного анализа временных рядов температурного мониторинга и спутниковых данных, рассчитанных за 15-ти летний период, было проведено картографическое моделирование структурной организации почвенного покрова. Полученные картографические модели температурных полей, обладают достаточной информативностью, позволяющей устанавливать взаимосвязи температурного режима с другими характеристиками объектов природной среды и подойти к решению проблемы выделения и типологии почвенно-экологических границ.

Abstract. The possibility of using remote and automated studies of the soil temperature field for the purposes of cartographic modeling of the soil cover of tundra-steppe complexes of the Altai-Sayan region is considered. Using the main provisions of the SCORPAN methodology and the quantitative characteristics of the temperature regime obtained as a result of a joint analysis of time series of temperature monitoring and satellite data calculated over a 15-year period, a cartographic modeling of the structural organization of the soil cover was carried out. Obtained the cartographic models of temperature fields have sufficient informativeness, allowing to establish the relationship of the temperature regime with other characteristics of the objects of the natural environment and to approach the solution of the problem of isolation and typology of soil-ecological boundaries.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: температурное поле почв, наземные автоматизированные комплексы, спутниковые данные, картографическое моделирование

Keywords: soil temperature field, ground automated systems, satellite data, cartographic modeling

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время с внедрением дистанционных и автоматизированных методов в практику почвенно-экологических исследований разрабатывается новое и перспективное направление – использование показателей температурного режима в решении задач по созданию методологических основ выделения и типологии структурных и функциональных границ почвенного покрова. В наиболее полном виде факторы, определяющие свойства почв в определенной точке исследуемого пространства, отражены в модели SCORPAN – почвенной пространственно предсказывающей функции, которая предполагает, что одинаковому сочетанию почвообразующих факторов – предикторов соответствуют почвы сходного генезиса, а границы почвенных структур обусловлены изменением факторов дифференциации почвенного покрова [1]. Выделение наиболее информативных предикторов осуществляется с использованием подходов педотрансферного метода, позволяющих рассчитывать педотрансферные функции – уравнения связи, описывающие функциональные соотношения базовых почвенных свойств и характеристик почвенно-географического пространства [2-6]. Основное отличие данной методологии состоит в том, что по совокупности количественных почвенно-экологических показателей можно перейти к ее таксономической ха-

рактике. Такой подход позволяет по совокупности однородных почвообразующих факторов-предикторов пространственно разделить ареалы почв и проводить между ними контурные границы [7, 8].

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЧВ

Неоднородность температурного поля почв, согласно результатам исследований полученных в последние десятилетия, оказывает определяющее влияние на генезис физико-химических свойств и режимов почв и рассматривается в качестве ведущего фактора структурно-функциональной организации почвенного покрова [9-11]. Для целей тематического картографирования используются свойства почв, которые наиболее тесно коррелируют с экологическими характеристиками и обусловлены действием факторов почвообразования. Учитывая, что температурный режим является одним из наиболее значимых экологических факторов, который совместно с гидрологическим режимом характеризует общий энергетический уровень формирования и функционирования почвенного покрова, для прогнозирования пространственного распределения и функционирования почв широко используются показатели температурного режима, полученные с использованием данных дистанционных и автоматизированных исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ УЧАСТКИ

Отработка методических положений выделения почвенно-экологических границ с использованием показателей температурного режима была проведена на примере типологических единиц тундрово-степных комплексов высокогорного плоскогорья Укок, в структуре почвенного покрова которого контрастно сочетаются горно-тундровые и горно-степные почвы, резко различающиеся по условиям формирования, физико-химическим свойствам и режимам функционирования [12]. Ключевые участки были выбраны с учетом принципов ландшафтного районирования, которые позволяют распознавать, классифицировать и картировать ландшафтно-дифференцирующие факторы, компоненты ландшафта, региональную ландшафтную структуру в целом и ее динамические особенности.

НАЗЕМНЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОЧВ

Количественные характеристики температурного режима были получены в результате анализа временных рядов температурного мониторинга, полученных с использованием наземных автоматизированных комплексов и спутниковых данных. Наземный автоматизированный мониторинг был организован с использованием специализированного регистратора температуры DS-1921 "Thermochron" с учетом показателей, отражающих генетическое единство типов климата высокогорий Алтае-Саянского региона. Для изучения температурного режима автономные регистраторы температуры были установлены на поверхности почвы и по горизонтам почвенного профиля. Для фиксации температуры воздуха, был установлен автономный регистратор на высоте 2 м от поверхности почвы в условиях исключая солнечную радиацию. В результате выполненных наблюдений был получен большой объем фактических данных, который использовался в качестве базовой основы для расчета количественных характеристик температурного режима воздуха и почв тундрово-степных комплексов. В качестве оценочных категорий экологических условий формирования и функционирования тундрово-степных комплексов могут быть выделены количественные показатели температурного режима, для которых характерны значимые отличия в годовой, сезонной и суточной динамике. Качественное различие почвенного климата так же было установлено на основе анализа данных таких показателей как суммы положительных и отрицательных температур в почвенном профиле, годовых и сезонных амплитуд температур, значений максимальных и минимальных температур, а также скорости промерзания и оттаивания на разных глубинах почвенного профиля (рис. 1).

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Выявление возможности картографического моделирования структурной организации и функционирования почвенного покрова тундрово-степных комплексов высокогорий Алтае-Саянского региона проведено на основе результатов изучения температурных полей, полученных с использованием методов совместного анализа наземных автоматизированных измерительных комплексов и спутниковых данных. Распределение средних дневных и ночных температур июля-августа в рай-

оне плоскогорья Укок за 15-и летний период (2001-2016 гг.) были получены по данным сенсора MODIS (продукт MOD11), установленным на спутниках Terra/Aqua. Обработка данных MODIS производилась на программно-аппаратном комплексе обработки спутниковых данных Института вычислительных технологий СО РАН (13, 14). Интерпретация выделения типологических единиц структурной и функциональной организации почвенного покрова представлена на основе статистического анализа совмещения границ и информационного содержания контуров почвенного покрова и границ температурных полей, полученных на основе анализа спутниковых данных дневных, ночных температур и разницы температур, полученных путем вычитания двух скомпилированных серий (рис. 2). Картографическая модель дневных температур дает отчетливое представление о границах почвенных контуров, степных, тундровых и тундрово-степных почв функционирование которых осуществляется в диапазоне температур от +10 до +30°C (рис.3). Температурные поля, построенные на основе значений ночных температур, так же с высокой степенью достоверности отражают пространственные границы тундровых комплексов, формирование и функционирование которых осуществляется в диапазоне как положительных, так и отрицательных температур.

Картографическая модель температурных полей, построенная на основе данных распределения разницы между дневными и ночными температурами, может использоваться для получения информации о границах тундрово-степных комплексов, формирование и функционирование которых осуществляется в экстремальных условиях – ультравысоких, или ультранизких значений температур, таких как криофитные степи или тундры, расположенные в зоне влияния ледников.

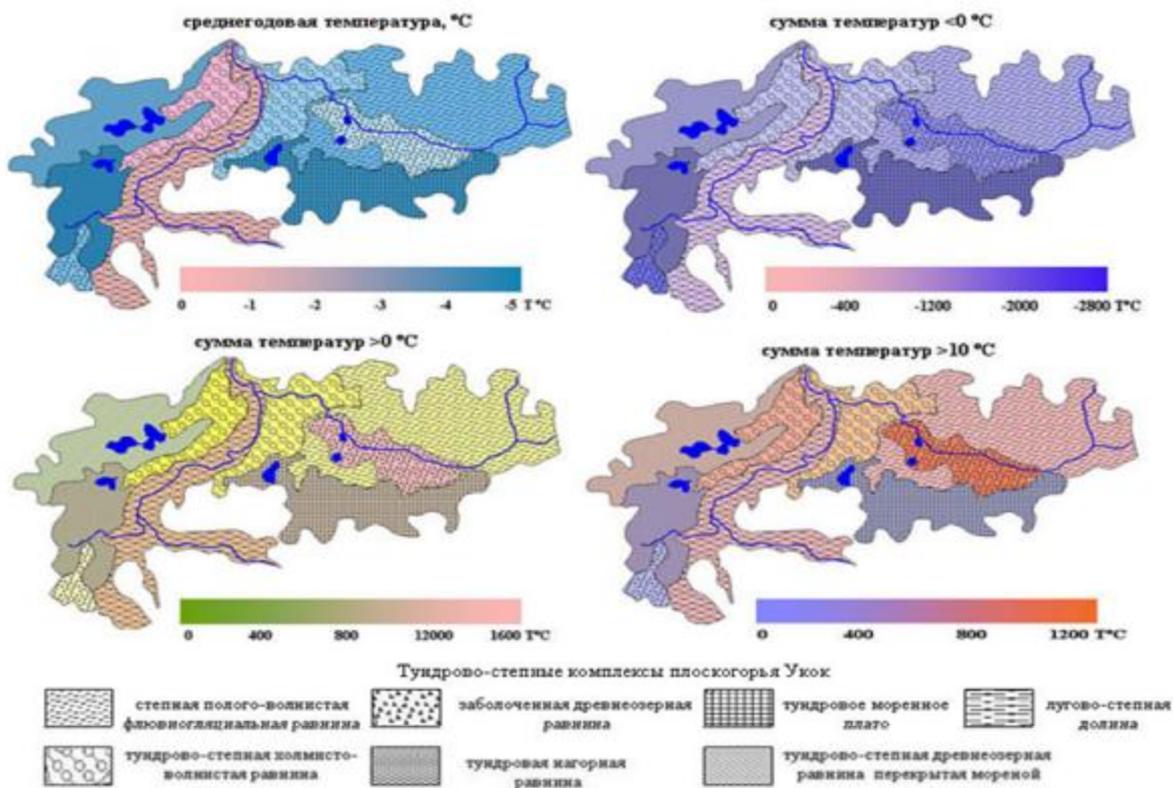


Рисунок 1. Температурные поля тундрово-степных комплексов плоскогорья Укок. 1 – значения среднегодовых температур, 2 – сумма температур < 0°C, 3 – сумма температур > 0 °C, сумма температур > 10 °C.

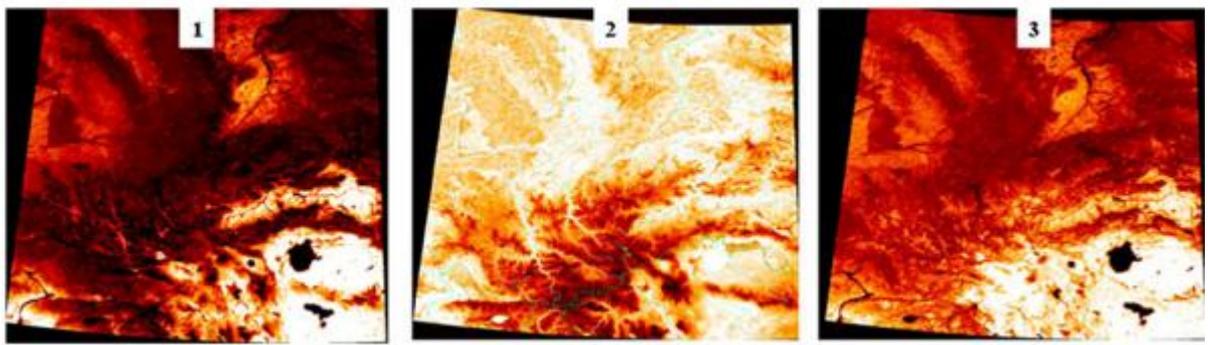


Рисунок 2. Распределение температурных полей среднесибирского трансекта, рассчитанных за 15-летний период (2001-2016 гг.) по данным сенсора MODIS. 1 – дневные, 2 – ночные температуры, 3 – разность дневных и ночных температур.

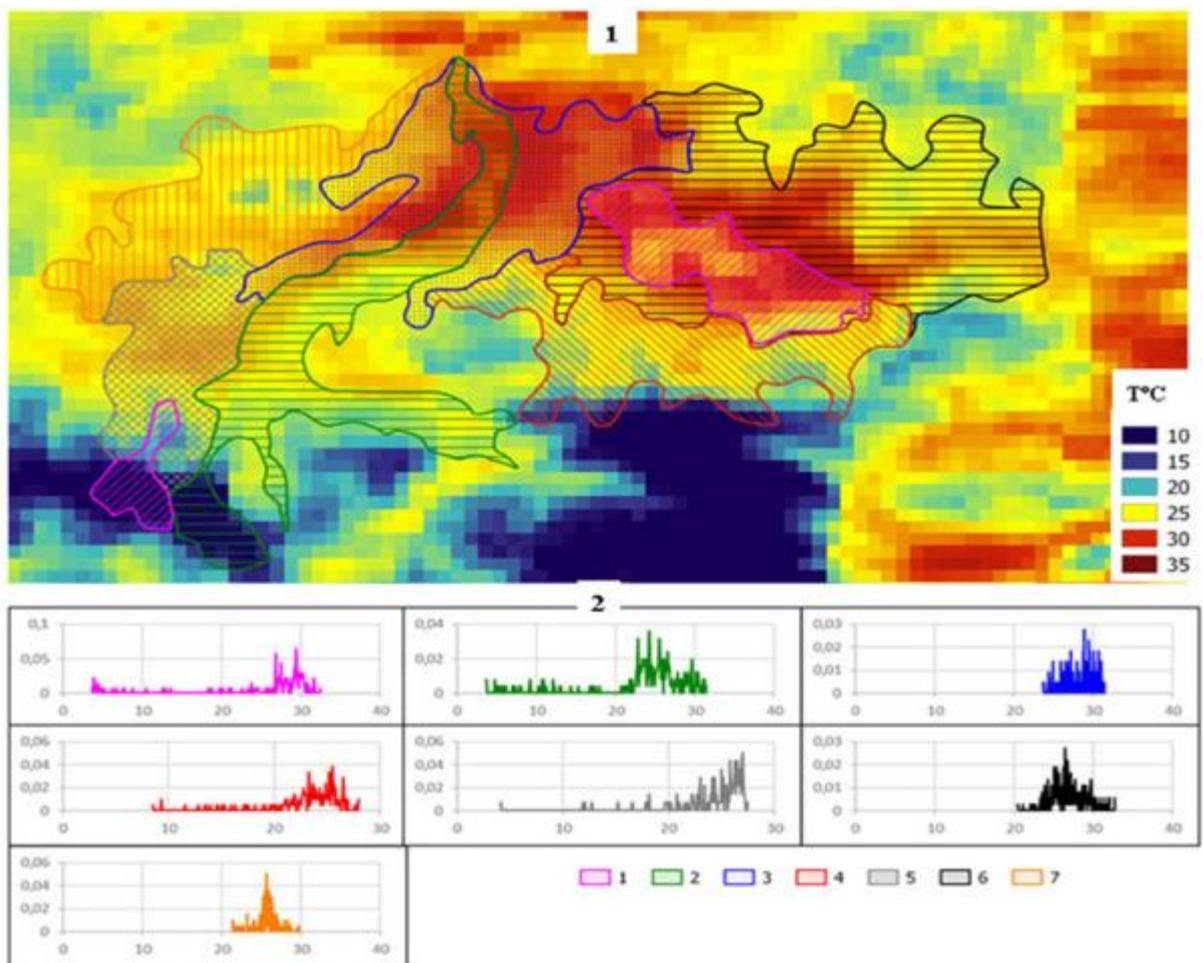


Рисунок 3. 1 - картографическая модель температурных полей плоскогорья Укок, полученных на основе анализа спутниковых данных дневных температур. 2 – статистический анализ совмещения границ почвенных контуров и температурных полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате выполненных исследований для выделения структурных единиц почвенного покрова высокогорий Алтае-Саянского региона были использованы количественные характеристики, температурного поля, полученные в результате совместного анализа временных рядов температурного мониторинга и спутниковых данных.
2. Интерпретация выделения типологических единиц структурной организации почвенного покрова представлена на основе статистического анализа совмещения границ и информационного

содержания контуров почвенного покрова и границ температурных полей - дневных и ночных температур, а также разницы температур двух скомпилированных серий, рассчитанных за 15-ти летний период.

3. Новизна подхода заключается в том, что картографические модели температурных полей, созданные на основе количественных показателей температур, обладают достаточной информативностью, позволяющей устанавливать взаимосвязи температурного режима с другими характеристиками объектов природной среды и подойти к решению проблемы выделения и типологии почвенно-экологических границ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]McBratney A.B., Mendonca Santos Brefin M., Minasny B. 2003. On digital soil mapping.- *Geoderma*, 117(1-2): 3-52.
- [2]Bouma J., 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation.- *Advances in Soil Science*, 9:177-213.
- [3]Pachepsky, Ya. A., Rawls, W.J., 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. - *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1748-1757.
- [4]McBratney A.B., Minasny B., Cattle S., Vervoort R. 2002. From Pedotransfer functions to soil inference systems.- *Geoderma*, 109 (1-2), 41-73.
- [5]Shein E.V., Arkhangel'skaya T. A. 2006. Pedotransfer functions: State of the art, problems, and outlooks.- *Eurasian Soil Science*, 10:1089-1099.
- [6]McBratney A. B., Minasny B. 2007. On measuring pedodiversity.- *Geoderma*, 141: 149-154.
- [7]Korsunov VM, Krasseha EN, Ral'din B.B. 2002. Methodology of Soil Ecological and Geographic Studies and Soil Cartography. 232 (In Russ.).
- [8]Shein E. V., Bannikov M. V., Troshina O. V., Churkina O. A. 2009. Temperature field of complex soilscapes (by the example of the Vladimir opolie region). - *Eurasian Soil Science*, 42: 129-136.
- [9]Van De Kerchovea, Lhermitte S., Veraverbekea S., Goossens R. 2013. Spatio-temporal variability in remotely sensed land surface temperature, and its relationship with physiographic variables in the Russian Altay Mountains.- *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 20:4-19.
- [10]Arkhangel'skaya T.A. 2014. Diversity of thermal conditions within the paleocryogenic soil complexes of the East European Plain: The discussion of key factors and mathematical modeling.- *Geoderma*, 213: 608-616.
- [11] Malone B., Jha S., Minasny B., McBratney A.B. 2016. Comparing regression-based digital soil mapping and multiple-point geostatistics for the spatial extrapolation of soil data.- *Geoderma*, 262: 243-253.
- [12]Kudryashova S.Ya., Kurbatskaya S.S, Chumbaev A.S., Mironycheva-Tokareva N.P., Kurbatskaya S.G., Samdan A.M., Mongush A.M., Bezborodova A.N., Miller G.F., Solovev S.V. 2016. Creation a system of geoecological monitoring protected areas of the Altai-Sayan region: remote and automated research, modern methods of field and laboratory studies of the soil cover and vegetation of high mountain landscapes.- *Proceedings of XIII Ubsunur International Symposium Ecosystems of Central Asia: Research, Conservation, Rational Utilization*: 40-50 (In Russ.).
- [13]Pestunov I.A., Rylov S.A., Berikov V.B. 2015. Hierarchical clustering algorithms for segmentation of multispectral images.- *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 4: 329-338.
- [14]Sinyavskiy Y.N., Pestunov I.A., Dubrovskaya O.A., Rylov, S., Melnikov P.V., Ermakov N.B., Polyakova M.A. 2016. Methods and technology for segmentation of images with high spatial resolution for studies of nature and man-made objects.- *Journal of Computational Technologies*. 1:127-140 (In Russ.).

**Глава III/51: РОЛЬ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ УЯЗВИМОСТИ ЛАНДШАФТОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА
(НА ОСНОВЕ ГИС И ДЗ)**

Chapter III/51: The Role of Geomorphological Mapping for Investigation of Landscapes' Vulnerability during Climatic Changes (Based on GIS and Remote Sensing)

Дарья А. Чупина*^{1,2}, Иван Д. Зольников^{1,2}, Елена Н. Смоленцева³

DOI 10.25680/7303.2018.26.14.244

*Эл.Почта: chupina_da@igm.nsc.ru

1. Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр. Коптюга 3, 630090 Новосибирск, Россия
2. Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова 2, 630090 Новосибирск, Россия
3. Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, д.8/2, 630090, Новосибирск, Россия

РЕЗЮМЕ. Предложен подход к выявлению наиболее уязвимых территорий Барабинской низменности при изменении климата на основе использования морфометрического анализа цифровой модели рельефа SRTM. Методика основана на положении о том, что одни формы и типы рельефа придают устойчивость ландшафтам, а другие – обуславливают их повышенную уязвимость к климатическим и антропогенным воздействиям. Поскольку для Барабинской низменности характерны однородный геологический субстрат и близкое залегание к поверхности грунтовых вод, то положение в рельефе имеет важное значение при распределении растительности и почв. Были выделены территории, на которых развиты ландшафты, испытывающие на себе влияние дополнительного поверхностного увлажнения и грунтовых вод, условно названные нами «гидроморфными»; а также «автоморфные» территории с ландшафтами, развивающимися вне тесной связи с грунтовыми водами. Составлены две прогнозные модели, учитывающие уязвимость ландшафтов Барабы как при иссушении, так и при увлажнении климата. Обе схемы уязвимости являются актуальными в связи с увеличением экстремальности климата и наличием короткопериодичных внутривековых климатических циклов для юга Западной Сибири.

Abstract. We present an approach to identify the most vulnerable areas of the Baraba lowland under climate change (aridification/humidification) using geomorphological information and the digital relief model SRTM. The method is based on the assumption that some landforms and their types increase resistance of landscapes, while others make them vulnerable to climatic and anthropogenic impacts. The Baraba lowland is characterized by a homogeneous geological substratum and shallow groundwater. Therefore, positions of vegetation and soils on the surface play an important role in their spatial distribution. The territory was divided into hydromorphic and automorphic landscapes. Hydromorphic territories are the areas which are affected by groundwater and additional surface moistening; the automorphic territories and their landscapes are less dependent on groundwater under normal atmospheric moisture conditions. We created predictive models of the Baraba landscapes' vulnerability both for aridification and humidification cases. These schemes are relevant because the south of Western Siberia is characterized by increasing climate extremes and presence of short-period intra-annual climatic cycles.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС-картографирование, цифровые модели рельефа, морфометрия, уязвимость, экзогенные процессы, Барабинская равнина

Keywords: GIS-based mapping, digital elevation models, geomorphometry, the vulnerability, the negative exogenic processes, the Baraba lowland.

ВВЕДЕНИЕ

Барабинская низменность в настоящее время активно эксплуатируется в сельскохозяйственном производстве. Из-за возрастающих рисков при использовании сельскохозяйственных угодий возникает необходимость прогнозирования сокращения ресурсных территорий. Такие риски среди прочего обусловлены возрастающей экстремальностью климата на фоне долговременного тренда к иссушению климата в регионе.

Изменения климатического увлажнения территории опасны как сами по себе, так последствиями, поскольку могут приводить к активизации ряда экзогенных процессов (ветровая и водная эрозия

почв), а также засолению/рассолению почвенно–грунтовой толщи [1]. Кроме того, при смене гидрологического режима происходят изменения в растительном покрове, когда характерные растительные сообщества замещаются ближайшими в схеме ценозов [2]. Таким образом, особое значение приобретает учет районов, где экосистемы наиболее уязвимы вследствие активизации экзогенных процессов, вызванных климатическими изменениями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследования расположен в пределах Барабинской слабоволнистой гривно–озерной равнины. Наличие на данной территории большого количества озер объясняется близким залеганием к поверхности грунтовых вод в понижениях рельефа, при этом питание осуществляется в основном за счет атмосферных осадков. Интразональные ландшафты современной Барабы представлены сложной мозаикой степных сообществ и галофитных лугов на солонцах и зарослей галофитов на солончаках, обсыхающими травяными болотами, зарастающими и заболачивающимися озерами, березовыми колками. При этом растительность часто занимает разную геоморфологическую позицию в зависимости от условий увлажненности. Например, лес в увлажненных условиях произрастает на гривах, в сухих – в западинах. Литогенная основа данной территории представлена в основном субэральным покровом, однородным по гранулометрическому составу и не оказывает значительного влияния на распределение растительности. Ландшафты Барабы имеют высокую чувствительность к величине годовых осадков. При изменениях влажности растительность мигрирует с одних форм рельефа на другие. Таким образом, геолого-геоморфологические условия в районе исследования являются причиной сильной зависимости растительности от увлажнения.

Для картографирования геолого-геоморфологического каркаса исследуемой территории была использована методика на основе морфометрического анализа рельефа [3]. В качестве основы используется цифровая модель рельефа SRTM с пространственным разрешением 3 арксекунды, которая находится в открытом доступе (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Построение и обработка морфометрических показателей производились в программном пакете ArcGIS 10.2.1. Методика схематично представлена на рисунке 1. По цифровой модели рельефа были построены морфометрические показатели, по которым в автоматизированном режиме были выделены следующие формы рельефа, характерные для данной территории: гривы, озерные котловины, равнина (рис.1Б). Типы рельефа на указанной территории выделялись по удельному площадному соотношению доминирующих форм рельефа методом скользящего окна. Были закартографированы четыре типа рельефа: гривный, равнинный, гривно-озерный, озерный (рис.1А). Для разделения типов рельефа на два подтипа по степени увлажненности разработан морфометрический показатель, отражающий вертикальный разброс высот относительно усредненной поверхности. В таком случае гидроморфным подтипам (рис.1Г) соответствуют отрицательные значения и вогнутые формы рельефа, к которым приурочены ландшафты, испытывающие на себе влияние дополнительного поверхностного увлажнения и грунтовых вод, автоморфным подтипам – территории с положительными значениями этого показателя (рис.1В). Ландшафты автоморфного подтипа рельефа развиваются вне тесной связи с грунтовыми водами при нормальном атмосферном увлажнении. Выделенные нами четыре типа рельефа, а именно: гривный, равнинный, гривно-озерный, озерный, в указанной последовательности характеризуются уменьшением автоморфности и увеличением гидроморфности. Такие выводы были сделаны на основе предварительного изучения карт четвертичных отложений и объяснительных записок к ним, а также на распределении высотных отметок. Затем каждый из этих типов был разделен на два подтипа. Таким образом, мы получили схему ранжирования территории по степени автоморфности/гидроморфности, состоящую из восьми выделов (градаций). Затем на основе экспертной оценки почвоведов и геоботаников были диагностированы возможные экзогенные процессы, которые могут развиваться для каждого отдельного типа и подтипа рельефа в зависимости от тренда климатических изменений (иссушение/увлажнение). Была разработана шкала оценки степени уязвимости: I – очень слабая, II – слабая, III – средняя, IV – сильная, V – очень сильная.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При гумидизации климата одним из негативных последствий для территории Барабы будет повышение уровня грунтовых вод, что в дальнейшем может приводить к заболачиванию или затоплению, а также развитию водной эрозии. При аридизации наиболее негативными процессами

здесь могут быть: деградация гидроморфных участков, вплоть до полного высыхания современных озёр [4] и появления на их месте солончаков и сильно засоленных почв; развитие дефляционных и водно-эрозионных процессов на незакрепленных растительностью поверхностях. Автоморфные участки в этом случае также дестабилизируются. На них может происходить уменьшение продуктивности растительных сообществ, снижение проективного покрытия растительности и её почвозащитной роли и как следствие – активизация дефляционных процессов, водной эрозии (при сильных ливневых осадках из-за экстремальности климата). Масштаб проявления этих процессов для разных типов рельефа и их подтипов может значительно различаться.

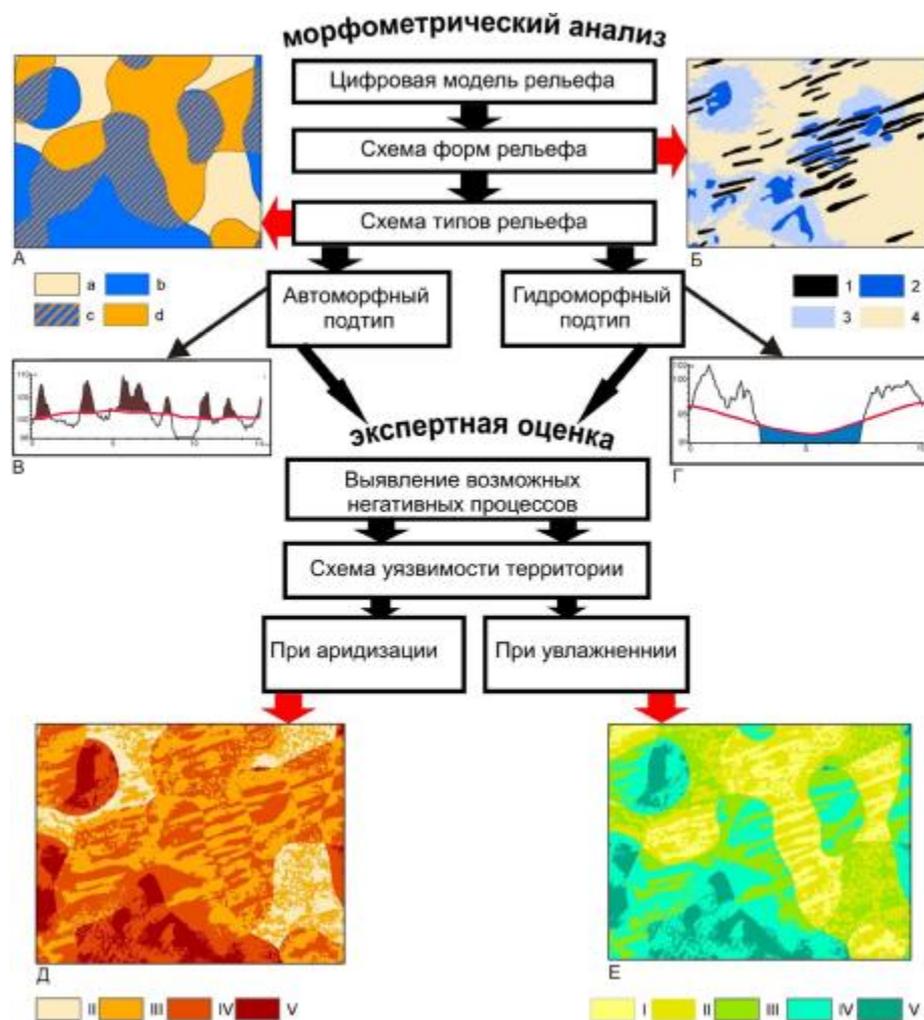


Рисунок 1 - Методика выявления наиболее уязвимых территорий при активизации экзогенных процессов, обусловленных иссушением/увлажнением климата.
 Условные обозначения: Типы рельефа (А): а – равнинный, b – озерный, c – гривно-озерный, d – гривный; формы рельефа (Б): 1 – гривы, 2 – современные озера, 3 – палеозера, 4 – равнина; подтипы рельефа (В,Г): коричневый цвет – автоморфные подтип, синий цвет – гидроморфный подтип; степень уязвимости (Д-Е): I – очень слабая, II – слабая, III – средняя, IV – сильная, V – очень сильная.

В случае гумидизации климата (рис.1Е) связь уязвимости и подтипов рельефа практически прямая – степень уязвимости территорий с различным типом рельефа возрастает в такой последовательности: гривный, равнинный, гривно-озерный, озерный. Степень уязвимости гидроморфных участков будет выше на градацию, чем степень уязвимости автоморфных участков. В случае аридизации климата (рис.1Д) градация уязвимости типов рельефа и их подтипов является более сложной: отсутствуют слабо уязвимые участки, сильно уязвимыми становятся автоморфные поверхности гривного рельефа, а также озёрный рельеф в целом. Наиболее устойчивыми

(наименее уязвимыми) являются территории с равнинным рельефом. Для них прогнозируется слабая и средняя степень уязвимости, как при отрицательном, так и при положительном тренде увлажнения. Территории с озёрным рельефом являются наиболее уязвимыми при любом климатическом сценарии. Во влажные периоды они заполняются водой или заболачиваются, в засушливые – засоляются, на них развиваются эоловые процессы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На территории Барабинской низменности пространственное распределение возможных изменений компонентов природной среды (растительность, почвы, водные объекты) контролируется геологическим каркасом территории (рельеф – субстрат).
2. Прогнозные модели показали, что наименее уязвимыми являются участки с равнинным рельефом: для них прогнозируется слабая и средняя степень уязвимости, в случае аридизация/гумидизация соответственно. При аридизации сильно уязвимыми становятся автоморфный подтип гривного рельефа. Территории с озёрным рельефом являются наиболее уязвимыми в обоих случаях. Это свидетельствует о том, что тренд к аридизации является наиболее опасным для юга Западной Сибири, поскольку почвы гривного рельефа в настоящее время наиболее активно эксплуатируются в сельском хозяйстве. В то же время почвы, развитые на постакальных территориях являются потенциальными источниками земельных ресурсов.
3. Полученные результаты дополняют существующие представления о пространственном распределении трансформаций ландшафтных компонентов при изменении условий увлажнения (гумидизация – аридизация климата) и показывают их дискретно-мозаичный характер.
4. Методика позволяет прогнозировать развития негативных процессов и явлений в природно-территориальных комплексах регионального и локального уровня, и на этой основе разрабатывать адекватные меры по снижению ущерба от их последствий. Это имеет большое практическое значение в связи с усилением аридности и экстремальности климата на юге Сибири.

Работа выполнена согласно проекту НИР № 0330-2015-0001.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Meyer B.C., Schreiner V., Smolentseva E.N., Smolentsev B.A. Indicators of desertification in the Kulunda steppe in the south of Western Siberia // Archives of Agronomy and Soil Science. 2008. V. 54. №6. pp. 585–603. <http://dx.doi.org/10.1080/03650340802342268>
- [2] Королук А.Ю. Проявление динамики экосистем в пространственной структуре растительного покрова на юге Западной Сибири // Растительный мир Азиатской России. 2010, №2 (6). С. 12–16
- [3] Чупина Д.А. Автоматическое выделение форм и комплексов рельефа на основе морфометрического ГИС-анализа (на примере Венгеровского района Новосибирской области) // Геоморфология. №3. 2014. С. 43–50
- [4] Zolnikov I.D., Glushkova N.V., Smolentseva E.N., Chupina D.A., Pchel'nikov D.V., Lyamina V.A. GIS and Remote Sensing Data-Based Methods for Monitoring Water and Soil Objects in the Steppe Biome of Western Siberia // Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia, series Springer Water, Springer, 2016, P. 253-269.

Часть 11 Моделирование ландшафтов и системы поддержки решений Part 11 Landscape Modelling and Decision Support

Основная глава 11.1 Моделирование агроэкосистем Main Chapter 11.1 Modelling of Agro-Ecosystems

Глава III/52: ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ ЛАНДШАФТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ Chapter III/52: Basic Approaches of Landscape Modelling

Владислав В. Сысуев

DOI 10.25680/2575.2018.98.34.245

Эл. Почта: v.v.syvs@mail.ru

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, 119991, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ. Рассмотрены основные концепции построения детерминированной теории ландшафтов. Показано, что использование понятий дифференциальной геометрии и уравнений математической физики являются как минимум необходимым условием теоретического описания структуры и функционирования геосистем. Алгоритмы выделения природных территориальных комплексов по параметрам градиентов геофизических полей строятся на основе классических определений ландшафтоведения и физической географии. Модели функционирования геосистем через краевые условия и параметры связаны со структурой ландшафтов. Модели верифицированы по полевым экспериментальным данным в различных природных условиях.

Abstract. The chapter deals with basic concepts of constructing a deterministic theory of landscapes. It is shown that the use of the concepts of differential geometry and mathematical physics are at least a necessary condition for the theoretical description of the structure and functioning of geosystems. Algorithms for the differentiation of natural territorial complexes on the gradients geophysical fields parameters are based on the classical definitions of landscape and physical geography. Function models of geosystems through boundary conditions and parameters are closely related to the structure of landscapes. Models are verified by field experimental data obtained under different environmental conditions.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическое моделирование, геофизика ландшафта

Keywords: mathematical modelling, landscape geophysics

ВВЕДЕНИЕ

Физико-математическое моделирование является методологической основой создания теории геосистем, которая состоит из двух взаимосвязанных частей: теории структуры и функционирования ландшафта. Это направление развито на идеях в основном российских ученых и приобрело большое число сторонников (Арманд Д.Л., Викторов А.С., Дьяконов К.Н., Иванов К.Е., Карпов И.К., Кучмент Л.С., Палагин Э.Г., Павлов А.В., Пузаченко Ю.Г., Ретеюм А.Ю., Сиротенко О.Д., Хильми Г.Ф., Черкашин А.К., Чудновский А.Ф., Шарый П.А., Шеин Е.В., и др.)

ОБЩЕФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОСТУЛАТЫ

Особенностью развития теории геосистем является новое осмысление *фундаментальных физических основ* ландшафтоведения и физической географии. Соотнесение современных физических и термодинамических постулатов с анализом геосистем оказывается далеко не тривиальным. Стала очевидна необходимость рассмотрения ландшафтов с точки зрения динамических систем с привлечением соответствующего математического аппарата моделирования. Различная степень детализации процессов на разных пространственно-временных масштабах, а также сильная нелинейность природных процессов требуют применения разных математических методов – от теории поля и популяционной динамики, до неравновесной термодинамики, синергетики, оптимизации и стохастических методов. Вместе с тем, *эмпирические концепции физической географии* позволяют ассимилировать фундаментальные физические законы для описания структуры и функционирования ландшафтов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТОВ

Теоретическое *описание геоструктуры*, т.е. стационарного (на определенном временном интервале) состояния динамической геосистемы, начинается с выявления основных *структурообразующих процессов* и морфометрических параметров геофизических силовых полей, определяющих эти процессы [1]. В результате формальный математический аппарат (алгоритм) выделения (классификации) наименьших и иерархических единиц поверхности рельефа на основе этих параметров приобретает фундаментальный геофизический смысл.

Модели и классификации ландшафтов отвечают принципам термодинамики необратимых процессов (по Онзагеру) и могут осуществляться: 1) по системообразующим потокам; 2) по градиентам силовых полей (инсоляции, гравитации и др.); 3) по феноменологическим коэффициентам (обобщенным проводимостям). Например, по В.Н. Солнцеву [2] необходимо рассматривать *три механизма* ландшафтной структуризации – геостационарный, геоциркуляционный и биоциркуляционный по отдельности, либо одновременно.

Геосистемные аксиомы и постулаты:

- 1). *Выделение элементарного объекта. Пиксели* трехмерной цифровой модели рельефа (ЦМР) соответствующего масштаба *выступают элементарными материальными точками*, (по аналогии с материальными частицами теоретической механики), из которых производится построение элементарных ландшафтов и их иерархии.
- 2). *Параметрами состояния* ландшафтов являются ландшафтно-геофизические данные (координаты, параметры градиентов полей инсоляции, геопотенциала, температуры, химических потенциалов, параметры состояния поверхности Земли, параметры продуктивности почв и др.).
- 3). *Физические законы* разной степени фундаментальности основа описания структуры и процессов в ландшафтах – фундаментальные законы сохранения основной инструмент для выведения теоретических моделей, градиентные законы (например, законы Фурье, Фика, Дарси и др.) описывают конкретные процессы переноса.

Геофизические параметры состояния ландшафтов – измеряемые величины:

- 1) по ЦМР – морфометрические параметры, описывающие градиенты индуцирующих силовых полей; 2) по цифровым данным дистанционного зондирования – параметры состояния земной поверхности; 3) измеряемые в натуре, 4) в лабораторных условиях, 5) в специальных экспериментах и т.д.

1). *Выделение ландшафтных структур на основе пространственного анализ параметров, раскрывающих механизмы перераспределения рельефом геофизических полей.*

Вопросы морфометрической формализации земной поверхности в поле силы тяжести систематизированы в работе [3]. Закономерно содержательное выделение трех групп геоморфометрических параметров [4], описывающих:

- распределение солнечной (и тепловой) энергии: доза прямой солнечной радиации (сезонная, годовая); экспозиция и освещенность склонов; уклон;
- распределение и аккумуляцию воды под действием силы тяжести: удельная площадь сбора и дисперсивная площадь; глубина *B*-депрессий и высота *B*-холмов; уклон;
- механизмы перераспределения вещества под действием гравитации: горизонтальная, вертикальная и средняя кривизна, уклон; высота.

На рисунке 1 представлены карто-схемы значений некоторых морфометрических величин в пределах территории Национального парка «Валдайский». Здесь на небольшой территории расположены краевые зоны четырех стадий валдайского оледенения, что предопределило большое разнообразие форм рельефа и пёстрый литологический состав четвертичных отложений. Такое разнообразие рельефа и литологии обуславливает высокую степень ландшафтного и биологического разнообразия территории. *Физический смысл используемых величин* предельно ясен. Так доза радиации характеризует потенциальный приход энергии; экспозиция и уклон склонов – компоненты вектора градиента геопотенциала; горизонтальная кривизна – дивергенция линий тока; вертикальная кривизна – производная фактора крутизны, характеризующая величину выпуклости-вогнутости склонов; удельная водосборная площадь показывает, с какой площади в каждый элемент поверхности могут собираться со склонов сыпучие и жидкие вещества, и является составляющей ряда индексов (индекс мощности водных потоков, эрозионный индекс, и др.).

2). *Состояние поверхности Земли* (растительного, снежного и др. покровов) по цифровым данным спектральных каналов аэрокосмической съемки, и специальных индексов на ее основе (например, нормализованных разностных вегетационных, снеговых, влажностных - NDVI, NDSI, NDWI, и др. индексов).

3). *При измерении параметров в натуре*, наряду с традиционными комплексными ландшафтными и др. полевыми методами, необходимо использование автоматизированных комплексов регистрации физических и химических параметров приземных слоев атмосферы, природных вод и почв. Перспективно использование методов прикладной геофизики, достоинства которых связаны с тем, что они базируются на измерении гравитационных, электрических и электромагнитных параметров.

4). *Пространство географических координат* задается построением цифровой модели рельефа. ЦМР строятся разными способами для достижения максимальной разрешающей способности конкретного иерархического уровня геосистем. Например, по горизонталям детальной топографической карты М 1:10 000 методом регулярной сетки (grid) размер пикселя может быть получен и 10x10 м и даже 5x5 м. Однако размер пикселя ЦМР, как правило, навязан также разрешающей способностью аэрокосмической и другой дистанционной информации. Например, разрешением съемки Landsat навязан размер пикселя 28x28 м, который позволяет выделять равнинные ПТК уровня рощиц.

Методы численной классификации являются формализованными методами создания карт структуры геосистем. Их важнейшая особенность – возможность численных экспериментов и прогнозирования на основе содержательного изменения значений параметров.

1). *Типологическая модель структуры ландшафта*. Выбор параметров проводится в соответствии с классическими определениями [5]. Результаты классификаций существенно зависят от весовых значений и количества параметров, изменяя которые можно оптимизировать классификацию элементов рельефа по известной ландшафтной структуре. При таком моделировании подчеркнем необходимость ландшафтного подхода, который позволяет выявить роль главных факторов дифференциации природных территориальных комплексов (ПТК) и отсеять второстепенные или зависимые параметры.

Методы численной классификации позволяют проводить не только потенциальную дифференциацию, но и интеграцию ПТК по геофизическим параметрам любым из агрегационных методов классификации. Ландшафтная карта, полученная в результате численных экспериментов, достаточно близко воспроизводит границы ПТК разных рангов, полученных классическим методом [4] (Рисунок 2). Однако на основе формальных классификаций данных ДДЗ и ЦМР невозможно выделение структуры почвенного растительного покрова. Почвенный покров и литология выделяется по косвенным признакам, невозможно выявить генезис выделяемых комплексов, что ограничивает метод в классическом понимании ландшафтов. В этом направлении перспективно применение методов математического моделирования ландшафтного рисунка [6].

2). *Функциональная модель структуры ландшафтов* низкого ранга определяется главным образом процессами водного стока. Следовательно, задача классификации – построение иерархии водосборных геосистем малого порядка по морфометрическим величинам, описывающим перераспределение воды рельефом в поле гравитации (высота, уклоны, удельная площадь водосбора, горизонтальная кривизна). Иерархия водосборных геосистем определяется в соответствии со схемой Стралера-Философова. Анализ параметров водосборов и гидрологических измерений показывает тесную связь структуры и функционирования геосистем. Это позволяет моделировать гидрологическое функционирование ПТК и рассчитывать скорости и расходы водотоков только на основе априорной информации геостационарных моделей геосистем и климатических данных [4].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛАНДШАФТОВ

Абиогенные процессы.

1). Реальное движение среды (водной, воздушной) в зависимости от приложенных к ней сил описывается в терминах механики сплошной среды. Уравнение математической физики (Навье-Стокса, Рейнольдса, тепло-влаги-массопереноса и др.) приводятся к моделям природных процессов (склоновый и русловой сток, инфильтрация влаги в почвах, перенос растворенных веществ в сорбирующих агрегированных почвах и т.д.), в соответствии с классификацией геосистемных процессов и условиями соответствия моделей процессов по параметрам [1].

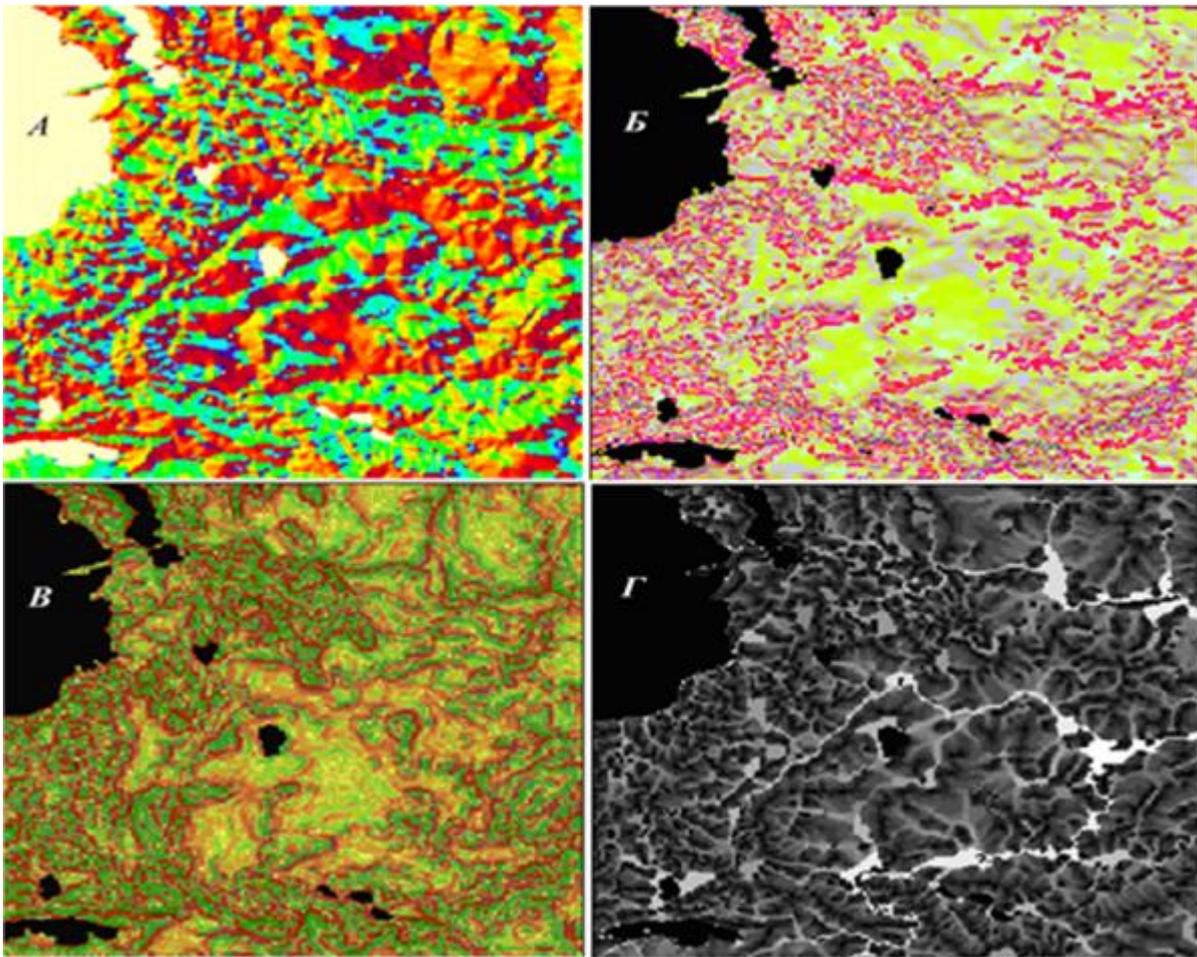


Рисунок 1. Цифровые карты морфометрических параметров рельефа исследованной территории НП «Валдайский». А – ориентация склонов; Б – относительная величина годового радиационного баланса; В – вертикальная кривизна; Г – удельная площадь водосбора

2). *Физико-математические модели с распределенными* параметрами миграции вещества обеспечивают соблюдения условий идентичности параметров моделей и измеряемых в природе величин, использования априорной и накопленной эмпирической информации, включения моделей частных процессов в общие теоретические модели.

3). *Геофизическая дифференциация рельефа и ПТК* (на основе ЦМР и ДДЗ) являются *граничными условиями*, обеспечивающих однозначность и единственность решения дифференциальных уравнений переноса в биоциркуляционных и геоциркуляционных задачах. Количественный учет пространственно-временных характеристик структуры, иерархии и характерные времен структурообразующих процессов ПТК.

4) *Распределенный характер моделей* позволяет использовать доступные физически измеряемые параметры в виде адекватном исследуемой системе.

Процессы биогенного переноса вещества и энергии.

1). *Продукционные процессы* в растительном покрове, рассматриваются на основе физических моделей переноса излучения, тепла, влаги и элементов питания в среде обитания и внутри растений и моделей фотосинтеза, дыхания и перераспределения ассимилятов.

2). Динамика пространственной и возрастной структуры леса описывается моделями диффузионного типа и на основе уравнения неразрывности.

3). Задача перехвата и трансформация дождевых осадков пологом леса рассматривается в качестве примера сшивания процессов биологической и водной миграции вещества.

4). Все модели связаны по параметрам.

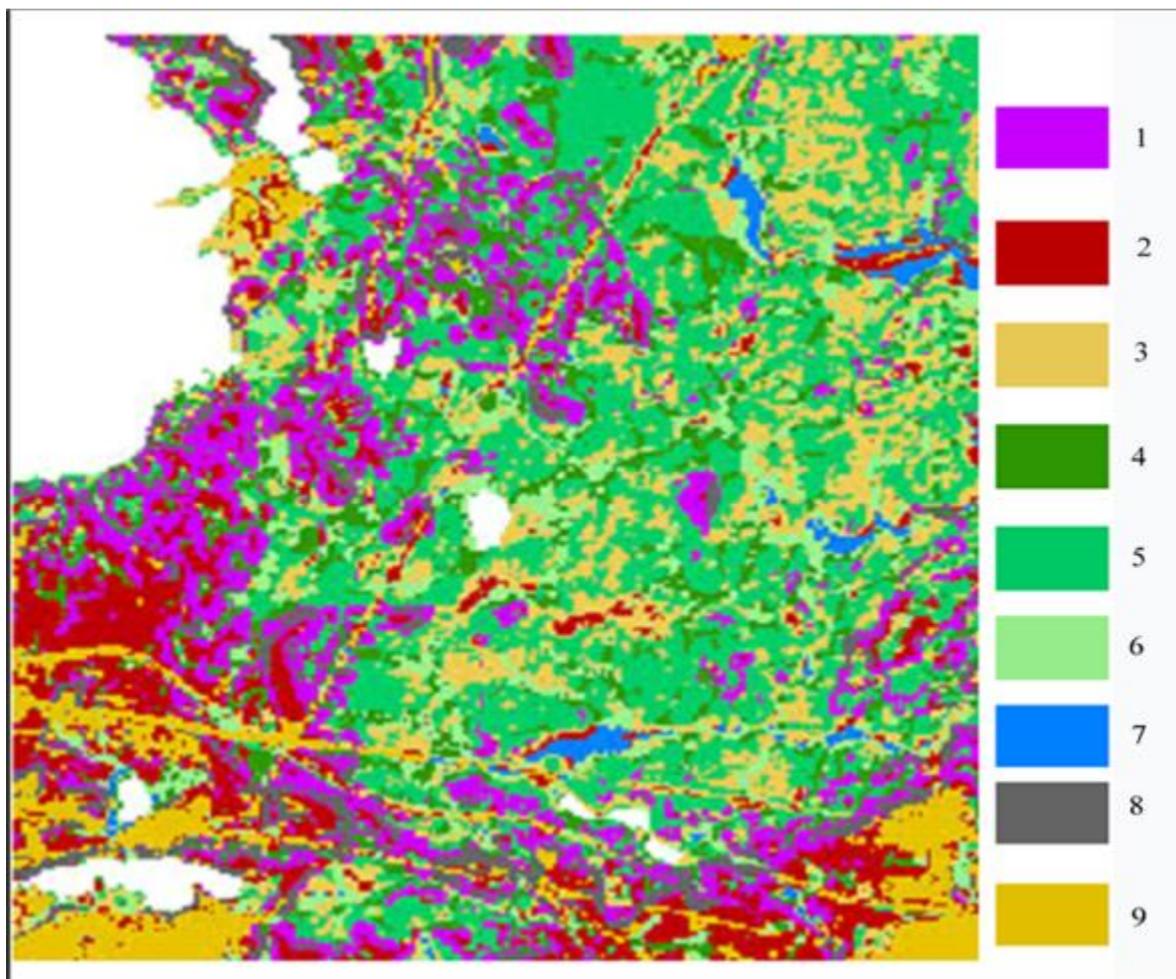


Рисунок 2. Структура ЛТК на основе классификации рельефа по параметрам градиентов геофизических полей и космической съемки Landsat-7 ETM.

- 1 – моренные гряды и камовые холмы с суглинистыми дерново-подзолистыми почвами под разнотравно-кисличными ельниками
- 2 – вершины камовых холмов и гряд с песчаными дерново-подзолами под сосняками зеленомошными, беломошными и разнотравными
- 3 – подножья холмов и ложбины с дерново-глеевыми и дерново-подзолистыми контактно отбеленными почвами под смешанным лесом
- 4 – речные и озерные террасы с дерново- и торфяно-глеевыми почвами под ельниками и смешанными лесами
- 5 – гряды и песчаные холмы с дерново-подзолистыми почвами под сосняками
- 6 – плоские и выпуклые верховые болота с мощными торфами с редкостойными сосняками сфагновыми
- 7 – речные поймы с дерново-глеевыми почвами под заливными лугами
- 8 – крутые склоны холмов и гряд разного генезиса с дерновыми почвами под хвойным лесом
- 9 – антропогенно измененные и антропогенные ландшафты (дороги, просеки ЛЭП, карьеры, сельскохозяйудия, лесопитомники и селитебные)

Обобщенная модель геосистемы.

Пионерные разработки единой теории структуры и процессов в органогенных болотных ландшафтах на основе гидродинамических законов и гидроморфологических уравнений принадлежат К.Е. Иванову [7]. По примеру морфогидрологической модели болота, важнейший этап разработки теории – описание структуры ландшафта на основе гидродинамических процессов.

Применительно к уровню лесных геосистем первых порядков комплексная модель, связанная по параметрам, должна включать блоки [4]: 1) расчета граничных условий на основе цифровой модели рельефа и дифференциации (синтеза) ЛТК с использованием ДДЗ; 2) динамики разновозрастного многопородного древостоя; 3) биогеохимического (малого) круговорота химических веществ; 4) пространственно-временной трансформации поля атмосферных осадков под пологом леса; 5) трансформации химического состава осадков пологом леса; 6) вертикального влагопере-

носа с учетом структуры и горизонтов почв, а также поглощения влаги корнями растений; 7) миграции химических веществ в сорбирующей агрегированной почве при фильтрации в ненасыщенных условиях с учетом механизмов поглощения корнями растений; 8) гидрологического стока с подблоками весеннего талого и ливневого поверхностного стока; 9) гидрохимического поверхностного стока с учетом процессов в зоне активного взаимодействия с почвенными горизонтами и миграции твердых взвесей; 10) расчета уровней и динамики стока почвенно-грунтовых вод; 11) миграции химических веществ с потоком почвенно-грунтовых вод; 12) расчета динамики и химического состава вод временных и постоянных водотоков; 13) базу биогеофизических параметров, гидроклиматических, почвенно-гидрофизических, и др. данных. Сложность модели обусловлена сложностью реальных процессов в геосистемах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Единый детерминированный физико-математический подход для описания структуры ПТК и природных процессов функционирования – основа создания теории геосистем.
2. Геофизический подход позволяет в зависимости от выбора параметров выделять как типологические, так и функциональные территориальные классификационные единицы ландшафтоведения. Получены достоверные взаимосвязи структуры и функционирования геосистем низкого иерархического уровня.
3. Морфометрическое описание рельефа и геофизическая дифференциация ПТК являются граничными условиями, которые обеспечивают однозначность и единственность решения дифференциальных уравнений переноса в задачах функционирования ландшафтов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сысуев В.В. Структурообразующие геосистемные процессы: характерные масштабы и моделирование // Вестник Московского университета. Сер. 5: геогр., № 1, 2002. – С 22-28
- [2] Солнцев В.Н. Системная организация ландшафтов. – М.: Мысль, 1981. – 239 с
- [3] Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. // *Mathematical Geology*, 1995, V. 27. No 3. – P. 373-390.
- [4] Сысуев В.В. Основные концепции физико-математической теории геосистем // «Горизонты ландшафтоведения» Вопросы географии. Вып. 138. – М.: Изд-во «Кодекс», 2014. – С. 65-100.
- [5] Дьяконов К.Н. Базовые концепции и понятия ландшафтоведения // Географические научные школы Московского университета. – М., Городец, 2008. – С. 348-381
- [6] Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. – М., Наука, 2006. – 252 с.
- [7] Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. – Л., Гидрометеиздат, 1975 – 280 с.

Chapter III/53: DYNAMICALLY ADJUSTED FORECASTING OF AGRO-LANDSCAPE PRODUCTIVITY USING MASSIVE COMPUTATIONS OF CROP MODEL IN GIS ENVIRONMENT

Глава III/53: Динамически уточняющийся прогноз продуктивности агроландшафтов с использованием массовых расчетов динамической модели агроэкосистемы в среде ГИС

Alex Topaj^{1*}; Vladimir Badenko²; Sergey Medvedev¹; Vitaly Terleev³

DOI 10.25680/3309.2018.28.99.246

* Email: alex.topaj@gmail.com

1. Agrophysical Research Institute, 14 Grazhdansky pr., St. Petersburg, Russia

2. Saint Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya emb., St. Petersburg, Russia

3. Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, 29 Polytechnicheskaya ul., St. Petersburg, Russia

ABSTRACT. An original approach to the integration of dynamic crop models, external information resources, and GIS based on an earlier developed universal framework for computer automation of multivariate computer experiment (APEX) is offered. The main objective of the research was to create the tool for online adjusted model-based dynamic forecast of agro-landscape crop productivity. The technical and structural modifications of APEX are described. As a result of the modification an universal and scalable software for massive calculations of dynamic model of agro-ecosystem during the monitoring and evaluation of crop productivity potential of the agricultural landscapes with different spatial coverage have been developed. The applicability and usefulness of proposed approach is demonstrated on the example of computer experiment for estimation of summer wheat productivity in all-Russian coverage for 2017 growing season.

Резюме. В статье предлагается оригинальная методика использования динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений для получения оперативных динамически-уточняющихся прогнозов ожидаемой урожайности основных сельскохозяйственных культур в крупном географическом масштабе. Методика включает в себя интеграцию моделей, внешних информационных ресурсов открытого доступа и географических информационных систем, осуществляемую на платформе ранее разработанного коллективом авторов программного решения – среды автоматизации многофакторного компьютерного эксперимента в агроэкологии **APEX**. Описаны технические и структурные изменения, проведенные в среде **APEX** для достижения поставленных целей. Отмечено, что в результате получен универсальный масштабируемый инструмент для массовых расчетов произвольной динамической модели агроэкосистемы для анализа, мониторинга и прогноза продуктивности посевов на сельскохозяйственных площадях большого пространственного покрытия. Применимость и полезность предложенной методики и разработанных программных решений продемонстрированы на примере результатов специального долгосрочного компьютерного эксперимента по оценке урожайности яровой пшеницы для всей зерносеющей зоны России в период вегетации 2017 года.

KEYWORDS: crop simulation model, geographical information system, adaptive-landscape agriculture, multivariate computation, computer experiment

Ключевые слова: имитационная модель урожайности, географическая информационная система, адаптивно-ландшафтное земледелие, многовариантный расчет, компьютерный эксперимент

INTRODUCTION

Crop simulation modeling is a well-known and powerful method for analysis, monitoring, and decision support in agronomy and agroecology [1]. The modern dynamic process-based crop model is a comprehensive recursive mathematical algorithm that calculates the state of simulated agroecosystem "step by step". The algorithm takes into consideration all the principal processes and phenomena that determine the crop productivity such as water and nutrition balance, plant growth and development, etc. However, the possible application of such models was limited during previous long-time period both in temporal and spatial scales. Besides, they have traditionally been developed as one-dimensional or one-point [2, 3]. It means that each individual variant of the model execution requires specific input data: the particular information about soil characteristics, topography, weather, etc. for the rather narrow modeling location [4, 5]. There are many incentives for applying a crop model over an area larger than for which it has been developed [6]. Expanding the scope of the crop model application for calculations in geographically dis-

tributed agricultural landscapes is often limited by availability of necessary input data as well as capacity of used computer technologies [7, 8].

The last mentioned gap is almost filled now by development and using of proper software tools (GIS and databases) as model infrastructure. Coupling geographic information systems (GIS) with agronomic models is attractive because it permits the simultaneous examination of spatial and temporal phenomena in agro-landscapes [9, 10]. Different approaches were proposed for interfacing GIS with agronomic models: 1) **linking** is defined as merely passing input and output between a GIS and a model; 2) **combining** is defined as automatic data exchange and GIS tool functions, and 3) **integrating** is defined as embedding a model in a GIS or vice versa [11, 12].

The first problem seems to be more complex than the rest. Because of the detailed input requirements for agronomic models, expanding the models from one-point to a spatially distributed application can greatly increase the volume of input data and requires the new sources of information support. Perhaps, the only suitable solution here is the close model integration with "cloud" technologies, i.e. communication with local (electronic soil maps) as well as global web-resources (open meteorological services and remote sensing data services [13, 14]).

The paper offers an original approach to the integration of dynamic crop models, external information resources, and GIS based on an earlier developed universal framework of computer automation of multi-variate computer experiment.

PRINCIPAL APPROACH

The main objective of described research was to create the tool for on-line adjusted model-based dynamic forecast of crop productivity in land scale. The principal approach is modification and extension of existing software **APEX** as a universal and scalable environment for massive calculations using dynamic model of agro-ecosystem for the monitoring and evaluation of crop productivity potential of the agricultural landscapes with different spatial coverage.

METHOD

APEX (Automation of Polivariant **EX**periments) software has been chosen as the main tool of the research. It is originally developed for design and performing of multi-factor computer experiments with dynamic crop models and encapsulates two basic functionalities: 1) versatile repository of the descriptors of arbitrary crop models, and 2) generic environment for their polyvariant analysis [15]. The polyvariant analysis means designing and preparation of multivariate computer case study, performing the model runs in batch mode and applying advanced procedures of statistical treatments for results obtained.

Principal modifications in **APEX** structure and functionality, which have been done to reach the objective of the research, are summarized below:

- **APEX** database structure was extended by pre-determined "static" or "model-independent" datasets for such factors as "territory" and "soil". They can be imported from external GIS database or local soil map resource (*reg_geoSoil* Table in Fig.1). For the described project we used the soil map and linked database of soil properties from Unified State Register of Russian Soil Resources (USRRSR). The mentioned Soil Register is designed by experts of Dokuchaev's Soil Institute and is published on the official website of Russian Ministry of Agriculture [16].
- The data having dynamic character in the crop model calculations (e.g., current meteorological information) must be consequently refreshed as the corresponding actual information occurs. The mechanism of this operational replenishment is the online substitution the initial "synthetic" values assigned from pre-determined benchmark weather datasets included in the project. For the case these benchmark weather datasets was formed on the base of actual existing weather scenarios (years-samples) for 153 selected points located in all administrative regions of the Russian Federation. More detailed the activity contained:
 - Analysis of open source data (the site of Rosstat, the media, regional statistical offices, etc.) on the economic productivity of major crops in Russia's regions in order to select the representative historical growing seasons ("good", "average" and "bad" year-samples) for each site.
 - Download the archives of meteorological information for the selected year-samples for the reference meteorostations in each monitored region from local domestic weather information resources (www.meteo.ru, www.rp5.ru).
 - Processing of the obtained data and formation specific benchmark locations and weather datasets in neutral model-invariant formats (*reg_geoBenchmarkWeather*, *reg_geoLocation*) in the **APEX** database. Linking location datasets with soil datasets.

- Design and implementation a functionality for automatic replenishment of actual weather datasets for recent and short-term forecasted weather by periodic access to open meteorological Internet servers (<https://developer.worldweatheronline.com/api>).
- Massive model calculations based on a representative set of spatial points are carried out within the framework of a common ideology of batch running of all the scenarios generated by project computational experiment. Each scenario is linked with particular point and is determined by the corresponding gradations of the "soil" and "territory/location" factors. The selected part of simulation results for variants (estimated crop yield etc.) can be exported in specific resulting datasets having geo-reference field. These datasets can be interpolated and visualized as thematic electronic maps in external GIS environment.

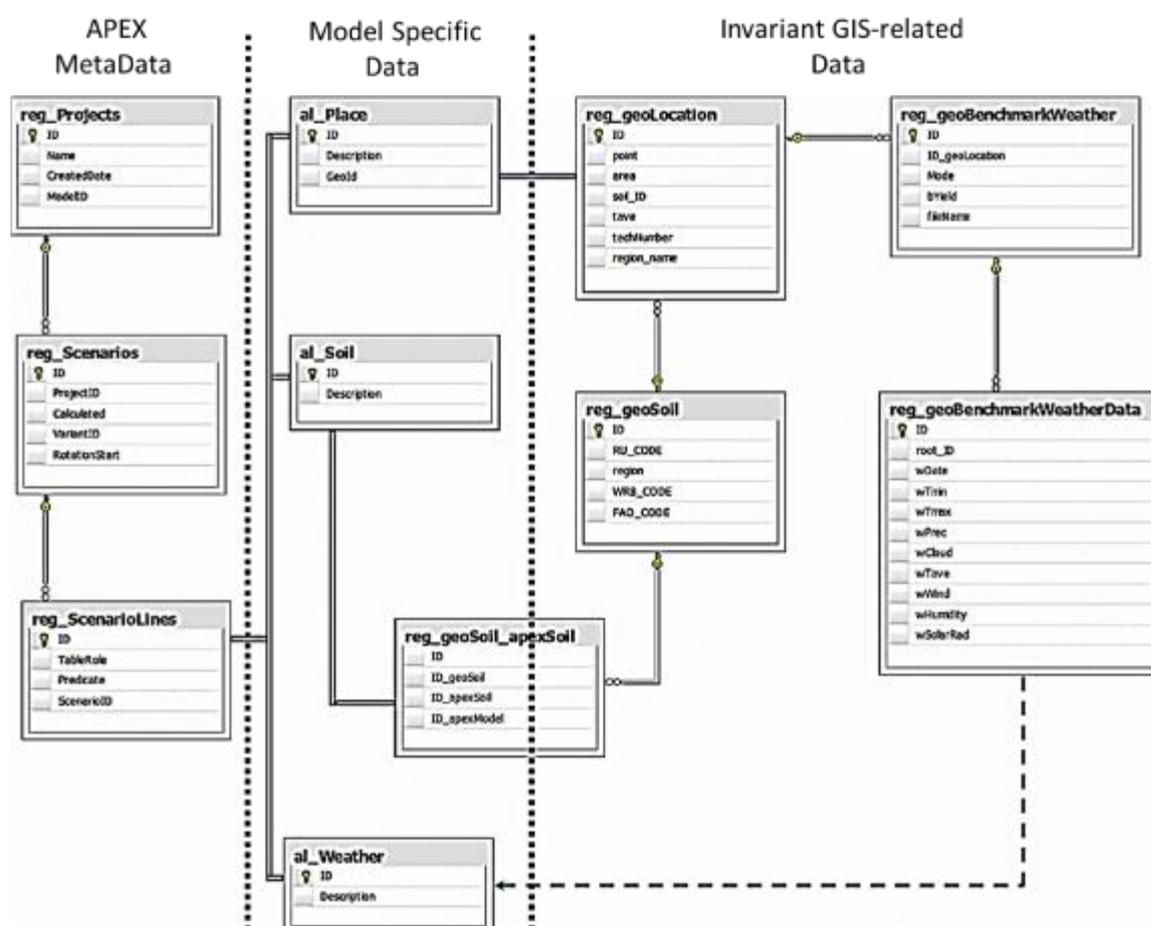


Fig. 1. Direct and indirect links between MetaData, Model-specific Data and Invariant GIS-related Data concepts in APEX relational DataBase.

APPLICATION AND RESULTS

The abovementioned methodic and software have been used for design and performing the long-term multivariate computer experiment. The objective was to estimate online the predicted yields of summer wheat in all-Russian coverage for 2017 growing season. The simulations were carried out in 153 benchmark locations (specific genetic parameters for model cultivars were also assigned with correspondence of soil-climate conditions of the region). We repeated the complete crop productivity recalculation for all variants every 3-4 days with taking into consideration the new portion of actual weather data and renewed short-term weather forecast. The "rest" of input weather data till the end of vegetation period was synthesized by substitution the values from benchmark weather scenarios forming the trajectory bundle for future crop dynamics. Selected results of computer experiment are presented in Fig. 2. One can see, the proposed methodic really allows assessing the yield perspectives in real time both in temporal and geographical aspects. The method allows analyzing the evolution of expectations about future yield during vegetation period (i.e. for different forecast dates) for all sites together (the thematic map of mean yield at

the right side of the figure) or, in more details, the dynamics of mean model yield and yield confidence interval for any single location (demo graph at the left side of the figure for the benchmark point in Orenburg region).

Certainly, the proposed methodic of dynamically adjusted forecast of agro-landscape productivity in frames of long-term numerical experiment requires time and computational resources. At the same time, application of dynamic crop model instead of simplified regression approaches must increase significantly the forecast accuracy and confidence.

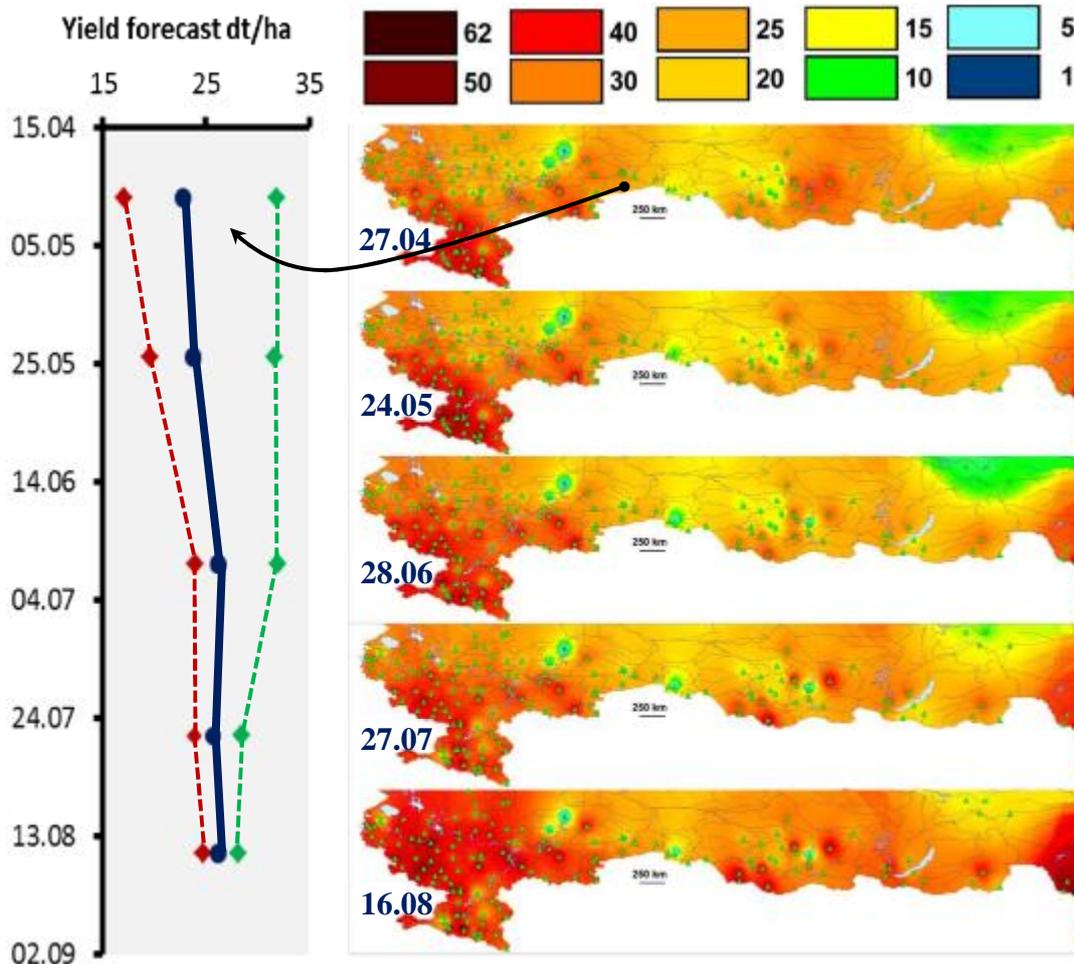


Fig. 2. Dynamically adjusted forecast of wheat productivity in 2017 growing season for one location (left side, minimum maximum and median values) and in a land scale (right side, average values). Green triangles – benchmark locations.

CONCLUSIONS

1. The generic method and software for using the arbitrary crop model for dynamically adjusted forecasting of agro-landscape productivity in a broad geographical scale have been proposed.
2. The principal approach is an integration of dynamic crop models, external information resources, and GIS based on earlier developed universal framework of computer automation of multivariate computer experiment (APEX).
3. Method applicability is proven on the example of computer experiment for estimation of summer wheat productivity in all-Russian scale for 2017 growing season.
4. We expect that the same approach will be convenient for the tasks in alternative management or spatial levels, i.e. for mesoscale calculations (model analysis and optimization of agricultural technologies in regional scale) or microscale calculations (analysis of the effectiveness of precision agriculture technologies on the scale in crop farming or specific agricultural fields).

REFERENCES

- [1]Badenko, V.L., Topaj, A.G., Yakushev, V.V., Mirschel, W., Nendel, C. 2017 Crop models as research and interpretative tools. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya*. 52 (3), 437-445
- [2]Holzworth, D.P., Snow, V., Janssen, S., Athanasiadis, I.N., Donatelli, M., Hoogenboom, G., White, J.W., Thorburn, P. 2015. Agricultural production systems modeling and software: Current status and future prospects. *Environ. Model. Softw.* 72, 276–286.
- [3]Boote, K.J., Jones, J.W., White, J.W., Asseng, S., Lizaso, J.I. 2013. Putting mechanisms into crop production models. *Plant Cell Environ.* 36, 1658–1672
- [4]Badenko, V., Terleev, V., Topaj, A. 2014. AGROTOOL software as an intellectual core of decision support systems in computer aided agriculture. *Appl. Mech. and Mater.*, 635-637, 1688-1691
- [5]Antle, J.M., Basso, B., Conant, R.T., Godfray, H.C.J., Jones, J.W., Herrero, M., Howitt, R.E., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Rosenzweig, C., Tittonell, P., Wheeler, T.R. 2017. Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: Design and improvement. *Agricultural Systems*. 155, 255-268
- [6]Faivre, R., Leenhardt, D., Voltz, M., Benoît, M., Papy, F., Dedieu, G., Wallach, D. 2004 Spatialising crop models. *Agronomie*. 24, 205-217
- [7]Batchelor, W.D., Basso, B., Paz, J.O. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *Eur. J. Agron.* 18, 141–158
- [8]Jeuffroy, M.-H., Casadebaig, P., Debaeke, P., Loyce, C., Meynard, J.-M. 2014. Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 121-137
- [9]Priya, S., Shibasaki, R. 2001. National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. *Ecological Modelling*, 136, 113-129
- [10]Medvedev, S., Topaj, A., Badenko, V., Terleev, V. 2015. Medium-term analysis of agroecosystem sustainability under different land use practices by means of dynamic crop simulation. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 448, 252-261
- [11]Hartkamp, A.D., White, J.W., Hoogenboom, G. 1999. Interfacing Geographic Information Systems with agronomic modeling: a review. *Agronomy Journal*, 91, 761–772
- [12]Resop, J.P., Fleisher, D.H., Wang, Q., Timlin, D.J., Reddy, V.R. 2012. Combining explanatory crop models with geospatial data for regional analyses of crop yield using field-scale modeling units. *Comp. and Electronics in Agriculture*, 89, 51-61
- [13]Fountas, S., Carli, G., Sørensen, C.G., Tsiropoulos, Z., Cavalaris, C., Vatsanidou, A., Liakos, B., Canavari, M., Wiebensohn, J., Tisserye, B. 2015. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 40-50
- [14]Mulla, D.J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture. 2013. Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems engineering*, 114, 358-371
- [15]Medvedev, S., Topaj, A. 2011. Crop simulation model registrator and polyvariant analysis. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 359, 295-301
- [16]Stolbovoi, V.S., Molchanov, E.N. 2015. Unified State Register of Soil Resources of Russia as a Model of the Spatial Organization of Soil Cover. *Regional Research of Russia (In Russian: Izvestija Rossijskoj Akademii Nauk. Seria geographicheskaya)*, 2015(5), 135-143

Chapter III/54: LandCaRe-DSS: A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR PROJECTION OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON AGRO-ECOSYSTEMS AND CROP PRODUCTION
Глава III/54: LandCaRe-DSS: система поддержки принятия решений для учета влияния изменения климата на агроэкосистемы и производство сельскохозяйственных культур

Wilfried Mirschel*¹, Karl-Otto Wenkel¹, Michael Berg¹, Ralf Wieland¹, Claas Nendel¹, Vitaly V. Terleev⁴, Alexandre G. Topaj³, Vladimir L. Badenko⁴, Barbara Köstner²

DOI 10.25680/1892.2018.38.83.247

*Email: wmirschel@zalf.de

1. Leibnitz-Centre for Agricultural Landscape research (ZALF) e. V. Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg, Germany
2. Technical University Dresden, Department of Meteorology, Pienner Str. 23, 01737 Tharandt, Germany
3. Agrophysical Research Institute, Grazhdansky prospect 14, 195220 St. Petersburg, Russia
4. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politekhnicheskaja ul. 29, 195251 St. Petersburg, Russia

ABSTRACT. Decision support for developing practicable, resilient climate change adaptation strategies for the sustainable use of agro-landscapes encompasses a wide range of options and issues. The model-based interactive spatial information and decision support system LandCaRe-DSS available to farmers, regional planners and other stakeholders supports decision-making processes in this direction. This system does not only support interactive scenario simulations and multi-ensemble and multi-model simulations at the regional level by providing information about the complex long-term impacts of climate change. It also helps to find suitable, sustainable agricultural adaptation strategies to climate change (crop rotation, soil tillage, fertilization, irrigation, price and cost changes...) at the farm level. LandCaRe-DSS uses different ecological impact models, including for crop yield, erosion risk, regional evapotranspiration, total water flow-out and irrigation water demand. At the local level, a farm economy model is directly coupled with both the biophysical-based agro-ecosystem model MONICA and the statistical-based crop yield model YIELDSTAT to simulate the economic consequences of regional climate change and of proposed agricultural adaptation strategies. The interactive LandCaRe-DSS prototype offers a wide range of data analysis and visualization tools and an information system for climate adaptation in agriculture. Selected examples demonstrate the versatility of LandCaRe-DSS applications.

Резюме. Поддержка принятия решений в целях разработки практически осуществимых, устойчивых стратегий адаптации к изменению климата для устойчивого использования агроландшафтов охватывает широкий круг вариантов и вопросов. Основанная на моделях интерактивная пространственная информационная система поддержки принятия решений LandCaRe-DSS, доступная фермерам, специалистам по региональному планированию и другим заинтересованным пользователям, поддерживает процессы принятия решений в данном направлении. Эта система не только поддерживает интерактивное моделирование сценариев и мультиансамблевое и мультимодельное моделирование на региональном уровне, но и предоставляет информацию о сложных долгосрочных последствиях изменения климата. Она также помогает найти соответствующие устойчивые стратегии адаптации сельского хозяйства к этим изменениям (севооборот, обработка почвы, внесение удобрений, орошение, изменение соотношения цен и затрат...) для фермерского хозяйства. Система LandCaRe-DSS использует различные экологические модели, в том числе - модели для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур, для оценки риска развития процесса эрозии почвы, а также для расчета региональной эвапотранспирации, потребностей в оросительной воде и общего расхода водных ресурсов. На локальном уровне модель фермерского хозяйства непосредственно связана с динамической моделью MONICA, которая описывает биофизические процессы в агроэкосистеме, а также со статистической моделью YIELDSTAT, разработанной для моделирования экономических последствий регионального изменения климата и предлагаемых стратегий адаптации сельского хозяйства. Интерактивный прототип LandCaRe-DSS предлагает широкий инструментальный анализ и визуализации данных, а также - информационную поддержку адаптации сельского хозяйства к изменениям климата. Приведен ряд примеров для демонстрации универсальности применения системы LandCaRe-DSS.

KEYWORDS: Decision support system, Productivity of arable land, Climate change, Regional impact assessment, Simulation models, Agricultural adaptation strategies

Ключевые слова: система поддержки решений, продуктивность пахотной земли, изменение климата, региональная оценка последствий, имитационные модели, адаптационные стратегии сельского хозяйства

INTRODUCTION

One of today's and tomorrow's fundamental task for mankind is to evaluate the productivity of agricultural landscapes and develop sustainable regional land management strategies for the production of feed, fodder and energy. It is also important that we preserve landscape and biodiversity, conserving soil and water resources. Agricultural land use is a key aspect of this task. However, it is not easy to identify sustainable concepts for agriculture. A sustainable land management for food production is a fundamental human activity, supporting the existence of mankind. Across the globe, agricultural production is primarily dependent on the weather, the general patterns of which are determined by annual fluctuations. Agricultural production is also dependent on future climate change.

To date, most discussions about climate change have focused on mitigation measures. Only little attention has been given to the adaptation to climate change, which will be critical for many countries on all continents, including several regions of Europe, such as the eastern part of Russia up to the Urals. The effects of climate change on agriculture may be positive or negative, depending on the variability of weather conditions, site quality, land use and management. Adaptation must take account of sustainability with regard to high plant production without losing ecosystem services.

Because of recent developments in modelling existing models are capable of identifying the potential of agricultural landscapes and the environmental constraints surrounding crop production at the regional and national level depending on expected climate change. In addition, these models can be integrated in interactive usable decision support systems (DSS), helping farmers and other stakeholders to determine the best regional management practices for adjusting agriculture to climate change. At the same time, these DSS must meet users' demand for transparency, interactivity and user-friendliness without any loss of information [1]. Until now, only a few suitable spatial DSSs and analogous tools have been available such as ADSS [2] or GPFARM [3], which were developed for specific regions only and are not available to the general public. To close this gap, LandCaRe-DSS was developed by the Institute of Landscape Systems Analysis of the Leibniz-Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF) Müncheberg, Germany, as a real-time response system using mainly regional models of intermediate complexity [4] but also dynamic process-based agro-ecosystem models at field plot or farm level such as MONICA [5].

This paper presents the conceptual framework, the basic structure and functionality of LandCaRe-DSS, exemplarily two results of LandCaRe-DSS scenario studies, and ways in which the system can be adapted for other regions or countries.

AIM OF THE METHOD

The decision support system LandCaRe-DSS was developed to close the methodical gap in the field of getting a model-based decision support for finding cost-effective adaptation strategies of agriculture to climate change at regional as well as at field level as basis for a better economic survival of farmers and regional stakeholders under changing conditions. For the usage of LandCaRe-DSS by farmers, regional planners and other administration stakeholders a simple user interface and a convenient handling is required.

PRINCIPLE AND PROCEDURE

The LandCaRe-DSS system consists of an information and advisory system related to climate and climate change, a number of databases, various statistical as well as expert- and process-based simulation models for different spatial scales (regional and farm scale) and a zooming user interface that connects all system levels and modules. The conceptual framework of LandCaRe-DSS is presented in Figure 1.

The central databases of LandCaRe-DSS contain historical climate data, different regionalized future climate projections for different regions, parameters for different agricultural crops, detailed management and economic data for 188 different cropping procedures as well as geo-referenced data concerning land use, topography, hydrology and soil characteristics. The system's modular structure also enables regionalized climate data from different emission scenarios of other global climate models as well as other management and economic parameters to be linked with little effort. For different climate values such as temperature, precipitation, climatic water balance, heating and cooling days, start and end of vegetation, the

thermal and the chill sum can be undertake a trend analysis, an inner-yearly analysis (daily and monthly), and a frequency analysis.

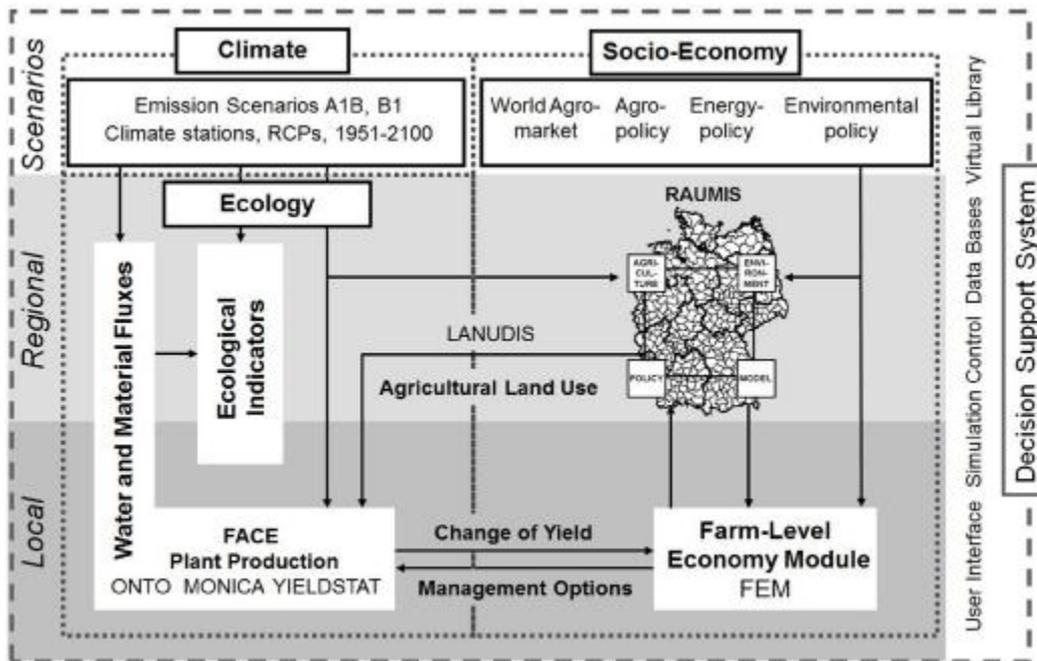


Figure 1 – Conceptual framework and levels of integration of different modules in LandCaRe-DSS (modified from [1])

Currently LandCaRe-DSS includes a range of simulation and impact models and algorithms for calculating climate and landscape indicators: the model BAGLUVA for calculating the long-term averages of regional actual evapotranspiration and total flow-out; the model EROSION for potential soil erosion risk estimation, statistical grassland model GL-PROD for grassland yield and forage quality calculation; the statistical model ONTO for ontogenesis of major agricultural crops; the model PHAENO for the typical phenological phases of different wild plants; the model VEGPER for the vegetation period calculation; the statistical-based model YIELDSTAT for estimation of crop yield, biomass and carbon fixation for more than 15 agricultural crops; the model BERBEDUE for identifying irrigation poverty; the empirical model ZUWABE for calculating site- and crop-specific irrigation water demand; the model LANUDIS for stochastic distribution of agricultural crops on arable land based on given cropping ratios; the process-based dynamic agro-ecosystem model MONICA for calculation of different ecosystem values including crop yield; the farm economy model FEM for calculating farm-level cost accountancy items. Using the FEM model in combination with other models it is possible to simulate the economic consequences of regional climate change and proposed adaptation strategies.

LandCaRe-DSS supports long-term and ensemble simulations on a spatial resolution of 100m × 100m, using coupled climate and agro-economic scenarios. The temporal resolution of models is no lower than 1 day, while the results of climate scenarios are typically evaluated for time periods of 30 years, providing robust information on the variability of the selected variables.

Unlike other decision support systems, LandCaRe-DSS offers interactivity, dynamics, variable spatial dimensions, scenario simulations, web-usability, extendibility and adaptability [1]. The whole system is easy to adapt to other regions or countries taking into account country-specific geo-data, other static and/or dynamic impact models incorporated, special parameterized and validated, other climate and/or emission scenarios and country-specific interface communication languages. A detailed description of LandCaRe-DSS, including the models and databases it contains and initial applications, is given in [1], [9] and [10].

TEST RESULTS

Exemplarily only one example of using the LandCaRe-DSS is presented here: the influence of enriched energy cropping, of non-tillage and of irrigation on crop yields under climate change.

For the time period 2005-2075 for the Uckermark region (dry lowlands of the Federal State of Brandenburg, 2600 km²) and the Weisseritz region (humid mountainous area of the Free State of Saxony, 400 km²) an investigation was carried out into how the regional productivity of crops would change taking into account the climate scenario WETTREG A1B if farmers were urged to grow energy plants, causing the cropping ratio to change in favour of silage maize in these regions. For the same period additional an analysis was made of how the irrigation of economically important crops or a change from conventional to non-tillage methods for winter rape and winter cereals would impact the regional productivity. The simulation results are shown in Figure 2.

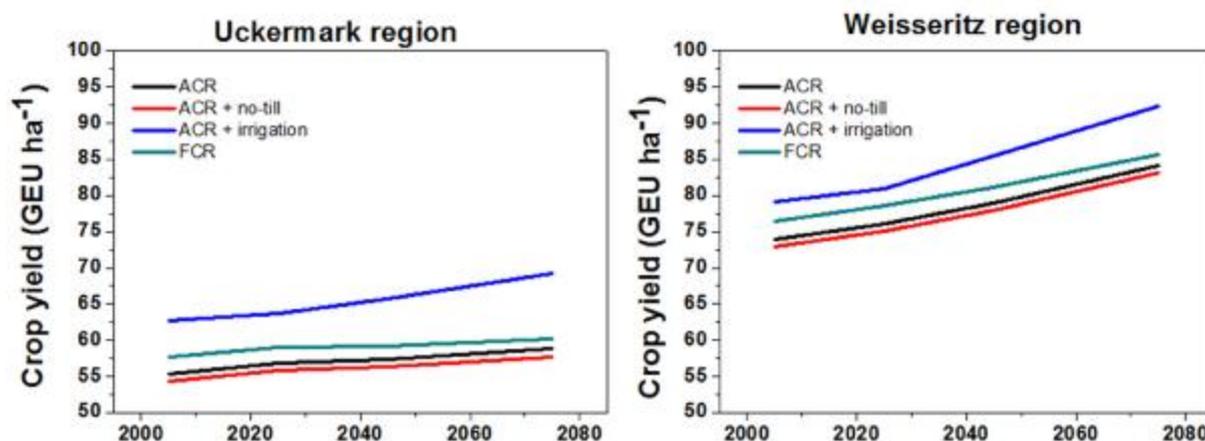


Figure 2 – Crop yield in grain equivalent units (GEU) for the Uckermark and Weisseritz regions for the actual cropping ratio (ACR) and under possible adaptation measures concerning irrigation and non-tillage, as well as a possible future cropping ratio (FCR) enriched with silo maize as energy crop generated by the climate scenario WETTREG A1B (taken from [9])

APPLICATION

The LandCaRe-DSS prototype was parameterized and validated for the two Eastern German regions above-mentioned. LandCaRe-DSS is constantly being developed, updated and adapted in a number of research projects such as REGKLAM (<http://www.regklam.de>) for the Dresden region (Free State of Saxony, ca. 4500 km²) and CARBIOCIAL (<http://www.uni-goettingen.de/de/211024.html>) for the whole Mato Grosso and Pará states of Brazil. LandCaRe-DSS also has been used in practical climate scenario studies for assessing the impact of climate change on agricultural productivity and irrigation water demand up to 2050 for three federal states of Germany: Saxony [6], Brandenburg [7] and Thuringia [8]. LandCaRe-DSS was converted into an operative web-based version as a basis for wider distribution (<http://www.landcare-dss.de>).

Thanks to the modular structure of LandCaRe-DSS, little effort is required to adapt the system to geo-data bases valid for other regions or countries; incorporate other static or dynamic impact models; switch to other climate and emission scenario data; and implement other interface communication languages.

CONCLUSIONS

The LandCaRe-DSS system

1. offers historical and predicted climate data for region or climate station and visualizes trends,
2. allows for considering different regionalized climate scenarios (new ones can be integrated),
3. provides background information on climate change and on potential management strategies for agriculture to arrange with climate change,
4. enables an ecological impact assessment of possible climate and land-use changes at regional level,
5. offers integrated bio-economic analysis of potential agricultural adaptation strategies to climate change at farm level, taking different scenarios of price and cost dynamics into account,
6. is characterized by unrestricted choice of the spatial level and by interactive scenario simulation runs based on the advances in modern information technology,
7. supports policy-makers and administrative bodies in strategic planning for integrated water and land management, as well as farmers and agricultural advisory agencies identifying optimal agricultural adaptation strategies to climate change and
8. has potential for application and adaption to regions in Russia and Central Asia.

REFERENCES

- [1] Wenkel, K.-O., Berg, M., Mirschel, W., Wieland, R., Nendel, C., Köstner, B. 2013. LandCaRe DSS – An interactive decision support system for climate change impact assessment and the analysis of potential agricultural land use adaptation strategies. *Journal of Environmental Management* 127: 168-S183
- [2] Prasad, J.R., Prasad, R.S., Kulkarni, U.V. 2008. A decision support system for agriculture using natural language processing (ADSS). In: *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS 2008, 19–21 March 2008, Hong Kong)*, Vol. I, pp. 1-5
- [3] Ascough, J.C., Shaffer, M.J., Hoag, D.L., Mc Master, G.S., Dunn, G.H., Ahuja, L.R., Weltz, M.A. 2001. GPFARM: an integrated decision support system for sustainable great plain agriculture. In: Scott, D.E., Mohtar, R.H., Steinhardt, G.C. (Eds.), *Sustaining the Global Farm. Selected Papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting, Held from 24 to 29 May 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory*, pp. 951-960
- [4] Wenkel, K.-O., Wieland, R., Mirschel, W., Schultz, A., Kampichler, C., Kirilenko, A., Voinov, A. 2008. Regional Models of Intermediate Complexity (REMICS): a new direction in integrated landscape modelling. - In: *Environmental modelling, software and decision support: state of the art and new perspective*: 285-295; Amsterdam (Elsevier)
- [5] Nendel, C., Berg, M., Kersebaum, K.C., Mirschel, W., Specka, X., Wegehenkel, M., Wenkel, K.O., Wieland, R. 2011. The MONICA model: testing predictability for crop growth, soil moisture and nitrogen dynamics. *Ecol. Model.* 222 (9), 1614-1625
- [6] Mirschel, W., Wenkel, K.-O., Wieland, R., Albert, E., Köstner, B. 2010. Impact assessment of climate change on agricultural crop yields using the hybrid model YIELDSTAT – a case study for the Free State of Saxony, Germany. In: *Materialy vsrossiskoi konferencii “Matematicheskie modeli i informacionnye tekhnologii v sel’skokhozaistvennoi biologii: itogi i perspektivy”* (14.-15.10.2010, ARI St. Petersburg, Russia), St. Petersburg, pp. 200-203
- [7] Mirschel, W., Wieland, R., Gutzler, C. 2013. Ertragsleitung. In: Gutzler C, Helming K (Eds.), *Folgenabschätzung von Szenarien der landwirtschaftlichen Produktion in Brandenburg 2025: Feldberechnung und Energiemaisanbau*. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg, pp. 32-38
- [8] Mirschel, W., Wieland, R., Wenkel, K.-O., Guddat, C., Michel, H. 2013. Modellgestützte Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf Ertrag und Zusatzwasserbedarf im Freistaat Thüringen bis 2050. In: Nguyen Xuan Thin (ed.): *Modellierung und Simulation von Ökosystemen: Workshop Kölpinsee 2012*. Shaker Verlag Aachen, p. 1-19
- [9] Mirschel, W., Wenkel, K.-O., Berg, M., Wieland, R., Nendel, C., Köstner, B., Topaj A.G., Terleev, V.V., Badenko, V.L. 2016. A Spatial Model-Based Decision Support System for Evaluation of Agricultural Landscapes under the Aspect of Climate Change. In: Mueller, L.; Sheudshen, A.K.; Eulenstein, F. (eds.): *Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia*. Springer International Publishing, Cham/Switzerland, p. 519-540
- [10] Köstner, B., Wenkel, K.-O., Bernhofer, Ch. 2012. New model-based information systems for climate impact scenarios in agriculture. *Promet* 38(1/2): 42-52

**Глава III/55: ПРОДУКТИВНОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В СТЕПНОЙ ЗОНЕ РОССИИ И
КАЗАХСТАНА ПРИ СОВРЕМЕННОМ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА**
**Chapter III/55: Wheat Productivity in the Steppe Zone of Russia and Kazakhstan under Climate
Change**

Вера Н. Павлова*^{1,2}; Pierluigi Calanca³; Анна А. Караченкова¹

DOI 10.25680/2602.2018.10.63.248

*Эл. Почта: vnp2003@bk.ru

1. Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, ул. Ленина 82, 249030 Обнинск, Россия

2. Главная геофизическая обсерватория им. В.И. Воейкова

3. Agroscope, Zurich, Switzerland

РЕЗЮМЕ. Исследуются тенденции агроклиматических ресурсов и продуктивности яровой пшеницы в степной зоне России и Казахстана. В этом регионе на территории России производится 75% яровой пшеницы. Расчеты выполняются в имитационной системе Климат-Почва-Урожай, которая прошла проверку на адекватность в разных природно-климатических зонах. На всей рассматриваемой территории наблюдается рост тепловых ресурсов, на фоне которого сокращается длина вегетационного периода яровой пшеницы (2-4 сут./10 лет). Наблюдается рост засушливости в степной зоне ЕТ России и на западе Казахстана. Показано, что наблюдаемые тенденции тепло- и влагообеспеченности в 1996-2016 гг. приводят к снижению климатически обусловленной урожайности по отдельным субъектам (областям) на 10-35%. В тоже время, на АТ России и северо-востоке Казахстана наблюдаемые изменения климата в целом благоприятны для производства яровой пшеницы.

Abstract. The authors studied the trends of agroclimatic resources and summer wheat productivity in the steppe area of Russia and Kazakhstan. The region in Russia yields 75% of summer wheat. Calculations are carried out in the imitation system Climate-Soil-Yield that has been tested for relevance in different natural climate zones. The entirety of the studied territory witnesses a rise in heat resources paired with a shortening of summer wheat vegetation period (2-4 days per 10 years). Aridity rises in the steppe regions in European part of Russia and in western Kazakhstan. It is shown that observed trends in heat and water supply in 1996-2016 lead to a decrease in climate-based productivity in some regions by 10-35%. At the same time in the Asian part of Russia and north-eastern Kazakhstan the observed climate change would generally benefit cultivation of summer wheat.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: изменение климата, имитационная модель, яровая пшеница, степная зона России и Казахстана, изменчивость урожайности, меры адаптации.

Keywords: climate change, crop simulation model, spring wheat, steppe zone of Russia and Kazakhstan, yield variability, adaptation measure.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, связанные с погодно-климатическими факторами и изменением климата, однозначно указывают о возрастании значимости гидрометеорологических факторов в устойчивом развитии общества. Как ожидается, Россия и Казахстан станут крупными игроками на мировом рынке зерна в ближайшие десятилетия, обеспечивая существенный вклад в удовлетворение ожидаемого спроса на зерно [1]. Климатические условия для ведения сельского хозяйства в степной зоне Поволжья и Северного Казахстана по большей части очень жесткие с чрезвычайно холодной зимой, частыми засухами и зачастую неблагоприятными условиями в период уборки урожая. Весенне-летние засухи представляют главный стрессовый фактор и, вероятно, явились основной причиной рекордно низких урожаев в 2010 и 2012 гг. [2]. Цель работы состоит в получении обобщенных оценок влияния изменчивости климата, современного и будущего, на агроклиматические ресурсы и продуктивность яровой пшеницы в степной зоне России и Казахстана. Имитационная система Климат-Почва-Урожай (КПУ) использована для оценки эффективности различных технологических и агрономических приемов, повышающих продуктивность сельскохозяйственных культур, а также для изучения возможностей адаптации [3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчеты с помощью имитационной системы КПУ выполнялись по данным метеорологической сети станций (МС) на территории степной зоны России и северного Казахстана (61 МС). Апробированная методика оценки влияния изменений климата на продуктивность и устойчивость сельского хозяйства [4] предусматривает расчет характеристик теплообеспеченности сельскохозяйственных культур (сумм активных температур и др.), показателей влагообеспеченности (запасов влаги в почве, суммарного испарения, испаряемости, гидротермического коэффициента и др.). Расчеты климатически обусловленной урожайности выполняются для четырех уровней интенсификации земледелия: при современной практике внесения удобрений и естественном увлажнении почвы, при оптимальном увлажнении (орошении), при оптимальном минеральном питании и при сочетании двух последних режимов (западно-европейский агротехнический уровень). Для визуализации результатов расчетов агроклиматических показателей и метеорологических параметров в виде картосхем использованы алгоритмы и возможности геоинформационных систем Surfer и QGIS. Влияние опасных природных явлений, таких как волны жары, засух и засушливых явлений, на продуктивность зерновых культур могут быть оценены на основе предложенного подхода.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Агроклиматические условия: оценка теплообеспеченности

Расчеты показывают, что оценки трендов температуры самого теплого месяца июля за период 1997-2016 гг. колеблются в интервале от 0.1 до 0.8 °С/10 лет на ЕТ России и от -0.1 до -0.8 °С/10 лет на АТ России и в Казахстане (табл. 1). Средние значения сумм температур выше 10 °С достаточно высокие и составляют от 2000 до 3500 °С (рис. 1а). Термические ресурсы территории, оцененные суммами температур воздуха выше 5 и 10 °С, имеют устойчивую положительную тенденцию на западе и отрицательную на востоке региона: Алтайский край, Новосибирская, Омская, Северо-Казахстанская, Акмолинская и Павлодарская области (рис. 1б). На большей части территории дата перехода через 10 °С весной сдвигается на более ранние сроки – от 2 до 8 суток (табл. 1).

Таблица 1. Оценки линейных трендов (ед./10 лет) показателей термического режима и режима увлажненности на территории степной зоны России и Казахстана за период 1997-2016 гг. Имитационная система Климат-Почва-Урожай

Степная зона России и Казахстана (область, край, республика)	Средняя температура воздуха в июле, °С/10 лет	Сумма темп. >10 °С, °С/10 лет	Длина периода с темп. >10 °С, сут./10 лет	Дата перехода через 10 °С весной, сут./10 лет	Сумма осадков, мм/10 лет		ГТК за период с темп. >10 °С, ед./10 лет	Сумма осадков за период всходы-уборка, мм/10 лет
					весна	лето		
Россия								
Белгородская	0.3	197	3.3	-2.3	-5	22	0.04	8
Воронежская	0.5	221	2.6	-1.6	24	-10	-0.02	-3
Краснодарский	0.2	158	1.9	-0.8	12	-39	0.00	1
Калмыкия	0.5	122	-2.1	-0.6	13	-7	0.04	7
Ростовская	0.8	206	-1.1	-0.6	24	-55	0.05	9
Ставропольский	0.1	29	-5.9	1.1	9	-7	-0.07	-11
Оренбургская	0.2	187	0.0	-4.0	-7	-18	-0.29	-46
Башкортостан	0.0	211	5.3	-7.4	-7	-13	-0.18	-31
Самарская	0.0	189	1.2	-3.2	-18	-8	-0.27	-43
Саратовская	0.2	205	1.7	-2.9	-4	-18	-0.11	-19
Курганская	-0.6	85	1.9	-4.4	-4	-19	-0.14	-21

Таблица 1. Продолжение.

Челябинская	-0.4	160	8.7	-7.1	4	-5	-0.10	-12
Алтайский	0.0	-122	-6.3	3.8	-5	16	0.13	20
Новосибирская	-0.1	-23	-0.9	2.3	-1	30	0.17	27
Омская	-0.3	-19	-2.9	3.1	19	22	0.14	23
Казахстан								
Зап.- Казахстанская	0.5	184	-1.4	-1.6	-4	-17	-0.10	-15
Актюбинская	0.6	185	-0.2	-3.6	-3	-24	-0.19	-29
Костанайская	-0.6	8	-3.4	-1.4	1	3	-0.05	-8
Сев.- Казахстанская	-0.8	-45	-3.5	-0.6	17	24	0.16	29
Акмолинская	-0.6	-27	-2.5	-1.6	12	18	0.11	20
Павлодарская	-0.3	-32	-2.3	-1.2	-18	32	0.03	5

Агроклиматические условия: оценка влагообеспеченности

Наблюдаемые тенденции (1997-2016 гг.) в изменении сезонных сумм атмосферных осадков (тренды) представлены в табл. 1. Преобладает положительная тенденция к росту весенних осадков на ЕТ России, а также в Омской, Северо-Казахстанской и Акмолинской областях. Тренды летних осадков отрицательны в степной зоне России, за исключением Новосибирской и Омской областей и Алтайского края. К положительным факторам климатических изменений можно отнести наблюдаемую динамику в рядах летних осадков (18-32 мм/10 лет) в Северо-Казахстанской, Павлодарской и Акмолинской областях. Положительные оценки скорости роста осенних осадков сохраняются в Акмолинской и Павлодарской областях. Рассчитанные агрометеорологические показатели в целом согласуются с данными работ [5-7]. Следует особо отметить результаты, полученные в работе [8]. Авторами получены оценки, позволяющие сделать вывод, что потенциал растениеводства в Сибири значительный при изменениях климата. Будущие климатические ресурсы Сибири позволят перейти к выращиванию сельскохозяйственных культур, которые ранее здесь не возделывались.

Тенденцию к иссушению в отдельных регионах степной зоны России и Казахстана в весенне-летний период подтверждают величины ГТК Г.Т. Селянинова (рис. 2). Оценки трендов ГТК отрицательны для центральных областей степной зоны и составляют от -0.05 (Костанайская область) до -0.29 ед./10 лет (Оренбургская область) (табл. 1). На юго-западе и северо-востоке рассматриваемой территории оценки трендов ГТК в вегетационный период яровой пшеницы положительны.

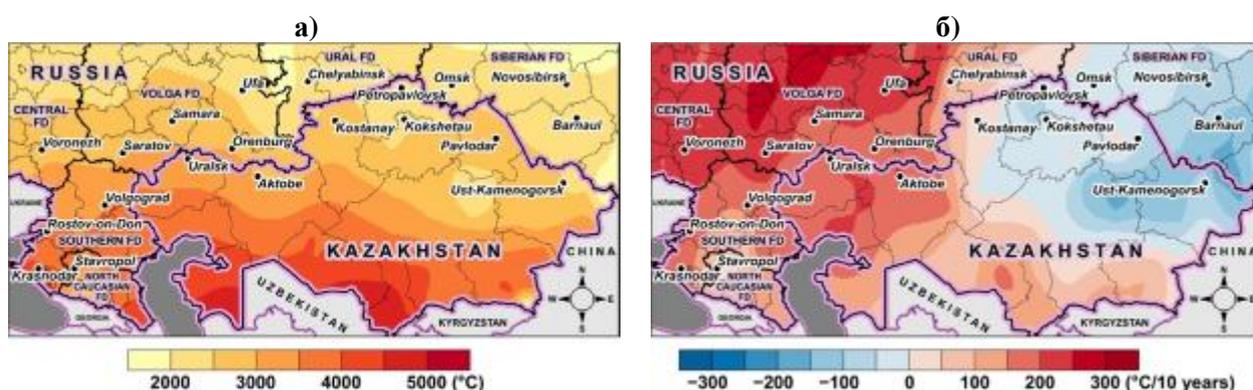


Рис. 1. Суммы активных температур выше 10 °С: а) средние значения (°С) и б) средняя скорость изменения (тренд, °С/10 лет) на территории степной зоны России и Казахстана за период 1997-2016 гг. Имитационная система КПУ

Изменения продуктивности яровой пшеницы

Фактическая урожайность

Средняя фактическая урожайность яровой пшеницы за период 1997-2016 гг. на территории степной зоны России, рассчитанная с учетом посевных площадей по данным Росстата, составляет

11.4 ц/га. Урожайность на АТ России выше, чем на ЕТ и составляет 11.8 (против 10.6 ц/га на ЕТ). Её изменчивость по годам значительна: от 6.8 ц/га в 2012 г. до 14.1 ц/га в 2001 и 2007 гг. Региональные различия существуют между степной зоной ЕТ и АТ России. Соответствующие оценки линейных трендов, рассчитанные за период 1997-2016 гг. имеют противоположные знаки и составляют -0.02 и 0.10 ц/га/10 лет соответственно. Посевные площади яровой пшеницы после 2007 г. на ЕТ и АТ России стабилизировались.



Рис. 2. Средняя скорость изменения (тренд) ГИК (ед./10 лет) за период от всходов до уборки яровой пшеницы на территории степной зоны России и Казахстана за период 1997-2016 гг. Имитационная система КПУ

Климатически обусловленная урожайность: расчеты в имитационной системе КПУ

Расчеты климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы выполнены в имитационной системе КПУ на основе данных наблюдений метеорологических и агрометеорологических характеристик при существующем агротехническом уровне. Специальная калибровка модели для целей данной работы не проводилась. Рассчитаны нормированные отклонения урожайности яровой пшеницы последних пяти (2012-2016 гг.) и десяти лет (2007-2016 гг.) относительно периода 1997-2016 гг. Показано, что урожайность яровой пшеницы, обусловленная изменениями климата, в степной зоне России и Казахстана снизилась на 10% за последние десять лет. Максимальное падение урожайности отмечается в Оренбургской, Самарской и Саратовской областях, 31, 24 и 21% соответственно, а также в Актюбинской и Западно-Казахстанской областях, 34 и 32% соответственно. На рис. 3 представлена средняя скорость изменения (тренд) климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы (ц/га/10 лет) за период 1997-2016 гг. Расчеты выполнены в имитационной системе КПУ.

С помощью имитационной системы КПУ рассчитана оценка потерь урожайности яровой пшеницы на территории степной зоны России и Казахстана в 2012 г. и 2010 г относительно 2008 г. Снижение урожайности из-за засухи достигает величины 50-60% (рис. 4).



Рис. 3. Средняя скорость изменения (тренд) климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы (ц/га/10 лет) за период 1997-2016 гг. Имитационная система КПУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Территория недостаточно увлажненной степной зоны России и Казахстана охвачена значимым повышением летних температур. Температурные тренды самого теплого месяца года июля за период 1997-2016 гг. положительны для ЕТ России и отрицательны для АТ России и большей части территории Северного Казахстана.
2. Изменения режима осадков разнонаправлены по знаку и значительно варьируют по величине. О тенденциях к иссушению в отдельных регионах степной зоны России и Казахстана в весенне-летний период свидетельствуют величины ГТК Селянинова. Оценки трендов ГТК отрицательны для центральных областей степной зоны России и Казахстана. На юго-западе и северо-востоке рассматриваемой территории оценки трендов ГТК в вегетационный период яровой пшеницы положительны.
3. Получены количественные оценки воздействий наблюдаемых изменений климата, в том числе экстремальных событий, например засух 2010 и 2012 гг. на продуктивность яровой пшеницы. Тренды климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы за период 1997-2016 гг. отрицательны на большей части территории степной зоны России и Казахстана. Показано, что растениеводство на исследуемой территории в значительной мере уязвимо к сезонным засухам и волнам тепла – снижение продуктивности яровых зерновых культур варьирует в диапазоне 40-60%.

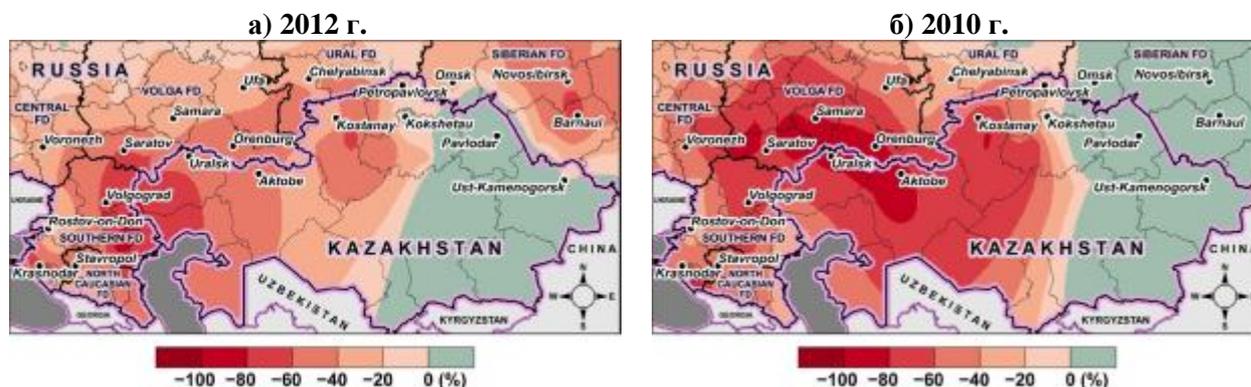


Рис. 4. Оценка потерь урожайности яровой пшеницы на территории степной зоны России и Казахстана в % от урожайности 2008 г.: а) в 2012 г. и б) в 2010 г. Имитационная система КПУ

Acknowledgements This study is a contribution to the ERA.net RUS Plus Project EXTRA (Impact of EXTreme events and climate change on Russian Agriculture, economic implications and adaptation). It received financial support from the Russian Science Foundation (Grant № 16-17-00063).

ЛИТЕРАТУРА

- [1]FAO, 2016. FAOSTAT Data. Food and Agric. Org. United Nations, Rome. <http://www.fao.org/faostat>, accessed 15 July 2017.
- [2]USDA-FAS, 2016. Grain: World Markets and Trade. United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. <http://www.fas.usda.gov>, accessed 15 July 2017.
- [3]Sirotenko, O.D., 1991. Simulation System Climate-Yield in the U.S.S.R. Russian Meteorol. Hydrol. 4, pp. 67-74.
- [4]Sirotenko, O.D., Pavlova, V.N., 2012. Methods of assessment of climate change impact on productivity in agriculture, in: Semenov, S.M. (Ed.), Methods for Assessing the Consequences of Climate Change for Physical and Ecological Systems. Roshydromet, Moscow, 165-189.
- [5]Pavlova, V.N., 2010. Assessment and analysis of climate change impacts on cereal crops productivity in agricultural zone of Russia, in: Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modeling, V. XXIII, M., IGCE, pp. 215-230.
- [6]Байшоланов, С.С., Мусатаева, Г.Б., Павлова, В.Н., Муканов, Е.Н., Чернов, Д.А., Жакиева, А.Р., 2015. Оценка агроклиматических ресурсов Северо-Казахстанской области. Вестник КазНУ, 2(41), с.150-159.

[7]Pavlova, V.N., Varcheva, S.E., Bokusheva, R., Calanca, P., 2014. Modelling the effects of climate variability on spring wheat productivity in the steppe zone of Russia and Kazakhstan. *Ecol. Modelling* 277, 57-67.

[8]Tchebakova N.M., Chuprova V.V., Parfenova E.I., Soja A.J., Lysanova G.I. 2016. Evaluating the Agroclimatic Potential of Central Siberia. In: Mueller L., Sheudshen A., Eulenstein F. (eds) *Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia*. Springer Water. Springer, Cham, pp 287-305, https://doi.org/10.1007/978-3-319-24409-9_11.

Глава III/56: ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА АГРОКЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ И УРОЖАЙНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В УКРАИНЕ

Chapter III/56: Estimation of Influence of Climate Changes on Agroclimatic Resources and Productivity of Grain Crops in Ukraine

Анатолий Н. Полевой

DOI 10.25680/6429.2018.36.57.249

Эл. Почта: apolevoy@te.net.ua

Одесский государственный экологический университет, ул. Львовская 15, 65016 г. Одесса, Украина

РЕЗЮМЕ. Установлено, что в течение 2021 – 2050 гг. изменения температурного режима на территории Украины будут иметь неравномерный характер. Наиболее интенсивное увеличение среднегодовой температуры воздуха возможно при развитии сценария выбросов RCP8.5, при котором наиболее резкие изменения температуры ожидаются на юге и востоке страны. По данным сценария RCP4.5 прогнозируется существенное уменьшение сезонных зимних температур воздуха. С другой стороны, резких изменений в распределении осадков по территории Украины не ожидается. Наибольшее количество осадков в среднем за год и по сезонам прогнозируется для западных областей, а наименьшее – для южных.

Получены оценки изменения агроклиматических характеристик температурного режима и режима осадков за базовый и сценарный периоды по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 в теплый период года. Тенденции изменения агроклиматических ресурсов рассматривались в разрезе основных агроклиматических зон Украины. Выполнена оценка условий выращивания ярового ячменя в условиях изменения климата и оценка климатических рисков выращивания этой культуры.

Abstract. It was found that during 2021–2050 the changes in the temperature regime on the territory of Ukraine will have an irregular mode. The most intensive increase in the average annual air temperature is possible at the RCP8.5 scenario of emissions, for which the most dramatic changes in the temperature are expected at the south and east of the country. According to the data of RCP4.5 scenario, the substantial decrease in the seasonal winter air temperatures is forecasted. On the other hand, dramatic changes in the distribution of precipitation over the territory of Ukraine are not expected. The highest amount of precipitation on the average for a year and by seasons is forecasted for the western regions of the country, and the lowest amount - for the southern ones.

The estimates of the change in agroclimatic characteristics of the temperature and precipitation regimes are obtained for a basic period and a scenario period by RCP4.5 and RCP8.5 scenarios in the warm season. The trends of the change in agroclimatic resources have been considered in the context of basic agroclimatic zones of Ukraine. An assessment of conditions for growing of spring barley under the climate change and an assessment of the climatic risks of growing this crop are performed.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: температура воздуха, сумма осадков, агроклиматические ресурсы, влагообеспеченность, яровой ячмень, площадь листьев, фотосинтез, климат

Keywords: temperature of air, rainfall, agroclimatic resources, влагообеспеченность, spring barley, area of leaves, photosynthesis, climate

ВВЕДЕНИЕ

По географическому положению, структуре народного хозяйства, состоянию окружающей среды Украина является одной из стран, для которых социально-экономические последствия изменения климата могут быть необратимыми. Поэтому важным звеном проблемы изменения глобального климата является оценка изменения агроклиматических условий выращивания сельскохозяйственных культур и влияния этих изменений на их продуктивность. Сельское хозяйство является наиболее уязвимой отраслью экономики Украины к колебаниям и изменениям климата. Учитывая инерционный характер сельского хозяйства и зависимость его эффективности от погодных условий, уже сейчас необходимо принятие своевременных и адекватных решений относительно сложных проблем, обусловленных изменениями климата. Это предусматривает заблаговременную оценку влияния ожидаемых изменений климата на агроклиматические условия выращивания сельскохозяйственных культур.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью оценки ожидаемых изменений климата в Украине использовались прогностические значения температуры воздуха и осадков согласно двух сценариев выбросов – RCP4.5 и RCP8.5 в течение периода 2021 – 2050 гг. [3].

Анализ изменений температурного режима по территории Украины выполнялся за периоды: 1986 – 2005 гг. (принятый как базовый период) и за период 2021 – 2050 гг. по климатическим сценариям изменения климата RCP4.5 и RCP8.5. Для характеристики условий увлажнения анализировались те же периоды, что и для теплообеспеченности.

При оценке условий выращивания сельскохозяйственных культур на фоне изменения климата рассматривались варианты: базовый период (1986 – 2005 гг.); климатические условия расчетного периода (2021 – 2050 гг.) по сценарию RCP4.5 (Климат); климатические условия расчетного периода по сценарию RCP4.5 с учетом изменения CO₂ (Климат + CO₂); климатические условия расчетного периода по сценарию RCP8.5 (Климат); климатические условия по сценарию RCP8.5 при увеличении CO₂ в атмосфере (Климат + CO₂).

Как теоретическая основа для выполнения расчетов и сравнения результатов были использованы модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур: модель формирования продуктивности агроэкосистем [1]; модель фотосинтеза зеленого листа растения при изменении концентрации CO₂ в атмосфере [2].

Расчеты выполнялись для природно-климатических зон Украины: Полесье, Западная Лесостепь, Северная Степь, Южная Степь.

РЕЗУЛЬТАТЫ

За начало весны, обычно, принимается дата устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С в сторону повышения температуры воздуха, а за начало зимы – дата устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С в сторону отрицательных температур.

В табл. 1 представлена сравнительная характеристика средних многолетних дат перехода температуры воздуха через 0 °С весной и осенью, длительности периода с температурой воздуха выше 0 °С, сумма температур выше 0 °С, средних температур января и июля, амплитуды температур с такими же показателями, рассчитанными по климатическим сценариям RCP4.5 и RCP8.5 по природно-климатическим зонам Украины.

Наибольшие отличия рассчитанных показателей термического режима по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 по сравнению с показателями базового периода отмечаются в Южной Степи. При этом, значение показателей по сценарию RCP8.5 будут выше, чем по сценарию RCP4.5.

Наибольшие отличия рассчитанных показателей термического режима по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 по сравнению с показателями базового периода отмечаются в Южной Степи. При этом, значение показателей по сценарию RCP8.5 будут выше, чем по сценарию RCP4.5.

В связи с изменением длительности периода с температурами воздуха выше 0 °С изменятся и суммы температур в случае реализации обоих сценариев. В целом за год на территории Украины как в базовый период, так и в расчетный период 2021 – 2050 гг. за разными сценариями изменения климата ожидается уменьшение количества осадков в направлении с северо-запада на юго-восток (табл. 2).

Как видно из табл. 2, по обоим сценариям изменения климата во всех природно-климатических зонах Украины в период с 2021 по 2050 гг. ожидается уменьшение годовых сумм осадков.

Таблица 1. Сравнительные характеристики температурного режима за период с температурой воздуха выше 0 °С в разных природно-климатических зонах Украины

Период	Дата перехода температуры воздуха через 0 °С		Продолжительность периода, дни	Сумма температур, °С	Средняя температура января, °С	Средняя температура июля, °С	Амплитуда температур, °С
	весна	осень					
Полесье							
1986 – 2005 гг.	26.03	26.11	244	3077	-3,0	19,4	22,4
Сценарий RCP4.5							
2021 – 2050 гг.	26.03	20.11	241	2900	-2,7	18,6	21,3
Разница	-	-6	-3	-177	-0,3	-0,8	-1,1
Сценарий RCP8.5							
2021 – 2050 гг.	18.03	20.11	246	2966	-4,1	18,8	22,9
Разница	-8	-6	2	81	-1,1	-0,6	0,5
Западная Лесостепь							
1986 – 2005 гг.	3.03	2.11	265	3227	-3,4	20,4	23,7
Сценарий RCP4.5							
2021 – 2050 гг.	13.03	20.11	248	2955	-3,2	19,1	22,3
Разница	10	18	15	-268	0,2	1,3	0,6
Сценарий RCP8.5							
2021 – 2050 гг.	11.03	21.11	253	3031	-4,2	19,1	23,3
Разница	8	5	11	196	-1,0	-	1
Северная Степь							
1986 – 2005 гг.	16.03	21.11	260	3409	-3,0	22,1	26,1
Сценарий RCP4.5							
2021 – 2050 гг.	19.03	21.11	257	3400	-2,8	22,2	26,0
Разница	-3	-	19	9	-1,2	0,1	0,1
Сценарий RCP8.5							
2021 – 2050 гг.	11.03	25.11	258	3492	-4,1	22,0	26,1
Разница	-5	-4	2	82	0,1	0,1	-
Южная Степь							
1986 – 2005 гг.	19.02	3.12	287	3819	-1,9	23,7	25,6
Сценарий RCP4.5							
2021 – 2050 гг.	11.01	20.12	318	3892	-0,3	23,6	23,9
Разница	36	17	31	73	1,6	0,1	1,7
Сценарий RCP8.5							
2021 – 2050 гг.	16.02	20.12	338	3988	-0,9	23,5	24,4
Разница	3	17	51	169	-1,02	0,2	1,2

Причем, уменьшение осадков ожидается одинаковое по обоим сценариям в Полесье и Западной Лесостепи до 91 % от базового периода. В Северной Степи по обоим сценариям уменьшение годовых сумм осадков будет более ощутимым и составлять только 87 – 85 % от базового периода.

В Южной Степи по сценарию RCP4.5 сумма осадков будет ожидаться на уровне 370 – 380 мм, что составляет 81 % от базового периода. В случае реализации сценария RCP8.5 ожидаемая сумма осадков за год будет около 420 мм, что составит 88 % от средней многолетней величины базового периода.

Рассчитанные величины ожидаемых сумм осадков на период до 2050 года показывают, что по обоим сценариям изменения климата в холодный период года ожидается увеличение сумм осадков. Это увеличение будет составлять 106 – 108 % от базовой суммы в Полесье и Западной Лесостепи и 112 – 113 % в зоне Северной Степи. Разница между ожидаемой суммой осадков по сценариям будет наблюдаться в Лесостепной и Степной зонах. По сценарию RCP8.5 увеличение суммы осадков будет составлять 117 – 127 % от базовой суммы.

В теплый период года по обоим сценариям изменения климата ожидается уменьшение сумм осадков по всей территории Украины. Следует отметить, что в Полесье и Лесостепной зоне уменьшение сумм осадков будет менее значительным и ожидаемые суммы будут составлять соответственно 80 и 90 % от сумм осадков базового периода. В Степной зоне это уменьшение будет большим: в Южной Степи суммы осадков составят 69 – 70 %, а в Северной Степи – 72 % от базовой суммы осадков.

При оценке условий выращивания сельскохозяйственных культур (на примере ярового ячменя) можно отметить, что за счет более высокого уровня осадков в холодный предвегетационный период рост растений будет проходить при более благоприятных условиях. По сценарию RCP4.5 сумма осадков за период от всходов до колошения растений ярового ячменя будет значительно больше базовой суммы осадков на: 12 % в Полесье, 18 % в Западной Лесостепи, 55 % в Северной Степи и 31 % в Южной Степи.

Таблица 2. Сравнительная характеристика годовых сумм осадков по территории Украины

Природно-климатическая зона	Базовый период 1986 – 2005 гг.	По сценариям изменения климата в период 2021 – 2050 гг.			
		RCP4.5		RCP8.5	
	сумма осадков, мм	сумма осадков, мм	% от базового периода	сумма осадков, мм	% от базового периода
Полесье	651	595	91	591	91
Западная Лесостепь	600	543	91	556	91
Северная Степь	545	497	87	464	85
Южная Степь	464	374	81	406	88

В период от колошения до восковой спелости сумма осадков также вырастет на 7 % в Полесье, а в Западной Лесостепи, Северной Степи и Южной Степи уменьшится на 12 %, 34 % и 38 % соответственно. Количество осадков при условиях реализации сценария изменения климата RCP8.5 за вегетационный период увеличится в Полесье и Северной Степи на 8 % и 17 %, а в Западной Лесостепи и Южной Степи уменьшится на 3 % и 11 % соответственно.

Изменения агроклиматических условий повлекут изменение показателей фотосинтетической деятельности посевов ярового ячменя, что обусловит соответствующий уровень его урожайности. Такими показателями будут размеры фотосинтезирующей площади и фотосинтетический потенциал посевов, количественные показатели приростов растительной биомассы на единицу площади, чистая продуктивность фотосинтеза и урожай общей биомассы посевов (табл. 3).

Распределение ожидаемых климатических рисков недобора урожая ярового ячменя в 2021-2050 гг. по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 на территории Украины почти однородно.

Ожидаемые риски недобора урожая ярового ячменя будут колебаться в пределах от 5,6 до 25,5 %. Наименьшие ожидаемые риски недобора урожая ярового ячменя будут наблюдаться в Полесье и Западной Лесостепи (5,6 и 9,5 %). Несколько выше ожидаемые риски недобора урожая ярового ячменя будут наблюдаться в Северной Степи и в западных областях Южной Степи (9,6 и 13,5 %). Наиболее высокие ожидаемые риски недобора урожая ярового ячменя будут наблюдаться в центральных областях Южной Степи: по климатическому сценарию RCP4.5 в пределах 13,6 до 17,5 %, а по сценарию RCP8.5 – до 26 %.

В целом можно сказать, что по обоим сценариям изменения климата по всей территории Украины ожидается значительное изменение агроклиматических условий роста, развития и формирования продуктивности ярового ячменя.

Таблица 3. Сравнение показателей фотосинтетической продуктивности посевов ярового ячменя по среднесезонным данным (1986 – 2005 гг.) и по сценариям изменения климата RCP4.5 и RCP8.5

Период, годы	Вариант	Площадь листьев в период максимального развития, м ² /м ²	Чистая продуктивность фотосинтеза в период максимального развития, г/м ² дек	Прирост массы в период максимального развития, г/м ² дек	Сухая биомасса, г/м ²	Фотосинтетический потенциал, м ² /м ²
Полесье						
1986-2005	Базовый	1,62	81	124	454	79
RCP4.5	Климат	1,99	77	148	568	101
	Климат+CO ₂	2,09	79	159	605	106
RCP8.5	Климат	1,87	84	157	594	100
	Климат+CO ₂	2,00	86	172	647	106
Западная Лесостепь						
1986-2005	Базовый	1,52	88	126	475	74
RCP4.5	Климат	2,31	86	191	692	116
	Климат+CO ₂	2,44	88	205	739	121
RCP8.5	Климат	2,16	94	203	712	112
	Климат+CO ₂	2,32	96	223	777	119
Северная Степь						
1986-2005	Базовый	1,44	83	102	334	65
RCP4.5	Климат	1,96	95	179	563	90
	Климат+CO ₂	2,08	97	192	600	93
RCP8.5	Климат	2,34	100	224	677	104
	Климат+CO ₂	2,51	102	245	736	110
Южная Степь						
1986-2005	Базовый	2,66	89	174	499	114
RCP4.5	Климат	2,92	90	188	579	127
	Климат+CO ₂	3,08	91	202	617	133
RCP8.5	Климат	3,42	100	296	714	137
	Климат+CO ₂	3,69	102	324	778	150

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Наиболее интенсивное увеличение среднегодовой температуры воздуха возможно при развитии сценария выбросов RCP8.5, при котором наиболее резкие изменения температуры ожидаются на юге и востоке страны. По данным сценария RCP4.5 прогнозируется существенное уменьшение сезонных зимних температур воздуха.
2. По обоим сценариям RCP4.5 и RCP8.5 во всех природно-климатических зонах Украины на период 2021 – 2050 гг. ожидается уменьшение годовых сумм осадков. В холодный период года ожидается увеличение сумм осадков. Это увеличение будет составлять 106 – 108 % от базовой суммы в Полесье и Западной Лесостепи и 112 – 113 % в зоне Северной Степи. Разница между ожидаемой суммой осадков по сценариям будет наблюдаться в Лесостепной и Степной зонах. По сценарию RCP8.5 увеличение суммы осадков будет составлять 117 – 127 % от базовой.

вой суммы. В теплый период года по обоим сценариям изменения климата ожидается уменьшение сумм осадков по всей территории Украины.

3. Ожидаемые риски недобора урожая ярового ячменя будут колебаться в пределах от 5,6 до 25,5 %. Наименьшие ожидаемые риски недобора урожая ярового ячменя будут наблюдаться в Полесье и Западной Лесостепи (5,6 и 9,5 %). Несколько выше ожидаемые риски недобора урожая ярового ячменя будут наблюдаться в Северной Степи и в западных областях Южной Степи (9,6 и 13,5 %). Наиболее высокие ожидаемые риски недобора урожая ярового ячменя будут наблюдаться в центральных областях Южной Степи и составлять до 26 %.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Польовий А.М. Моделювання продуктивності агроєкосистем. // Вісник Одеського державного екологічного університету. Вип. 1, 2005. С. 79-86.

[2] Полевой А.Н. Моделирование фотосинтеза зеленого листа у растений типа C3 и C4 при изменении концентрации CO₂ в атмосфере. // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Том XXIII, 2010. С. 297-316.

[3] IS - ENES climate4impact portal [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://climate4impact.eu>.

Chapter III/57: UNCERTAINTY ANALYSIS OF MODEL BASED WATER FOOTPRINT ESTIMATIONS FOR WINTER WHEAT

Глава III/57: Анализ неопределённости оценок водопотребления озимой пшеницы, полученных с использованием имитационных моделей

Kurt Christian Kersebaum*; Wilfried Mirschel

DOI 10.25680/7889.2018.53.37.250

*Email: ckersebaum@zalf.de

Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Eberswalder Str. 84, 15374 Muencheberg, Germany

ABSTRACT. Water is a main resource for agricultural production and agricultural production systems have to face water scarcity. Therefore, the sustainable and effective use of water resources is essential especially when projected climate change is expected to reduce water availability. The concept of the 'Water Footprint' (WF) was introduced as an indicator that relates human consumption to global water resources. The WF of a crop is defined as the volume of water consumed for its production. Its calculation requires crop yields and the estimation of crop specific evapotranspiration. While under current climatic conditions observed crop yields can be used, the assessment of WF under future climate conditions requires the assessment of future yields based on model simulations. To assess the uncertainty caused by the selection of a crop model, the use of model ensembles has been proved to provide a good estimate of the uncertainty. Results from an ensemble modelling study across European sites revealed that the uncertainty in estimating crop yields is higher than the uncertainty resulting from the simulation of crop water use.

Резюме. Вода является важнейшим природным ресурсом для сельскохозяйственного производства. Но уже в настоящее время агропроизводство осуществляется в условиях дефицита воды. Поэтому устойчивое и эффективное использование водных ресурсов приобретает особую важность, особенно если прогнозируемые изменения климата, как ожидается, приведут к уменьшению доступности воды. Концепция «водопотребления» (ВП) была введена как показатель соотношения потребностей человечества в воде и доступности глобальных водных ресурсов. ВП урожая сельскохозяйственных культур определяется как объём потребляемой воды для продукционного процесса. Оценка ВП урожая основывается на данных об урожайности сельскохозяйственных культур и об удельной эвапотранспирации. Имеющиеся в настоящее время данные об урожайности обусловлены существующими показателями климата, но оценка урожайности и ВП в будущих климатических условиях требует выполнения прогнозных расчётов с использованием имитационной модели. В условиях неопределённости, вызванной выбором модели продукционного процесса сельскохозяйственной культуры, целесообразно использовать ансамбль моделей: это позволяет получить более достоверную оценку неопределённости в следствии использования моделей. Результаты ансамблевого моделирования урожайности сельскохозяйственных культур в различных местностях Европы показали, что неопределённость в оценке урожайности оказалась выше, чем неопределённость, возникающая в результате моделирования ВП сельскохозяйственных культур.

KEYWORDS: water footprint, crop model, evapotranspiration, ensemble modelling, uncertainty

Ключевые слова: водопотребление, модель продукционного процесса сельскохозяйственной культуры, эвапотранспирация, ансамблевое моделирование, неопределённость

INTRODUCTION

Agricultural production is very much dependent on the availability of water. About 70% of global world wheat production originates from irrigated or high rainfall regions [1]. Water use by agriculture influences the regional water resources, which are available for all key sectors. An increasing world population and the consequent rising need for food, feed and bioenergy will require a more efficient agriculture and water use by irrigation may exceed water recharge in many regions of the world.

Many attempts have been undertaken to improve the effective use of water in agricultural crop production. Since the factors influencing water use efficiency in crop production are manifold and vary with crops, crop management, environment and scales, local solution cannot easily be extrapolated to other regions. In this context, the concept ‘Water Footprint’ (WF) was introduced by [2] as an indicator that relates human water consumption to global water resources. The WF of a crop is defined as the volume of water consumed for its production. For its calculation information on water use as well as crop production is required. It can be further differentiated into blue and green WF, which stands for irrigation water usage and for rainwater usage, respectively. The indicator provides valuable information for a global assessment of how water resources are used. The WF can be calculated for goods, services, a specific activity, a business, an organization, and an individual or for a community [3].



Figure 1 – Winter wheat field with soil heterogeneity characteristic for the moraine landscape of North-East Germany at the beginning of grain filling as result of an early summer drought typically for the last decades and increasingly expected in the future under climate change.

The impacts of climate change with projected increasing temperatures and shifts of seasonal precipitation could cause water limitations in many areas of Europe [4]. Since this affects water consumption and crop yields as well, a change of currently estimated water footprint values can be expected under climate change. While under current conditions WFs are calculated on base of estimated crop specific evapotranspiration and observed crop yields usually from regional yield statistics, future developments have to be assessed by using simulation models for both variables creating additional uncertainty in the estimation of future WFs [5]. Several studies have shown that the application of multi-model ensembles is a valuable tool to assess the uncertainty in the estimation of climate impact on crop growth [6, 7] and water consumption [1].

AIM OF THE METHOD

The water footprint provides valuable information for a global assessment of how water resources are used. To assess changes of the water footprint under future climatic conditions water consumption as well as crop production has to be assessed by modelling. We use an ensemble of models applied to the same data sets of multiyear field data to assess the uncertainty of model based WF assessment caused by the selection of model.

PRINCIPLE AND PROCEDURE

Principle: The WF of a crop is defined as the ratio between the evapotranspiration (ET) and the crop yield, computed over the cropping period [8]. The green component in the water footprint of a crop (WF_{green} , m^3/ton) is calculated as the green component in crop water use (CWU_g , m^3/ha) divided by the crop yield (Y , ton/ha):

$$WF_{green} = \frac{CWU_g}{Y} \quad (1)$$

The blue component WF_{blue} is calculated in a similar way:

$$WF_{blue} = \frac{CWU_b}{Y} \quad (2)$$

The green and blue components in crop water use are calculated by the accumulation of daily evapotranspiration (mm/day) over the total growing period (sowing to harvest) under rainfed and irrigated production, respectively, whereas the blue water evapotranspiration is calculated as the total evapotranspiration simulated in the scenario with irrigation minus the simulated green water evapotranspiration. The FAO-Penman-Monteith equation [9] is recommended as the standard method for estimating reference and crop evapotranspiration [8].

To estimate the uncertainty related to the use of different models for the assessment of WF under future climate conditions an ensemble of different agro-ecosystem models including the simulation of water balance and crop production has to be applied to a common set of data from field experiments [1, 5, 6, 7].

Procedure: Common input data sets from field experiments are provided to a set of agro-ecosystem models which include process descriptions of soil water balance and crop production to simulate crop water use and crop yield for the estimation of the WF. Ideally, the experiments include variants with and without irrigation to distinguish between green and blue WF. A soil profile description for the rooting zone is provided including basic soil variables for each layer for modelling. The minimum data required is soil texture (sand, silt and clay contents), bulk density and organic matter content [10]. Since models are using different procedures to derive soil hydraulic properties from this, pre-derived parameters for field capacity and wilting point should be provided to reduce uncertainty created by different internal model procedures or pedo-transfer functions. This results in a better focus on the uncertainty of the model itself.

Ideally, the experimental data were achieved under no nutrient limitations, which can significantly reduce water use efficiency and increase the calculated WF [5]. Since the calculation of water footprints are usually for larger areas and regions, opportunities for model calibration are normally poor due to data scarcity. Therefore, the estimation of model uncertainty from ensemble modelling is often performed with very basic calibration, e.g. adjustment of crop phenology parameters based on observed flowering and maturity dates [6, 7].

APPLICATION

To estimate the uncertainty of model based estimation of the water footprint for crops [5] performed an ensemble modelling study using different agroecosystem models, which were applied to different data sets across Europe. Figure 2 shows a summary of the results for the data set at Müncheberg/Germany using an ensemble of eight models (APSIM, AQUACROP, CROPSYST, DAISY, DSSAT 4.5, DSSAT 4.6, HERMES, SWAP). The field experiment was performed under rainfed (RF) and irrigated (IR) conditions for a crop rotation. Details of the experimental data set are described by [11, 12]. Results for winter wheat from seven growing seasons were used. Results in Figure 1 show that the range of the ensemble results is smaller for the estimated ET (coefficient of variation (cv) = 14.1 and 15.1 % for RF and IR, respectively) than for the simulated yields (cv = 19.4 and 21.8 % for RF and IR). The cv of the estimated water footprint ($WF_{\text{green}} + WF_{\text{blue}}$) was estimated with 15.1 and 18.3%. In general the inter-model variability was higher than the inter-annual variability of the investigated crop seasons.

CONCLUSIONS

1. The WF of a crop is defined as the volume of water consumed for its production and is an indicator for the efficiency and sustainability of water use in crop production.
2. To estimate the water footprint under changing climatic conditions observed crop yields has to be replaced by simulated crop production.
3. Uncertainty in predictions is related to uncertainties of inputs (soil, climate scenarios), but also through the selection of the model to simulate crop yields and water consumption. The latter uncertainty can be estimated by the use of model ensembles applied to the same data.
4. Results indicate that the uncertainty of crop yield prediction contributes more to the uncertainty in the assessment of future development of water use efficiency and water footprint calculation than the estimation of evapotranspiration.
- 5.

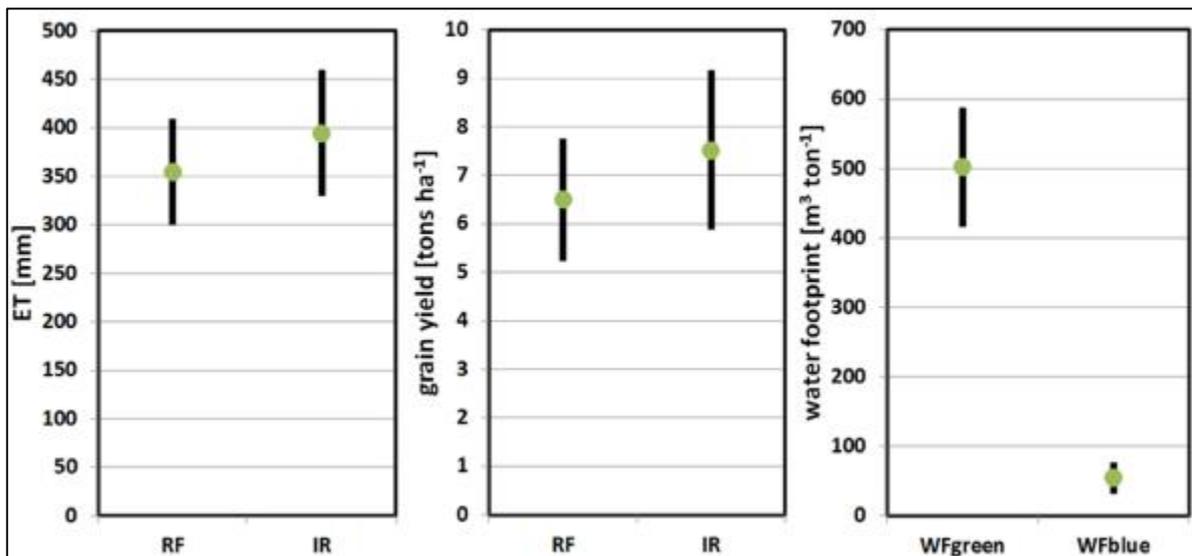


Figure 2 – Mean and standard deviation of simulated evapotranspiration (ET), grain yield of winter wheat and the corresponding green (WF_{green}) and blue (WF_{blue}) water footprints from an ensemble of eight agro-ecosystem models applied to a data set from Müncheberg/Germany with and without irrigation.

REFERENCES

[1] Cammarano, D., Rötter, R.P., Asseng, S., Ewert, F., Wallach, D., Martre, P., Hatfield, J.L., Jones, J.W., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., Boote, K.J., Thorburn, P.J., Kersebaum, K.C., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Basso, B., Bertuzzi, P., Biernath, C., Brisson, N., Challinor, A.J., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Heng, L., Hooker, J.E., Hunt, L.A., Ingwersen, J., Izaurralde, R.C., Müller, C., Kumar, S.N., Nendel, C., O'Leary, G., Olesen, J.E., Osborne, T.M., Palosuo, T., Priesack, E., Ripoche, D., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Steduto, P., Stöckle, C.O., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Travasso, M.,

- Waha, K., White, J.W., Wolf, J. 2016. Water use of wheat: simulated patterns and sensitivity to temperature and CO₂. *Field Crops Res.* 198, 80-92.
- [2]Hoekstra, A. Y. (ed). 2003. Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No 12, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf
- [3]Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. 2010. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat, *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 1259–1276.
- [4]Trnka, M., Olesen, J.E., Kersebaum, K.C., Skjelvag, A.O., Eitzinger, J., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rötter, R., Iglesias, A., Orlandini, S., Dubrowsky, M., Hlavinka, P., Balek, J., Eckersten, H., Cloppet, E., Calanca, P., Gobin, A., Vucetic, V., Nejedlik, P., Kumar, S., Lalic, B., Mestre, A., Rossi, F. 2011. Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Global Change Biology*, 17 (7), 2298-2318.
- [5]Kersebaum, K.C., Kroes, J., Gobin, A., Takáč, J., Hlavinka, P., Trnka, M., Ventrella, D., Giglio, L., Ferrise, R., Moriondo, M., Dalla Marta, A., Luo, Q., Eitzinger, J., Mirschel, W., Weigel, H.-J., Mander-scheid, R., Hoffmann, M., Nejedlik, P., Hösch, J. 2016. Assessing the uncertainty of model based water footprint estimation using an ensemble of crop growth models on winter wheat. *Water*, 8, 571.
- [6]Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J., Patil, R., Ruget, F., Rumbaur, C., Takac, J., Trnka, M., Bindi, M., Caldag, B., Ewert, F., Ferrise, R., Mirschel, W., Saylan, L., Siska, B., Rötter, R. 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *Eur. J. Agron.*, 35 (3): 103-114.
- [7]Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J.W., Hatfield, J.L., Ruane, A., Boote, K.J., Thorburn, P., Rötter, R.P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R., Heng, L., Hooker, J., Hunt, T., Ingwersen, J., Izaurralde, C., Kersebaum, K.C., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O’Leary, G., Olesen, J.E., Osborne, T.M., Palosuo, T., Priesack, E., Ripoche, D., Semenov, M., Shcherbak, I., Steduto, P., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Travasso, M., Waha, K., Wallach, D., White, J., Williams, J.R., Wolf, J. 2013. Quantifying uncertainties in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change* 3, 827–832.
- [8]Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M. 2011. *Water Footprint Manual: Setting the global standard*. Water Footprint Network, Earthscan, London, pp. 203.
- [9]Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, Food and Agriculture Organization, Rome.
- [10]Kersebaum, K.C., Boote, K.J., Jorgenson, J.S., Nendel, C., Bindi, M., Frühauf, C., Gaiser, T., Hoo-genboom, G., Kollas, C., Olesen, J.E., Rötter, R.P., Ruget, F., Thorburn, P.J., Trnka, M., Wegehenkel, M. 2015. Analysis and classification of data sets for calibration and validation of agro-ecosystem models. *Env. Model. Software* 72, 402-417.
- [11]Mirschel, W., Wenkel, K.-O., Wegehenkel, M., Kersebaum, K.C., Schindler, U., Hecker, J.-M. 2007. Müncheberg field trial data set for agro-ecosystem model validation. - In: Kersebaum, K.C., Hecker, J.-M., Mirschel, W., Wegehenkel, M.: *Modelling water and nutrient dynamics in soil crop systems: proceedings of the workshop on "Modelling water and nutrient dynamics in soil-crop systems"* held on 14 - 16 June 2004 in Müncheberg, Germany: 219-243; Dordrecht (Springer).
- [12]Mirschel, W., Barkusky, D., Hufnagel, J., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Laacke, L., Luzi, K., Rosner, G. 2016. Coherent multi-variable field data set of an intensive cropping system for agro-ecosystem modelling from Müncheberg, Germany. *Open Data Journal for Agricultural Research* 2, 1-10.

Chapter III/58: MULTI-MODEL UNCERTAINTY ANALYSIS IN PREDICTING THE YIELD OF NITROGEN IN CEREAL GRAINS FOR CROP ROTATIONS IN EUROPE

Глава III/58: Мультимодельный анализ неопределенности при оценке количества азота в зерне злаковых культур, возделываемых в севооборотах Европы

Xiaogang Yin^{1, 13, 18*}; Kurt Christian Kersebaum²; Chris Kollas^{2, 3}; Kiril Manevski¹; Sanmohan Baby¹; Nicolas Beaudoin⁴; Isik Öztürk¹; Thomas Gaiser⁵; Lianhai Wu⁶; Munir Hoffmann⁷; Monia Charfeddine⁸; Tobias Conradt³; Julie Constantin⁹; Frank Ewert^{2, 5}; Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri¹⁰; Luisa Giglio⁸; Petr Hlavinka^{11, 12}; Holger Hoffmann⁵; Marie Launay¹⁰; Gaëtan Louarn¹³; Remy Manderscheid¹⁴; Bruno Mary⁴; Wilfried Mirschel²; Claas Nendel²; Andreas Pacholski^{14, 15}; Taru Palosuo¹⁵; Dominique Ripoche-Wachter¹⁰; Reimund P. Rötter^{7, 16}; Françoise Ruget¹⁷; Behzad Sharif¹; Mirek Trnka^{11, 12}; Domenico Ventrella⁸; Hans-Joachim Weigel¹⁴; Jørgen E. Olesen¹

DOI 10.25680/8134.2018.18.36.251

* Email: xiaogangyin87@163.com

1. Department of Agroecology, Aarhus University, Blichers Alle 20, 8830, Tjele, Denmark

2. Institute of Landscape Systems Analysis, Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg, Germany

3. Potsdam Institute for Climate Impact Research, P.O. Box 601203, 14412 Potsdam, Germany

4. INRA UR1158 AgroImpact, 02000 Barenton-Bugny, France

5. INRES, University of Bonn, Katzenburgweg 5, Bonn 53115, Germany

6. Rothamsted Research, North Wyke, Okehampton EX20 2SB, UK

7. Crop Production Systems in the Tropics, Georg-August-Universität Göttingen, Grisebachstr. 6, 37077 Göttingen, Germany

8. Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA), Unità di ricerca per i sistemi colturali degli ambienti caldo-aridi (CREA-SCA), Via Celso Ulpiani 5, 70125 Bari, Italy

9. INRA, UMR1248 AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

10. INRA, US1116 AgroClim, F-84914 Avignon, France

11. Global Change Research Centre AS CR, v.v.i., Břelidla 986/4a, 603 00 Brno, Czech Republic

12. Institute of Agrosystems and Bioclimatology, Mendel University in Brno, Zemedelská 1, 613 00 Brno, Czech Republic

13. INRA, UR4 URP3F, F-86600 Lusignan, France

14. Thünen Institute of Biodiversity, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany

15. Graduate School/Inkubator, Leuphana University Lüneburg, Scharnhorststr. 1, 21335 Lüneburg, Germany

16. Natural Resources Institute Finland (Luke), P.O. Box 18, FI-01301 Vantaa, Finland

17. INRA, UMR1114 EMMAH, F-84914 Avignon, France

18. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University; and Key laboratory of Farming system, Ministry of Agriculture of China, 100193 Beijing, China

ABSTRACT. The accurate estimation of crop grain nitrogen (N) is crucial for assessing N management in crop rotations. Thus, 12 widely used process-based models were applied to simulate the grain N in typical European rotations under both continuous simulation and single year simulation with two calibrations. Our results show that the higher level of calibration significantly increased the quality of the simulation of grain N. In addition, models performed better in predicting grain N of winter wheat, winter barley and spring barley compared to spring oat, winter rye, pea and winter oilseed rape. For each crop, the use of the ensemble mean significantly reduced the mean absolute percentage error (MAPE) between simulations and observations to less than 15%, thus a multi-model ensemble can more precisely predict grain N than a random single model. Moreover, both the model initialization and the cover crop effects should be considered in order to achieve good performance of continuous simulation.

Резюме. Точная оценка содержания азота (N) в зерне полевых культур имеет решающее значение для управления азотным режимом агроценозов в севооборотах. Двенадцать широко известных динамических моделей агроэкологических систем применены для расчета содержания N в зерне полевых культур, возделываемых в типичных для Европы севооборотах, с использованием двух калибровок: 1) при непрерывном имитационном моделировании всего севооборота; 2) при имитационном моделировании продукционного процесса растений в однолетнем вегетационном периоде. Результаты показывают, что при более высоком уровне калибровки достигается значительно более высокая точность расчета динамики N зерна полевых культур. Модели более точно предсказали динамику N зерна озимой пшеницы, озимого ячменя и ярового ячменя по сравнению с культурами ярового овса, озимой ржи, гороха и озимого рапса. Для урожая каждой культуры использование ансамбля моделей привело к значительному уменьшению среднего абсолютного процентного отклонения (mean absolute percentage error, MAPE) результатов расчета от экспериментальных данных (менее 15%). Таким образом, применение мультимодельного ансамбля позволяет более точно предсказать динамику N зерна полевых культур по сравнению с результатами использования какой-либо отдельной модели. Для обеспечения высокой прогностической точности непрерывного имитационного моделирования продуктивности агроценозов следует учитывать как инициализацию применяемых моделей, так и эффекты влияния предшественников.

KEYWORDS: continuous simulation, grain N content, model calibration, model ensemble, model inter-comparison, single year simulation

Ключевые слова: непрерывное имитационное моделирование, содержание N в зерне, калибровка моделей, ансамбль моделей, сопоставление моделей, однолетнее моделирование

INTRODUCTION

Increasing rates of nitrogen (N) fertilizers and manure in crop production has in many cases led to lower N use efficiency (NUE) and higher N losses to both the atmosphere and to groundwater and surface waters, which has been designated as paramount challenges for the European agriculture [1, 2]. Methods to enhance NUE and reduce N losses have therefore received great attention in both agricultural and environmental research and management programs [3]. Previous studies have demonstrated the marked positive effects of crop rotations on N utilization compared to monocultures [4], leading to higher grain N uptake and improved NUE, which also have notable effects on mitigating N losses [5]. Process-based models can complement experimental approaches by extrapolating the results to larger scales and by testing scenarios of different management and climatic conditions. The capability to simulate grain N is crucial for the establishing confidence in model for use in supporting both policy and crop management. However, models have rarely been compared with respect to their capability for simulating grain N in the crop rotations.

Recent studies have demonstrated that multi-model ensembles result in more accurate estimation of grain yield for various crops compared to any single model across different seasons and sites [6, 7, 8]. However, the prediction quality of multi-model ensembles for grain N of cereal crops in typical European crop rotations is still unknown. Therefore, the aims of the study were to 1) evaluate how calibration affects the uncertainty in predicted grain N, 2) assess how ensembles of models affect the accuracy and precision in simulated grain N, and 3) investigate if continuous simulation is superior over single year simulation in predicting grain N in the crop rotations.

MATERIAL AND METHODS

Data for the modelling exercise were obtained from four typical multi-year rotation experiments in the Atlantic North, Atlantic Central, Continental and Pannonia regions of Europe, namely Foulum (Denmark), Braunschweig (Germany), Müncheberg (Germany) and Thibie (France). Additional information about the treatments has been previously published for [9], Braunschweig [10], Müncheberg [11] and Thibie [3].

Briefly, the experiments consisted of seven main cereal crops, namely winter wheat, winter barley, spring barley, spring oat, winter rye, pea and winter oilseed rape. In the current study, a total of 12 models provided estimates of grain N, and all models were dynamic and worked on a daily time step (Table 2 in [12]). The models were grouped according to their capability in predicting continuous crop growth: APSIM, SIMPLACE and SWIM were used for continuous simulations only; DSSAT4.6, DSSAT4.5, SPACSYS and WOFOST were applied for single year simulation only; whereas DAISY, FASSET,

HERMES, MONICA and STICS were tested in both continuous simulation and single year simulation. Generally, the continuous simulation was set up using specified initial values in the starting year, and crop growth was subsequently simulated for the whole period of the rotation. In contrast, single year simulations are set up using the initial values and run the first year of simulations, and subsequently use estimates of the initial values to simulate the subsequent years separately [13].

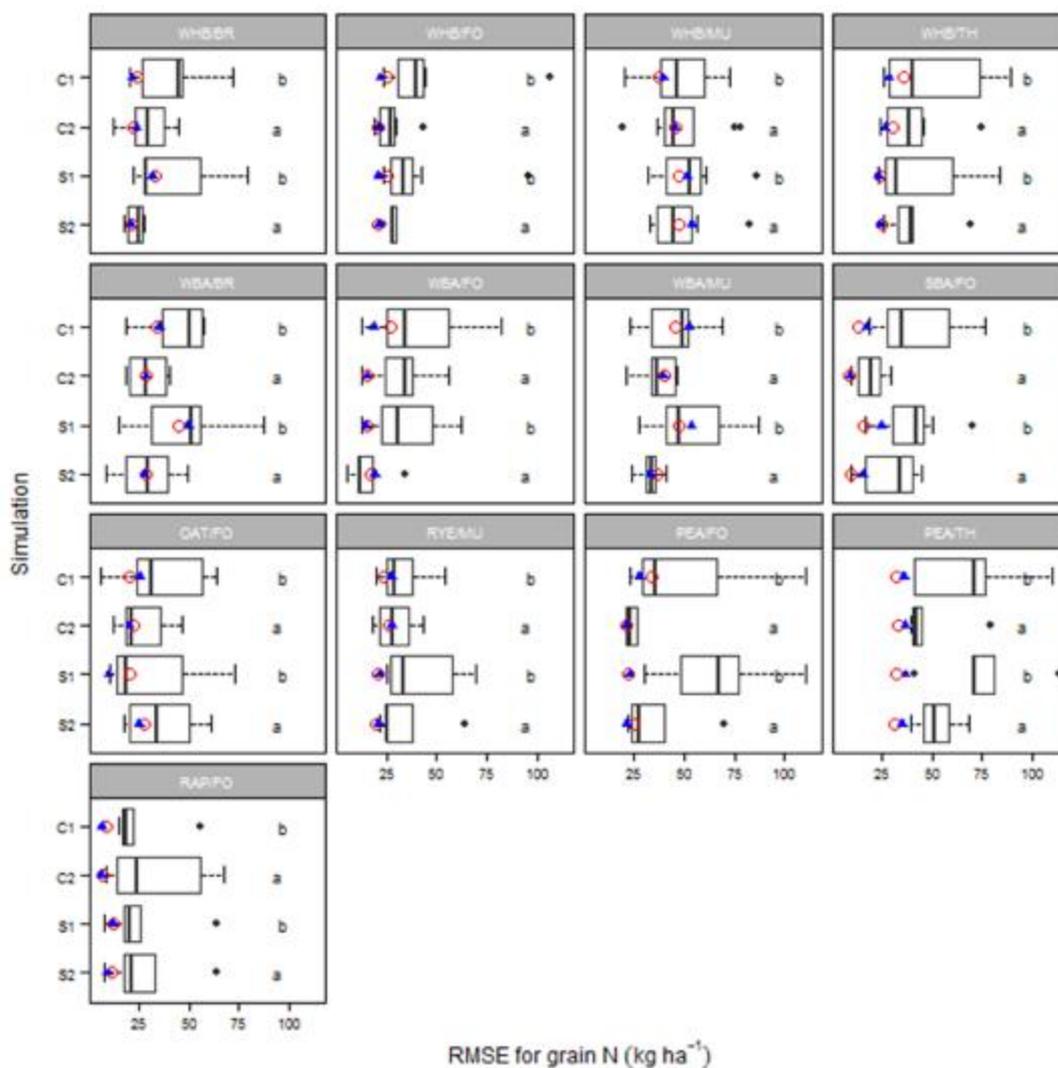


Figure 1 –Root mean square error (RMSE) for grain N of winter wheat, winter barley, spring barley, spring oat, winter rye, pea and winter oilseed rape in each site in all simulation modes [12].

RESULTS AND APPLICATIONS

The current study showed that the increased detail of the observed data used for calibration generally results in better simulation of grain N under both continuous simulation and single year simulation (Fig. 1). The minimal calibration of the models generally leads to a high degree of uncertainty for yield estimates [14]. Providing additional measured data for calibration can efficiently improve the accuracy of the model simulation in predicting grain N in crop rotations, which was in consistent with similar studies in predicting crop production [15]. Our results also indicated that the impacts of calibration on model performance interacts with the option of either continuous simulation or single year simulation and with the model itself, and calibration with more observed data from contrasting sites is essential for improving model simulation [16]. In addition, models performed better in predicting grain N of winter wheat, winter barley and spring barley compared to spring oat, winter rye, pea and winter oilseed rape in all cases. This is because modelers have less experience on those crops and experimental data for these minor crops (i.e. spring oat, winter rye, pea and winter oil seed rape) are very limited.

Our results showed that the multi-model mean estimates provided good agreement with the measured values in all cases. The multi-model mean results in more reliable simulations with the mean absolute deviation (MAPE) from the measured grain N being smaller than 15%, which is equivalent to the typical deviation level of measured grain N in agronomic field experiments [17]. Obviously, for the selected sites and treatments in the current study, the ensemble mean was a better predictor of the field observations of grain N than any individual model. Indeed, the results underline the fundamental statistical law stating that the mean estimates are more reliable and accurate when based on a larger sample of observations [6]. Generally, the more models that participate in the study, the closer is the multi-model mean to the observed data [8, 12]. This is because the errors in different models tend to compensate each other, which makes the ensemble mean a better estimator than any individual model [8]. Moreover, our results indicate that better calibration leads to the multi-model mean being much closer to the measured data under both rotation simulation and single year simulation. In addition, improved calibration can generally reduce the number of models required for an acceptable level of simulation uncertainty [13].

Our results show that models provided more accurate results in continuous simulation compared to single year simulation mode for specific crops and management treatments. The differences between continuous simulation and single year simulation likely originate from interactions occurring between N mineralization, N leaching, crop N uptake, water transfer and thus carry over effects of N and water [5, 18]. The grain N uptake is generally determined by the crop N requirement, but it is limited by the availability of mineral N in the soil, N fertilization application and N remobilization from vegetative organs, which is the primary source of N for grains [19]. Microbial turnover of C and N, and their interactions with the crop have been recognized as key processes for N supply [20]. Our results clearly recognize the continuous effort in improving the simulation of the soil N processes over time for the models. However, models are different considerably in the simulation of N uptake because it is influenced directly by both the crop growth approach and the soil nitrogen approach [20]. The daily absorption of N is equal to the minimum of supply available through the soil-root system and crop requirements. Therefore, the different initial values in setting up models from the second year in crop rotations between the continuous simulation and single year simulation should strongly influence the model simulation of grain N in crop rotations. In addition, soil is the main medium by which water and N are transferred in the sequence of crops. Thus, the accurate simulation of the soil processes was crucial when simulating crop rotations. Moreover, the choice of the simulation method can be systematically shaped by the characteristics of the crop rotations (e.g. whether the catch crops are included in the rotations) being modeled [21]. Generally, both catch crops and the sequences of crops in the rotations greatly influenced mineralization of soil organic matter and soil mineral N content, and thus affected the N application in crop rotations. Therefore, further crop modeling studies predicting crop rotations should consider these aspects.

CONCLUSIONS

1. Using multi-model ensembles significantly improved prediction of grain N compared to a random single model.
2. Complex models of N cycling with well parameterized crops provide reasonably accurate simulations in predicting grain N.
3. Detailed model calibration significantly increased the accuracy of predictions of grain N.
4. Emphasis should be given to model initialization and the cover crops effects in continuous simulation.

REFERENCES

- [1]Constantin, J., Mary, B., Laurent, F., Aubrion, G., Fontaine, A., Kerveillant, P., Beaudoin, N., 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 135, 268-278.
- [2]Dalgaard, T., Hansen, B., Hasler, B., Hertel, O., Hutchings, N.J., Jacobsen, B.H., Jensen, L.S., Kronvang, B., Olesen, J.E., Schjørring, J.K., 2014. Policies for agricultural nitrogen management—trends, challenges and prospects for improved efficiency in Denmark. *Environmental Research Letters* 9, 115002.
- [3]Gastal, F., Lemaire, G., Durand, J-L., Louarn, G., 2014. Quantifying crop responses to nitrogen and avenues to improve nitrogen-use efficiency. *Crop physiology—Applications for genetic improvement and agronomy*, 2nd edn. Academic, Elsevier, 161-206.
- [4]López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., 2001. Efficiency of nitrogen in wheat under Mediterranean conditions: effect of tillage, crop rotation and N fertilization. *Field Crops Research* 71, 31-46.

- [5]Beaudoin, N., Launay, M., Sauboua, E., Ponsardin, G., Mary, B., 2008. Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the "on farm" database of Bruyeres catchment. *European Journal of Agronomy* 29, 46-57.
- [6]Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C. et al., 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change* 3, 827-832.
- [7]Bassu, S., Brisson, N., Durand, J.L. et al., 2014. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? *Global Change Biology* 20, 2301-2320.
- [8]Li, T., Hasegawa, T., Yin, X. et al., 2015. Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions. *Global Change Biology* 21, 1328-1341.
- [9]Munkholm, L.J., Hansen, E.M., Olesen, J.E., 2008. The effect of tillage intensity on soil structure and winter wheat root/shoot growth. *Soil Use and Management* 24, 392-400.
- [10]Weigel, H.J., Manderscheid, R., 2012. Crop growth responses to free air CO₂ enrichment and nitrogen fertilization: Rotating barley, ryegrass, sugar beet and wheat. *European Journal of Agronomy* 43, 97-107.
- [11]Mirschel, W., Wenkel, K.O., Wegehenkel, M., Kersebaum, K.C., Schindler, U., Hecker, J.-M., 2007. Müncheberg field trial data set for agro-ecosystem model validation. In: Kersebaum, K.C., Hecker, J.-M., Mirschel, W., Wegehenkel, M. (eds.). *Modelling water and nutrient dynamics in soil-crop systems*. Springer, Dordrecht, 219-243.
- [12]Yin. X., Kersebaum, K.C., Kollas, C. et al., 2017. Multi-model uncertainty analysis in predicting grain N for crop rotations in Europe. *European Journal of Agronomy* 84, 152-165.
- [13]Kollas, C., Kersebaum, K.C., Nendel, C. et al., 2015. Crop rotation modelling—A European model intercomparison. *European Journal of Agronomy* 70, 98-111.
- [14]Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C. et al., 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy* 35, 103-114.
- [15]Kersebaum, K.C., Boote, K.J., Jorgenson, J.S. et al., 2015. Analysis and classification of data sets for calibration and validation of agro-ecosystem models. *Environmental Modelling and Software* 72, 402-417.
- [16]Yin. X., Kersebaum, K.C., Kollas, C. et al., 2017. Performance of process-based models for simulation of grain N in crop rotations across Europe. *Agricultural Systems* 154, 63-77.
- [17]Belder, P., Bouman, B.A.M., Spiertz, J.H.J., 2007. Exploring options for water savings in lowland rice using a modelling approach. *Agricultural Systems* 92, 91-114.
- [18]Gerke, H.H., Arning, M., Stöppler-Zimmer, H., 1999. Modeling long-term compost application effects on nitrate leaching. *Plant and Soil* 213, 75-92.
- [19]Miransari, M., Mackenzie, A., 2010. Wheat grain nitrogen uptake, as affected by soil total and mineral nitrogen, for the determination of optimum nitrogen fertilizer rates for wheat production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 41, 1644-1653.
- [20]Kersebaum, K.C., Hecker, J.-M., Mirschel, W., Wegehenkel, M., 2007. Modelling water and nutrient dynamics in soil-crop systems: a comparison of simulation models applied on common data sets. *Modelling water and nutrient dynamics in soil-crop systems*. Springer, pp. 1-17.
- [21]Teixeira, E.I., Brown, H.E., Sharp, J., Meenken, E.D., Ewert, F., 2015. Evaluating methods to simulate crop rotations for climate impact assessments – A case study on the Canterbury plains of New Zealand. *Environmental Modelling and Software* 72, 304-313.

Основная глава 11.2 Гидрологическое моделирование Main Chapter 11.2 Hydrological Modelling

Chapter III/59: MODELLING FRESHWATER RESOURCES AND THEIR USE AT THE GLOBAL SCALE: MOTIVATION, CHALLENGES AND PROSPECTS

Глава III/59: Моделирование ресурсов пресной воды и их использование в глобальном масштабе: мотивация, проблемы и перспективы

Petra Döll*^{1,2}; Hannes Müller Schmied^{1,2}

DOI 10.25680/7763.2018.35.60.252

* Email: p.doell@em.uni-frankfurt.de

1. Institute of Physical Geography, Goethe University Frankfurt, Altenhöferallee 1, D-60438 Frankfurt am Main, Germany

2. Senckenberg Biodiversity and Climate Research Centre (BiK-F), Senckenberganlage 25, D-60325 Frankfurt am Main, Germany

ABSTRACT. Quantification of spatially and temporally resolved water flows and water storage variations for all land areas of the globe is required 1) to understand the Earth system and 2) to support a sustainable management of water, food and energy in a globalized world. Global hydrological models (GHMs) have been shown to be appropriate tools to achieve this quantification as they bring together a large amount of diverse data with process knowledge. They serve to estimate water resources, water scarcity as well as flood and drought hazard in a consistent manner, both for current conditions and under climate change. Still, uncertainties of model output are large due to inaccurate model input and inappropriate model algorithms. Therefore, multiple GHMs should be used for assessing the impact of climate change on the global freshwater system. To reduce uncertainty and to achieve an improved understanding of the global freshwater system, a methodology for calibration and data assimilation of GHMs using multiple types of in-situ and remotely sensed observations should be developed.

Резюме. Количественная оценка динамики реальных и потенциальных водных объектов для всех земельных угодий земного шара необходима 1) для понимания системы Земли и 2) для обеспечения устойчивого управления водными ресурсами, продовольствием и энергией в глобализованном мире. Показано, что глобальные гидрологические модели (GHM) являются подходящими инструментами для достижения этой количественной оценки, поскольку они объединяют большое количество разнообразных данных с информацией о процессе. Они служат для оценки водных ресурсов, нехватки воды, а также риска наводнений и засухи в согласованном порядке как для текущих условий, так и в условиях изменения климата. Тем не менее, неопределенности вывода модели велики из-за неточности входных данных и несоответствующих алгоритмов модели. Поэтому для оценки воздействия изменения климата на глобальную систему ресурсов пресной воды следует использовать несколько GHM. Чтобы уменьшить неопределенность и добиться лучшего понимания глобальной системы ресурсов пресной воды, следует разработать методологию калибровки и усвоения данных по GHM с использованием нескольких типов наблюдений на месте и дистанционно.

KEYWORDS: global hydrological model, renewable water resources, runoff coefficient

Ключевые слова: глобальная гидрологическая модель, возобновляемые водные ресурсы, коэффициент стока

INTRODUCTION

While water management and related modeling of water flows and storages have for a long time concentrated on the scale of drainage basins, interest in obtaining a consistent quantification of water flows and storages as well as of human water use for all land areas of the globe has strongly increased in recent years. On the one hand, such quantitative estimates are required for a better understanding of the Earth system including the climate system, the carbon and nutrient cycles and the variability of regional and global sea levels. For example, groundwater depletion all around the globe leads to sea level rise [1]. On the other hand, in a globalized world, a global-scale estimation of spatially and temporally heterogeneous water resources and how they are used and impacted by human activities is required to support a sustainable development of the human-water system. This is mainly due the strong nexus between water re-

sources (and use) and energy and food production. In a globalized world, quantitative global-scale data on water flows and storages inform 1) decisions of companies with globally-distributed production sites or sources that perform life-cycle analyses/water footprint analyses as part of their corporate sustainability efforts, 2) decisions of regulatory bodies and consumers as international trade leads to global virtual water flows where consumer decisions in one country may impact water resources in many others, 3) local and regional drought management as droughts elsewhere on the globe affect crop production and therefore crop prices, 4) international investments in support of sustainable development and climate adaptation by spatially consistent information on hot spots as well as 5) monitoring the achievement of UN Sustainable Development Goals until 2030 (in particular goal 6 Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all, <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg6>) in case of local data scarcity.

During the last three decades, a number of global hydrological models (GHM) have been developed and improved to quantify water flows and storages at the global scale, mostly with a spatial resolution of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (55 km by 55 km at the equator) [2]. As an example for a GHM with a strong focus on modeling not only water resources but also human water, we present the GHM WaterGAP (Water – Global Assessment and Prognosis) as well as some illustrative model results for Europe, Central Asia and Siberia. We then shortly discuss challenges and prospects of quantifying water flows and storages as well as water use at the global scale.

THE GLOBAL HYDROLOGICAL MODEL WATERGAP

WaterGAP consists of five sectoral water use models, the linking model GWSWUSE that computes net abstractions from groundwater and surface water (based on the output of the water use models), and the WaterGAP Global Hydrology Model (WGHM) [3, 4]. It covers all land areas of the globe except Antarctica with a spatial resolution of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Depending mainly on available climate input, WaterGAP generally covers the time period 1901-2100. It computes human water use in the sectors households, manufacturing, cooling of thermal power plants, livestock and irrigation. The WGHM calculates daily water flows (e.g., evapotranspiration, runoff including fast surface and subsurface runoff as well as groundwater recharge, and streamflow) and water storages in 10 compartments, with time series of climate variables and net water abstractions from groundwater or surface water as main input (Figure 1). The impact of the whole landscape on water flows and storage is considered, i.e. not only the land area of each grid cell but also lakes, man-made reservoirs, wetlands and rivers are modelled, based on the Global Lakes and Wetland Database (GLWD) [5]. So-called “global” lakes, reservoirs and wetlands are those that receive water from the upstream cell, while “local” lakes and wetlands are only fed by the runoff generated within the grid cell. The WGHM is calibrated against observed long-term average annual streamflow at 1319 streamflow gauging world-wide by adjusting one to three model parameters [3]. WaterGAP has been used, for example, to quantify water scarcity for humans [6], to estimate the ecologically relevant streamflow alterations due to human water use and man-made reservoir [7], to determine sea level rise due to groundwater depletion [1] and to estimate the impact of climate change on floods and droughts [8] and on groundwater recharge [9]

RESULTS FOR EUROPE, CENTRAL ASIA AND SIBERIA

Forced by the EWEMBI climate data set [10], WaterGAP 2.2c was calibrated against streamflow observations (see Figure 2 bottom). To determine renewable water resources, i.e. long-term annual average runoff, the model was then run assuming that there was no human water use. Figure 2 (top) shows renewable water resources in Europe, Central Asia and Siberia for the time period 1981-2010. Values over 1000 mm/yr are reached in coastal areas of Europe, the Alps and parts of Kamchatka. Negative values occur in grid cells in dry areas where evapotranspiration is larger than precipitation due to evaporation from surface water bodies that are fed by upstream cells. Fig. 2 (bottom) shows which fraction of precipitation become renewable water resources, with higher values in cold and/or wet regions. Runoff coefficients (renewable water resources divided by precipitation) below 0.25 rather occur in semi-arid and arid regions. Values larger than 1 only occur in drainage basins with a streamflow observation that is larger than precipitation in the climate data set. While EWEMBI is corrected for snow undercatch, in these basins the precipitation seems to be still underestimated by the climate data set.

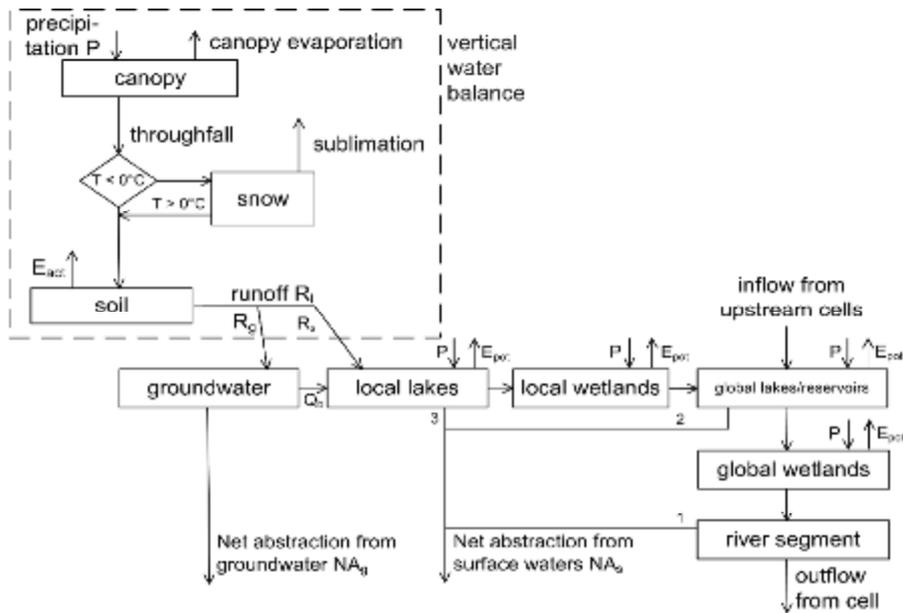


Figure 1 – Schematic of storages and flows as modelled to occur within one 0.5° grid cell in the GHM WaterGAP [2].

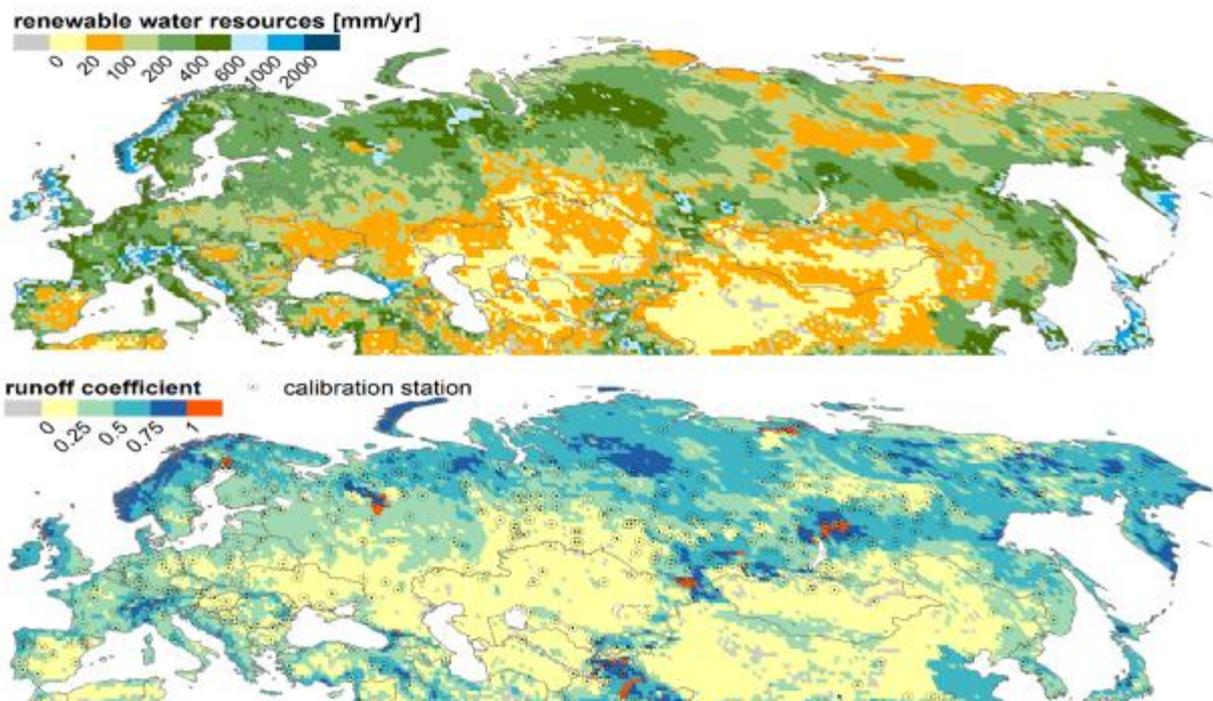


Figure 2 – Renewable water resources (top) and runoff coefficient, i.e. renewable water resources as a ratio of precipitation (bottom) during time period 1981-2010, as computed by WaterGAP 2.2c. In addition, the locations of streamflow observations used for model calibration are shown.

CHALLENGES AND PROSPECTS OF GLOBAL HYDROLOGICAL MODELING

While GHMs have shown to be suitable tools for consistently quantifying the dynamics of water flows and storages on all land areas of the globe, they still reproduce discharge observations rather poorly in quite a number of river basins, mainly due to inaccurate input data but also inappropriate model algorithms, e.g. regarding inundation of wetlands and processes in semi-arid regions [2, 3]. Also large-scale dynamics of total water storage that can be derived from GRACE satellite observations are not simulated well in many regions [11]. Challenges can be summarized as follows [12]: “(1) Data scarcity makes quan-

tification of human water use difficult even though significant progress has been achieved in the last decade. (2) Uncertainty of meteorological input data strongly affects model outputs. (3) The reaction of vegetation to changing climate and CO₂ concentrations is uncertain and not taken into account in most GHMs that serve to estimate climate change impacts. (4) Reasons for discrepant responses of GHMs to changing climate have yet to be identified. (5) More accurate estimates of monthly time series of water availability and use are needed to provide good indicators of water scarcity. (6) Integration of gradient-based groundwater modelling into GHMs is necessary for a better simulation of groundwater–surface water interactions and capillary rise. (7). Detection and attribution of human interference with freshwater systems by using GHMs are constrained by data of insufficient quality but also GHM uncertainty itself.”

Due to the uncertainties of GHMs (and other hydrological models), a multi-model approach to estimating impacts of climate change on freshwater is state of the art. In such an approach, bias-corrected output of a number of climate models is used as input to a number of GHMs, with each model combination assumed to be equally likely. In this way, a robust mean impact as well as its uncertainty can be quantified [12, 13, 14]. This approach is operationalized in the ISIMIP project (<https://www.isimip.org>). To achieve an improved quantification of water resources and their use at the global scale, we propose to make better use of in situ and remotely sensed observations of model output variables not only by multi-criteria validation but also by model calibration (with adjustment of model parameters) or data assimilation (with adjustment of simulated water storages) [12, 15]. These output variables include streamflow, total water storage from GRACE [9], elevation of lake, wetland and river water tables (DAHITI database, <http://dahiti.dgfi.tum.de/en/>; HYDROWEB database, <http://hydroweb.theia-land.fr/?lang=en&>) as well as areal extent of surface water bodies or snow. When using the remote sensing data in particular, the uncertainty of the observations must be taken into account as well as the different “footprints” of the observations.

CONCLUSIONS

1. Global-scale quantification of terrestrial water flows and storages is necessary for a better understanding of the Earth system and for supporting a sustainable management of water, food and energy in a globalized world.
2. GHMs are appropriate tools for integrating process knowledge and a multitude of data to allow best estimates of water flows and storages at the global scale.
3. Due to uncertain input data and inappropriate model algorithms, uncertainty of GHM output remains high. Therefore, impact of climate change on water resources should be assessed by a multi-model approach.
4. A methodology for calibration and data assimilation of GHMs using multiple types of in-situ and remotely sensed observations should be developed to reduce uncertainty and achieve an improved understanding of the global freshwater system.

REFERENCES

- [1]Döll, P., Müller Schmied, H., Schuh, C., Portmann, F., Eicker, A. 2014. Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resour. Res.*, 50, 5698–5720, doi: 10.1002/2014WR015595.
- [2]Bierkens, M. F. P. 2015. Global hydrology 2015: State, trends, and directions. *Water Resour. Res.*, 51, 4923–4947, doi:10.1002/2015WR017173.
- [3]Müller Schmied, H., Eisner, S., Franz, D., Wattenbach, M., Portmann, F.T., Flörke, M., Döll P. 2014. Sensitivity of simulated global-scale freshwater fluxes and storages to input data, hydrological model structure, human water use and calibration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 3511–3538, doi:10.5194/hess-18-3511-2014.
- [4]Müller Schmied, H., Adam, L., Eisner, S., Fink, G., Flörke, M., Kim, H., Oki, T., Portmann, F. T., Reinecke, R., Riedel, C., Song, Q., Zhang, J., and Döll, P. 2016. Variations of global and continental water balance components as impacted by climate forcing uncertainty and human water use. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 2877–2898. doi:10.5194/hess-20-2877-2016.
- [5]Lehner, B., Döll, P. 2004. Development and validation of a database of lakes, reservoirs and wetlands. *J Hydrol*, 296 (1–4), 1–22, doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.03.028.
- [6]Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., Siebert, S. 2003. Global estimates of water withdrawals and availability under current and future "business-as-usual" conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), 339–348, doi: 10.1623/hysj.48.3.339.45278.

- [7]Döll, P., Fiedler, K., Zhang, J. 2009. Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 2413-2432, doi:10.5194/hess-13-2413-2009.
- [8]Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, H., Kaspar, F. 2006. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated assessment. *Climatic Change*, 75, 273-299, doi: 10.1007/s10584-006-6338-4.
- [9]Portmann, F.T., Döll, P., Eisner, S., Flörke, M. 2013. Impact of climate change on renewable groundwater resources: assessing the benefits of avoided greenhouse gas emissions using selected CMIP5 climate projections. *Environ. Res. Lett.* 8, 024023. doi:10.1088/1748-9326/8/2/024023.
- [10]Lange, S. 2016. Earth2Observe, WFDEI and ERA-Interim data Merged and Bias-corrected for ISIMIP (EWEMBI). GFZ Data Services. <http://doi.org/10.5880/pik.2016.004>.
- [11]Döll, P., Fritsche, M., Eicker, A., Müller Schmied, H. 2014. Seasonal water storage variations as impacted by water abstractions: Comparing the output of a global hydrological model with GRACE and GPS observations. *Surv. Geophys.*, 35(6), 1311-1331, doi: 10.1007/s10712-014-9282-2.
- [12]Döll, P., Douville, H., Güntner, A., Müller Schmied, H., Wada, Y. 2016. Modelling freshwater resources at the global scale: Challenges and prospects. *Surv. Geophys.*, 37(2), 195-221, doi:10.1007/s10712-015-9343-1.
- [13] Döll, P., Jiménez-Cisneros, B., Oki, T., Arnell, N., Benito, C., Cogley, G., Jiang, T., Kundzewicz, Z.W., Mwakalila, S., Nishijima, A. 2015. Integrating risks of climate change into water management. *Hydrol. Sci. J.*, 60(1), 3-14. doi: 10.1080/02626667.2014.967250.
- [14]Schewe, J. et al. 2014. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 111(9), 3245–3250. doi:10.1073/pnas.1222460110.
- [15]Eicker, A., Schumacher, M., Kusche, J., Döll, P., Müller Schmied, H. 2014. Calibration/data assimilation approach for integrating GRACE data into the WaterGAP Global Hydrology Model (WGHM) using an ensemble Kalman Filter: first results. *Surv. Geophys.*, 35(6), 1285-1309, doi:10.1007/s10712-014-9309-8.

Глава III/60: ОЦЕНКА БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДОЕМЫ С ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ

Chapter III/60: Assessment of Nutrient Load on Water Bodies from Natural and Anthropogenic Landscapes

Сергей А. Кондратьев*¹, Александр Ю. Брюханов²

DOI 10.25680/7448.2018.24.67.253

*Эл. Почта: kondratyev@limno.org.ru

1.Институт озерадения Российской академии наук, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова 9

2.Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, 196625, Санкт-Петербург, Фильтровское шоссе 3

РЕЗЮМЕ. Разработана математическая модель рассредоточенной (диффузной) биогенной нагрузки на водные объекты, сформированная за счет эмиссии азота и фосфора в дождевые и талые воды с различных типов подстилающей поверхности водосбора. Особое внимание уделено нагрузке от сельскохозяйственных территорий. Модель ориентирована на решение задач, связанных с выполнением рекомендаций Плана Действий по Балтийскому Морю ХЕЛКОМ по снижению биогенной нагрузки на морскую акваторию. Для крупных водосборов источником информации о структуре поверхности могут служить космические снимки. В качестве примера работы модели приведены результаты расчетов рассредоточенной биогенной нагрузки на Онежское озеро – второй по величине пресноводный водоем Европы, расположенный на водосборе Финского залива Балтийского моря. В качестве основного направления совершенствования модели определено проведение натурных исследований по детальной оценке параметров эмиссии биогенных веществ с различных естественных и антропогенных ландшафтов водосбора.

Abstract. A mathematical model of the non-point (diffuse) nutrient load on water bodies formed due to the emission of nitrogen and phosphorus into rain and melted waters from different types of the land surface in the catchment area has been developed. Special attention is paid to the load from agricultural areas. The model is aimed at solving problems related to the implementation of the recommendations of the HELCOM Baltic Sea Action Plan for reducing the nutrient load on the aquatic system. For large catchments space imagery can serve as a source of information on the structure of the land surface. As an example of the model working, the results of calculations of the non-point nutrient load from the catchment area to Lake Onega - the second largest freshwater lake in Europe located in the catchment area of the Gulf of Finland of the Baltic Sea, are presented. As the main direction of improving the model, it was determined to conduct field studies for detailed assessment of the parameters of nutrients emission from different natural and anthropogenic landscapes in catchment.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рассредоточенная биогенная нагрузка, водосбор, подстилаящая поверхность, космический снимок, модель

Keywords: non-point nutrient load, catchment, land surface, space imagery, model

ВВЕДЕНИЕ

Необходимым условием создания системы охраны и рационального использования водного объекта, а также управления его ресурсами является наличие расчетного метода или математической модели, связывающих нагрузку от различных источников на водосбор с нагрузкой на водоем, а затем с показателями качества воды и экологического состояния. Отсутствие такого метода делает практически невозможным решение задачи по научно-обоснованному выбору путей снижения нагрузки за счет изменений интенсивности каких-либо источников загрязнения, а также достижения заданных характеристик качества воды в водоеме и заданного экологического статуса. Естественные и антропогенные ландшафты являются, как правило, основными источниками рассредоточенной (диффузной) нагрузки на водные объекты. Первым шагом на пути подробной ландшафтной оценки нагрузки на реки, озера и водохранилища являются расчеты выноса биогенных элементов с различных типов подстилаящей поверхности водосбора.

В бассейне Балтийского моря снижение биогенной нагрузки, приводящей к интенсивному эвтрофированию морской акватории, контролируется Планом Действия по Балтийскому Морю (ПДБМ) ХЕЛКОМ [1]. Для количественной оценки и прогнозирования возможных изменений нагрузки общим фосфором ($P_{общ}$) и общим азотом ($N_{общ}$) в странах ХЕЛКОМ разрабатываются методы и модели, ориентированные на решения задач реализации ПДБМ. Опыт российских специалистов в указанном направлении представлен в настоящей статье.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Основой расчетного метода для оценки поступления биогенных веществ в Балтику с российской части водосбора являются модель формирования биогенной нагрузки *ILLM* – *Institute of Limnology Load Model* (свидетельство о государственной регистрации № 2015614210 от 09.04.2015), разработанная в Институте озераведения РАН [2], а также модель биогенной нагрузки, сформированной сельхозпредприятиями, предложенная специалистами Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства [3]. Обе модели работают с шагом по времени в 1 год, т.к. рекомендации ПДБМ по снижению нагрузки сформулированы именно для среднегодовых значений нагрузки от различных источников.

Согласно принятой в *ILLM* схеме расчета основными составляющими суммарной внешней рассредоточенной биогенной нагрузки на водный объект (L) являются эмиссия биогенных веществ подстилаящей поверхностью водосбора, не подверженной сельскохозяйственному воздействию (L_e), нагрузка, сформированная в результате сельскохозяйственной деятельности (L_{agr}), и атмосферные выпадения (L_a):

$$L = (L_e + L_{agr} + L_a)(1 - R) \quad (1)$$

Рассредоточенная нагрузка на водосбор, сформированная в результате эмиссии химических веществ с различных типов естественных и антропогенных ландшафтов в стекающие дождевые и талые воды L_e может рассчитываться по формуле: $L_e = \sum_i k_{ei} A_i$, где k_{ei} - коэффициент эмиссии

вещества с i -го типа подстилающей поверхности, A_i – площадь i -го типа подстилающей поверхности. Определение значений k_{ei} , зависящих от характеристик ландшафтной структуры водосбора, обычно проводится на основе обобщения и анализа материалов полевых исследований. В табл. 1 приведены значения коэффициентов эмиссии k_{ei} общего фосфора и общего азота для различных типов подстилающей поверхности [4, 5], которые можно использовать при расчетах выноса биогенных веществ с водосборов северо-запада России и Финляндии.

Таблица 1 - Коэффициенты эмиссии k_{ei} $P_{общ}$ и $N_{общ}$ в стоке с различных типов подстилающей поверхности, кг/(км год).

Подстилающая поверхность	Смешанная	Лес	Болото	Пахотные земли	Урбанизированная территория
$P_{общ}$	26	5	0,5	16	57
$N_{общ}$	300	250	350	1500	800

Альтернативным методом расчета рассредоточенной эмиссии биогенных элементов и нагрузки на водосбор L_e с учетом гидрологических характеристик является использование значений концентраций примеси в почвенных водах или первичной ручейковой сети для различных типов поверхности водосбора. В этом случае расчетная зависимость имеет вид: $L_e = \sum_i C_i y_i A_i$, где C_i

– средние концентрации биогенных элементов в стоке с i -ого типа поверхности, y_i – слой стока с рассматриваемых типов подстилающей поверхности. В табл. 2 приведены значения концентраций $P_{общ}$ и $N_{общ}$ и в почвенной воде для различных типов подстилающей поверхности, также полученные по материалам многолетних полевых исследований и в результате обобщения литературных данных [4, 5]. Значение слоя стока y может приниматься в соответствии с результатами натурных измерений, рассчитываться по соответствующим функциям распределения или по известным гидрологическим моделям. Достаточно высокие значения коэффициентов эмиссии или концентраций в стоке с урбанизированных территорий (табл. 1 и 2) представляют вклад рассредоточенного сельского населения, не имеющего подключения к канализационным сетям и очистным сооружениям.

Таблица 2 - Концентрации C_i $P_{общ}$ и $N_{общ}$ в почвенных водах и первичных звеньях гидрографической сети для различных типов подстилающей поверхности, мг/дм³.

Подстилающая поверхность	Смешанная	Лес	Болото	Пахотные земли	Урбанизированная территория
$P_{общ}$	0,12	0,05	0,06	0,08	0,20
$N_{общ}$	1,4	0,7	0,7	3,1	2,3

Особого внимания заслуживает биогенная нагрузка, сформированная на полях сельхозпредприятий [3]. Эмпирическая расчетная формула в этом случае имеет следующий вид:

$$L_{agr} = \sum_{i=1}^{n_1} A_i (M_{soil i} K_1 + (a_1 M_{min i} + a_2 M_{org i}) K_6) K_2 K_3 K_4 K_5 / 1000 \quad , \quad (2)$$

где $M_{soil i}$, $M_{min i}$ и $M_{org i}$ – содержание биогенного вещества в пахотном слое почвы, а также дозы внесения минеральных и органических удобрений на поля i -го сельхозпредприятия, кг/га; A_i - площадь угодий i -го сельхозпредприятия, га; n_1 – количество сельхозпредприятий; a_1 – коэффициент, учитывающий усвоение минеральных удобрений сельхозкультурами; a_2 – коэффициент, учитывающий усвоение органических удобрений сельхозкультурами; K_1 – коэффициент, характеризующий вынос биогенных веществ из пахотного слоя почв; K_2 – коэффициент удалённости контура сельскохозяйственных угодий от гидрографической сети; K_3 – коэффициент, характери-

зующий тип почв (по происхождению); K_4 – коэффициент, характеризующий механический состав почв; K_5 – коэффициент, учитывающий структуру сельхозугодий, т.е. соотношение площадей пашни, многолетних трав, лугов, пастбищ; K_6 – коэффициент, учитывающий использование наилучших доступных технологий (НДТ) применения органических и минеральных удобрений. Все коэффициенты безразмерные, их значения, рекомендованные для использования при расчетах биогенной нагрузки с сельхозугодий северо-запада России, приведены в табл. 3.

Атмосферные выпадения могут рассчитываться с помощью методов математического моделирования атмосферного переноса примесей, разрабатываемых в рамках программы ЕМЕР (<http://www.emep.int>). Однако в реальности всегда имеются неучтенные при моделировании точечные и рассредоточенные источники эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу, которые, возможно, никак не влияют на трансграничный перенос примесей, но существенно воздействуют на конкретный водоем или его водосбор, расположенные в зоне выбросов. Натурное определение атмосферной нагрузки L_a в формуле (1) обычно связано с гидрохимическим анализом проб осадков и последующей интерполяцией или экстраполяцией данных. Так, в исследованиях Института водных проблем Севера РАН для условий Карелии атмосферная нагрузка биогенными веществами в 2013 г. составляла 6,5 кг P / (км²год) и 229.7 кг N / (км²год) [6, 8].

Таблица 3 - Значения коэффициентов уравнения (2) по данным работы [3]

Коэффициент	N	P
α_1	0.3	0.03
α_2	0.1	0.02
K_1	0.03	0.008
K_2 (от 50 до 500м)	0.6	0.6
K_2 (от 500 до 2000м)	0.2	0.2
K_2 (более 2000м)	0.1	0.1
K_3 (дерново-подзолистые почвы)	1.0	1.0
K_3 (карбонатные почвы)	1.2	1.4
K_3 (торфянистые почвы)	0.8	1.0
K_4 (тяжелые глинистые и суглинистые почвы)	1.0	1.0
K_4 (легкие супесчаные и песчаные почвы)	1.8	2.0
K_5 (крупный рогатый скот)	0.46	0.37
K_5 (растениеводство)	0.88	0.76
K_5 (птицеводство)	0.46	0.37
K_5 (свиноводство)	0.46	0.37
K_6 (без НДТ)	1.0	1.0
K_6 (с использованием НДТ)	0.25	0.1

Как правило, большая часть биогенных веществ, поступивших на водосбор от различных источников, не достигает замыкающих створов крупных рек, так как удерживается водосбором и различными звеньями гидрографической сети. В результате итоговая нагрузка на водный объект составляет лишь часть поступления биогенных веществ на водосбор. Для расчета коэффициента удержания R в формуле (1) используется следующая эмпирическая формула [7]: $R = 1 - (1/(1 + aq^b))$, где q – модуль стока, a и b – безразмерные эмпирические параметры.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ

Существенные проблемы при расчетах выноса биогенных веществ с крупных водосборов и нагрузки на водные объекты возникают в связи с необходимостью достоверного определения современных значений площадей различных типов поверхности водосбора. В этом случае оказывается востребованной информация спутниковой съемки земной поверхности. В качестве примера можно привести результаты исследований по оценке рассредоточенной биогенной нагрузки на Онежское озеро, выполненные Институтом озераведения РАН совместно с Институтом водных проблем Севера РАН [6, 8].

Онежское озеро - второй по величине пресноводный водоём Европы. Площадь озера составляет 9720 км², площадь водосбора - 53100 км² [6]. Водосбор Онежского озера является частью водо-

сбора Финского залива Балтийского моря, улучшению экологического состояния которого в настоящее время уделяется большое внимание [1].

Для оценки различных типов площадей поверхности водосбора применялись данные космической съемки космического аппарата Landsat-8 Геологической службы США (USGS - United States Geological Survey, <http://earthexplorer.usgs.gov>), находящиеся в режиме свободного доступа. Идентификация различных типов подстилающей поверхности водосбора Онежского озера проведена в основном по снимкам 30-метрового пространственного разрешения для рассматриваемого водосбора в период малооблачной погоды 2015-2017гг. Дешифрировались снимки, сделанные 08-08-2015, 06-05-2016, 14-06-2016, 31-05-2016, 28-08-2016, и 02-05-2017 г. Использовался метод автоматической классификации при помощи программного комплекса ERDAS Imagine Professional, позволяющего отнести изображенные на снимке пиксели к определенному классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих эти объекты. В том числе учитывались данные о распределении нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) [9]. Результаты идентификации различных типов подстилающей поверхности для водосбора Онежского озера представлены на рис.1.

В табл. 4 приведено сравнение результатов расчета биогенной нагрузки, как по модели, так и по данным натуральных наблюдений Института водных проблем Севера, осредненным за период наблюдений (2007-2014 гг.). Удовлетворительное соответствие является подтверждением достоверности оценок обоими методами [8].

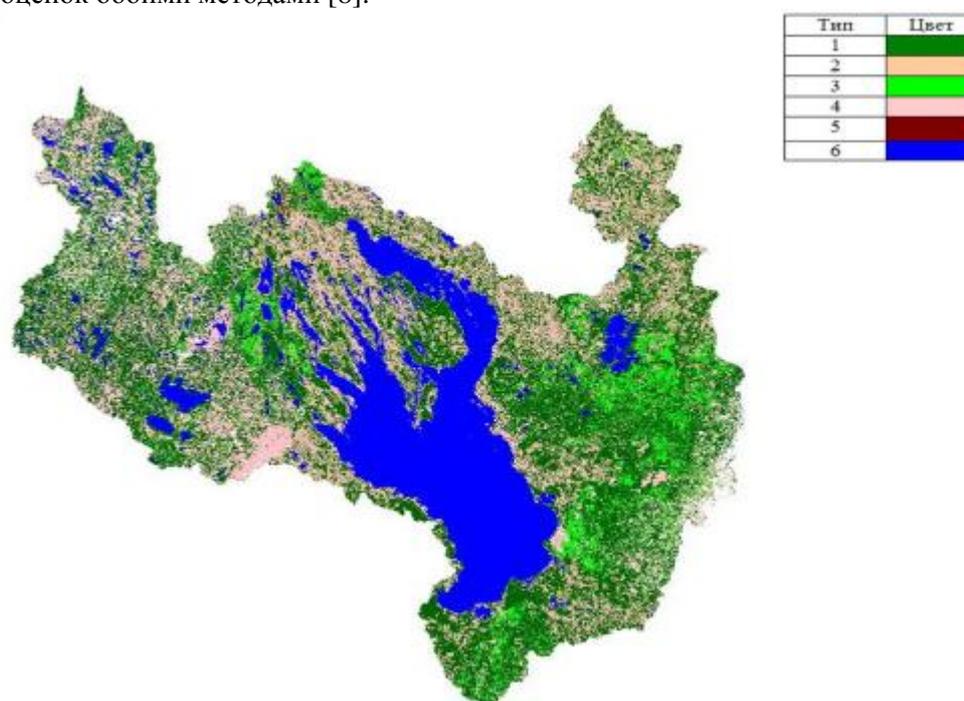


Рисунок 1 – Результаты идентификации типов подстилающей поверхности водосбора Онежского озера, Landsat-8, Terra/MODIS, 2014-2015гг. (1 - лес; 2 – поле; 3 –луг; 4 – болото; 5 – урбанизированные территории, свалки и заброшенные земли; 6 – вода)

Таблица 4 - Сравнение результатов моделирования нагрузки с данными натуральных наблюдений [8]

Рассредоточенная нагрузка, сформированная на водосборе	$P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}$
рассчитанная по модели (т/год)	669	11981
рассчитанная по данным натуральных наблюдений (т/год)	645	12029

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана достаточно простая расчетная схема среднегодовых значений рассредоточенной биогенной нагрузки на водные объекты северо-запада России.
2. В качестве источника достоверных значений площадей различных типов поверхности водосбора, необходимых для выполнения расчетов нагрузки, могут служить спутниковые снимки.

3. Основным направлением совершенствования предложенной расчетной схемы является проведение натурных исследований по детальной оценке параметров эмиссии биогенных элементов в сток на различных типах природных и антропогенных территориальных комплексов, т.е. переход к полноценной ландшафтной оценке биогенной нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] HELCOM Baltic Sea Action Plan. 2007. Helsinki Commission Publ. Helsinki, 103 p.
- [2] Кондратьев С.А., Казмина М.В., Шмакова М.В., Маркова Е.Г. 2011. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты. Региональная экология, 3-4, с.50-59
- [3] Брюханов А.Ю., Кондратьев С.А., Обломкова Н.С., Огуздин А.С., Субботин И.А. 2016. Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты. Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства, № 89, с.175-183.
- [4] Алябина Г.А., Сорокин И.Н. 2001. Особенности формирования внешней нагрузки на водные объекты в урбанизированных ландшафтах. Изв. РГО, 133 (1), с. 81- 87.
- [5] Rekolainen S. 1989. Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland. Aqua Fennica, 19 (2), p. 95 –107.
- [6] Лозовик П.А., Бородулина Г.С., Карпечко Ю.В., Кондратьев С.А., Литвиненко А.В., Литвинова И.А. 2016. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений. Труды Карельского научного центра, №5 Лимнология, с.35-52
- [7] Behrendt H., Dannowski R. (eds.) 2005. Nutrients and heavy metals in the Odra River system: emissions from point and diffuse sources, their loads, and scenario calculations on possible changes. Weisensee Verlag, Berlin, Germany, 353 p.
- [8] Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Маркова Е.Г., Лозовик П.А., Брюханов А.Ю., Чичкова Е.Ф. 2016. Биогенная нагрузка на Онежское озеро от рассеянных источников по результатам математического моделирования. Изв. РГО, 148 (5), с. 53-63.
- [9] Чичкова Е.Ф., Кондратьев С.А., Рыжиков Д.М., Тимофеев А.С., Шмакова М.В. 2016. Идентификация типов подстилающей поверхности по данным спутниковой съемки Landsat с целью оценки биогенной нагрузки на Финский залив. Ученые записки РГГМУ, № 43, с. 246-254.

Глава III/61: МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СТОКА ГОРНЫХ РЕК Chapter III/61: Modeling the Hydro-Chemical Discharge of Mountain Rivers

Юрий Б. Кирста*^{1,2}; Александр В. Пузанов¹

DOI 10.25680/6074.2018.63.26.254

*Эл. Почта: kirsta@iwep.ru

1. Институт водных и экологических проблем СО РАН, ул. Молодежная 1, 656038 Барнаул, Россия

2. Алтайский государственный политехнический университет, пр. Ленина 46, 656038 Барнаул, Россия

РЕЗЮМЕ. На примере 34 средних и малых рек Алтае-Саянской горной страны разработаны универсальные математические модели сезонной и многолетней динамики их водного и гидрохимического стоков. Для этого использованы системно-аналитическое моделирование и решение обратной математической задачи. Входными факторами моделей являются пространственно обобщенные по стране месячные осадки и среднемесячные температуры воздуха, а также картографическая информация о площади и средней высоте ландшафтов в речных бассейнах, высоте замыкающих речных створов, длине речных русел, площади пашни. Рассчитаны водный и 7 гидрохимических стоков (трех минеральных форм азота NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , фосфатов PO_4^{3-} , общего растворенного железа, минерализации вод, взвешенных веществ) для каждого из 13 выделенных типов ландшафтов и речных бассейнов. Определена чувствительность стоков к вариациям природных факторов. Характеризующий модели критерий Нэша-Сатклиффа $\text{NSE} > 0.65$ отвечает их хорошему и очень хорошему качеству. Модели позволяют также прогнозировать посезонную динамику рассмотренных стоков для любых речных бассейнов.

Abstract. Based on the example of 34 mid-size and small rivers of the Altai-Sayan mountain country, universal mathematical models for seasonal and long-term dynamics of their water and hydro-chemical discharges was developed. For this we used the system-analytical modeling and the solution of mathematical inverse problem. The input factors of the models are spatially generalized for the country monthly precipitation and mean monthly air temperature, as well as the cartographic information on the area and average altitude of individual landscapes in river basins, the altitude of the outlets, the length of river channels, and the area of arable land. The water and 7 hydro-chemical discharges (three nitrogen mineral forms NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , phosphates PO_4^{3-} , ions, total dissolved iron, suspended matter) were calculated for each of 13 specified landscape types and river basins. The sensitivity of discharges to variations of environmental factors is evaluated. The Nash-Sutcliffe efficiency $\text{NSE} > 0.65$ estimated for the models represents their good and very good performance. The models also allow to forecast the seasonal dynamics of discharges for any river basins.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: горные реки, системно-аналитическое моделирование, сток, гидрохимический сток, ландшафты, прогноз, Алтай-Саяны

Keywords: mountain rivers, system-analytical modeling, water discharge, hydro-chemical discharge, landscapes, forecast, Altai-Sayan

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблем мониторинга и рационального использования водных ресурсов в современных условиях требует разработки адекватных математических моделей, количественно характеризующих качество этих ресурсов. Водный и гидрохимический стоки рек являются их важнейшими характеристиками, определяющими питьевое и хозяйственное водоснабжение населения. Эти стоки заметно отличаются для разных ландшафтно-климатических зон, так как зависят от климата, идущих в водосборных бассейнах биогеохимических процессов, атмосферного переноса и выпадения химических веществ, антропогенных факторов. Анализ закономерностей формирования стоков особенно трудоемок для горных территорий из-за их сложного гидрогеологического строения, разнообразного почвенно-растительного покрова, пестрой пространственно-временной структуры климатических полей, а также больших материальных затрат на экспериментальные исследования таких закономерностей. Поэтому здесь крайне затруднена количественная оценка влияния на стоки различных факторов среды. Решение этой сложной задачи выполняется через создание имитационных балансовых моделей, учитывающих формирование как водного, так и гидрохимического стока в отдельных ландшафтах на водосборных территориях. Нами используется хорошо зарекомендовавшее себя системно-аналитическое моделирование (САМ) с привлечением ГИС-технологий [1, 2].

ЦЕЛЬ МЕТОДА

1. Разработанные высокоадекватные математические модели водного и гидрохимического стоков рек должны применяться при экологическом и водно-ресурсном мониторинге с выполнением долгосрочных прогнозов и управлением возникающими рисками. Например, прогноз водного стока важен для регуляции попусков воды из водохранилищ горных ГЭС в период весенне-летнего половодья, когда в водохранилища поступает основной объем годового стока. Очевидно, что подобные модели требуют корректного учета всех влияющих на стоки факторов среды, которые в условиях гор значительно меняются в пространстве и времени. Решение этой задачи должно опираться на системно-аналитическое моделирование сложноорганизованных природных систем, ГИС-технологии и установленные закономерности динамики метеорологических полей в горах [3].

2. При математическом моделировании сложноорганизованных природных систем (гидрологических, гидрохимических и др.) большое значение имеют оценка чувствительности процессов к вариациям входных факторов и погрешность моделей. Обзор различных методов оценки чувствительности можно найти, например, в [4]. Погрешность расчетов тесно связана с чувствительностью [5] и важна для прикладного использования моделей. Таким образом, необходима адекватная оценка как чувствительности моделируемых стоков к вариациям факторов среды, так и погрешности расчетов. При этом модели должны обеспечить значительно меньшее расхождение между прогнозными и фактическими значениями водного и гидрохимического стоков чем при тривиальном прогнозе по их среднему значению.

3. Для водосборных бассейнов горных рек необходимо выделить эволюционно сложившиеся территориальные круговороты химических элементов, которым отвечают природно сформированные

ландшафты этих бассейнов. Это позволит наиболее адекватно учесть формирование водного и гидрохимического стоков.

4. Для успешного проведения экологического и водно-ресурсного мониторинга необходимы количественные и прогнозные оценки по важнейшим характеристикам речных стоков. Выбраны следующие 7 компонентов гидрохимического стока: три минеральные формы азота NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , фосфаты PO_4^{3-} , общее растворенное железо, минерализация вод, взвешенные вещества. Все компоненты должны оцениваться как для каждого ландшафта, так и для речного бассейна в целом.

ПРИНЦИП И ПРОЦЕДУРА

Основой САМ является определение структуры и параметров имитационных моделей водного и гидрохимического стоков путем решения обратной математической задачи оптимизационными методами. Модели представляют собой системы балансовых уравнений, решаемых в программной среде MATLAB, и дают проверяемое описание основных физических, гидрологических и гидрохимических процессов, формирующих эти стоки.

При разработке моделей использованы данные Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России о водном стоке (~5000 значений) и соответствующим компонентам гидрохимического стока (~10000) по 34 речным бассейнам Алтае-Саянской горной страны. Площадь водосборных бассейнов составляла от 177 до 21000 км², при высоте гор до 4500 метров. В качестве входных факторов взяты месячные осадки и среднемесячные температуры воздуха (11 реперных метеостанций), данные о ландшафтной структуре бассейнов, площади и высоте расположения ландшафтов (выделено 13 типов ландшафтов [6]), площади пашни и другие картографические характеристики. Весь картографический материал обрабатывался в программной среде ArcGIS 9.2 с модулем 3D Analyst.

С помощью САМ осуществлен поиск и количественная оценка функциональных связей стоков с метеорологическими факторами, морфометрией и ландшафтной структурой речных бассейнов. В моделях использованы алгебраические уравнения, поскольку применение дифференциальных уравнений для описания гидрологических и гидрохимических процессов в условиях гор нецелесообразно [7]. Определение характера функциональных связей между процессами и факторами выполнено через гидрологически и гидрохимически обоснованные подбор и корректировку уравнений для минимизации расхождений (квадратичной невязки) между рассчитываемыми и наблюдаемыми динамическими характеристиками. Для этого в среде MATLAB создан комплекс программ, обеспечивающий выбраковку недостоверных экспериментальных данных и идентификацию до 100 параметров проверяемых моделей путем решения обратной задачи для систем до 1500 уравнений.

Для Алтае-Саянской горной страны был осуществлен пространственно-временной анализ ее метеорологических полей [3]. Внутригодовая и многолетняя динамика месячных осадков и среднемесячных температур воздуха оказалась единообразной по всей территории при нормировке осадков на их среднемноголетнее значение за июль «in situ», а температур – на их среднемноголетнее значение за январь (для X-IV месяцев) и июль (для V-IX) «in situ». Такие пространственно обобщенные нормированные характеристики не зависели от координат или высоты над уровнем моря, были одинаковы для всех речных бассейнов и применены в расчетах всех стоков.

С учетом внутригодовых особенностей водного и гидрохимического стоков выделены 4 гидрологических периода/сезона: первый (зимняя межень, XII-III месяцы), второй (весенне-летнее половодье, IV-VI), третий (летняя межень, VII-VIII), четвертый (осенняя межень с возможными паводками при сильных дождях, IX-XI). Наблюдения за стоками были нерегулярны, и их данные усреднены по отдельным сезонам каждого года для каждого бассейна.

Для адекватной количественной оценки функциональных связей стоков с факторами среды применена пробная функция H , задаваемая выражением:

$$H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X) = \begin{cases} Y1 + Z1(X - X1), & \text{если } X < X1 \\ \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}(X - X1) + Y1, & \text{если } \begin{cases} X1 \leq X < X2 \\ X1 \neq X2 \end{cases} \\ Y2 + Z2(X - X2), & \text{если } X \geq X2 \end{cases}, \quad (1)$$

где $X1$, $X2$, $Y1$, $Y2$, $Z1$, $Z2$ – параметры, определяемые в процессе решения обратной задачи; X – какая-либо переменная модели. Функция H является непрерывной кусочно-линейной функцией из трех произвольных линейных фрагментов и позволяет аппроксимировать широкий спектр различных зависимостей между переменными и факторами путем изменения значений своих параметров (рисунок 1).

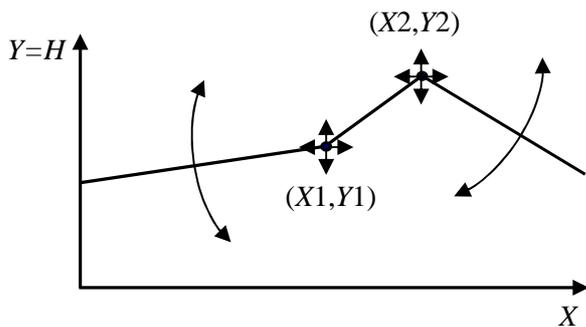


Рисунок 1 – Непрерывная кусочно-линейная функция $Y=H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X)$ с изменяемыми параметрами, состоящая из трех линейных фрагментов (см. уравнение (1)).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Модель водного стока представлена балансовым уравнением, учитывающим осадки, температуры воздуха, площадь и высоту ландшафтов:

$$Q^i = \sum_k \{a_k S_k^i P_1 H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, T_1) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, h_k^i)\} + \sum_k \{b_k S_k^i P_2 H(c_7, c_7, 1, 1, c_8, c_9, T_2) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, h_k^i)\} + c_{10} \quad (2)$$

где Q^i – нормированный на среднегодовое значение сезонный сток для замыкающего створа бассейна i , $i=1, 2, \dots, 34$; первое и второе слагаемые уравнения отвечают вкладам предшествующего и текущего гидрологического сезона соответственно, а при расчете 1-го сезона (зимняя межень) отвечают 3- и 4-му сезонам предшествующего года; a_k, b_k – параметры, характеризующие вклад в k -го ландшафта, $k=1-13$; S_k^i, h_k^i – относительная площадь и высота k -го ландшафта в бассейне i ; c_1-c_9 – параметры, отражающие влияние температур T_1, T_2 и высоты h_k^i ; P_1, P_2 – нормированные месячные осадки в среднем за сезон; T_1, T_2 – отклонения нормированных температур от 1 в среднем за сезон; c_{10} – параметр для постоянного пополнения ($c_{10}>0$) или потерь ($c_{10}<0$) стока в грунтовые воды и воды зон трещиноватых пород (подземный сток); H – кусочно-линейная функция (1). Все параметры уравнения (2) определены по имеющимся 1300 наблюдаемым значениям стока за соответствующий гидрологический сезон.

Модели гидрохимического стока представлены двумя уравнениями, учитывающими рассчитанные по (2) водные стоки, осадки, поперечный уклон бассейна, площадь пашни:

для 1-го гидрологического сезона (зимняя межень) –

$$HR^i = \sum_k \{a_k Q_k^i H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, P) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, K^i)\} + b q^i + d S^i Q^i, \quad (3a)$$

для остальных сезонов –

$$HR^i = \sum_k \{a_k Q_k^i H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, P) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, K^i)\} + b q^i + d \sqrt{S^i} Q^i, \quad (3b)$$

где HR^i – сток соответствующего компонента гидрохимического стока; P – среднесезонные нормированные месячные осадки (за предыдущие IX-XI мес. для 1-го сезона или за IV-VI, VII-VIII, IX-XI мес. для 2,3,4-го сезонов); Q_k^i – расчетный водный сток с k -го ландшафта бассейна i , $k=1-13$, $i=1-34$; a_k – параметры, соответствующие постоянной среднесезонной концентрации вещества в расчетном водном стоке k -го ландшафта; K^i – средний поперечный уклон бассейна i , рассчитываемый как тангенс угла наклона склонов относительно горизонтали [8]; c_1-c_6 – параметры, отражающие влияние на сток вещества осадков P и уклона K^i ; b – параметр, характеризующий сезонную концентрацию соответствующего вещества в расчетном приходящем (или уходящем) сезонном подземном водном стоке q^i бассейна i ; S^i – относительная площадь (доля) пахотных земель в бассейне i ; d – параметр, характеризующий зависимость концентрации вещества от площади S^i в расчетном водном стоке Q^i бассейна i .

Каждое исследуемое вещество в конкретном сезоне характеризуется своими значениями параметров. Все параметры найдены путем решения обратной задачи для систем (3a) или (3b) из 1200-1500 уравнений, характеризующих сезонные стоки исследуемого вещества за отдельные годы с каждого речного бассейна.

Таблица 1 – Чувствительность водного и гидрохимического стоков горных рек к вариациям факторов среды

Фактор среды	Чувствительность компонентов гидрохимического стока для 1/ 2/ 3/ 4-го гидрологических сезонов, %*							
	Водный сток	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	Ионы	Fe	Взвешенное вещество
Ландшафтная структура речных бассейнов	4	52	22	41	>100	8	12	98
	6	9	19	3	52	4	33	13
	11	88	46	55	55	7	64	21
	4	19	31	9	48	6	69	12
Высота ландшафтов	0.3							
	0.2	–	–	–	–	–	–	–
	~0							
	0.6							
Крутизна склонов бассейнов		6	14	9	15	18	10	5
		5	9	2	14	5	4	3
	–	2	0.5	9	5	7	6	0.8
		10	15	19	7	2	9	2
Осадки	17	5	1	3	9	2	11	5
	22	0.3	1	2	0	1	0	2
	16	3	0.4	6	5	6	6	2
	34	5	1	11	16	6	8	5
Температура	6							
	16	–	–	–	–	–	–	–
	6							
	4							
Площадь пахотных земель		4	2	0.1	4	12	0	1
		5	0	5	16	33	21	20
	–	0.3	0	0	16	7	0	9
		3	0	0	16	9	0	4

* Выражается в процентах от дисперсии, характеризующей наблюдаемые значения водного или соответствующего компонента гидрохимического стока.

ВЫВОДЫ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДА

Модели водного и гидрохимического стоков (2), (3а), (3б) позволяют рассчитать сток каждого вещества с отдельных ландшафтов и пашни, его общий сток с речного бассейна и его концентрацию в водном стоке реки. Полученный для моделей критерий Нэша-Сатклиффа $NSE > 0.65$ отвечает их хорошему и очень хорошему качеству [9]. Рассчитанная по разработанной методике [10] чувствительность моделей к факторам среды приведена в таблице 1. Модели также обеспечивают прогноз всех стоков на следующий гидрологический сезон путем подстановки в (2), (3а), (3б) среднесезонных значений метеорологических факторов этого сезона вместо фактических. При этом стоки предсказываются за 3-4 месяца вперед с вдвое уменьшенной дисперсией невязки между их рассчитанными и наблюдаемыми значениями по сравнению с невязкой прогноза, использующего их среднесезонную характеристику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный комплекс моделей позволяет проводить мониторинг и прогнозировать сезонную и многолетнюю динамику водного режима и режима качества речных вод для произвольно выбранного речного бассейна Алтае-Саянской горной страны.

1. Для идентификации моделей требуются лишь цифровая картографическая информация о ландшафтной структуре бассейна, данные о среднемесячных температурах воздуха и месячных осадках, а также 1-2 года наблюдений за характеризующим стоком.
2. Модели могут использоваться для любой горной территории после ее ландшафтной типизации с новой оценкой параметров через решение обратной задачи в рамках САМ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Kirsta, Yu. B. System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil-moisture exchange in agroecosystems // Ecol. Modelling, 2006, 191, 315-330.
- [2]Кирста, Ю. Б., Кирста, Б. Ю. Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем. Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2014.
- [3]Кирста, Ю.Б. Пространственное обобщение климатических характеристик для горных территорий // Мир науки, культуры, образования, 2011, 3(28), 330-337.
- [4]Iooss, B., Lemaître, P. A review on global sensitivity analysis methods. In: Uncertainty management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications, C. Meloni and G. Dellino (Eds.). Springer US, 2015.
- [5]Beven, K., Hall, J. Applied Uncertainty Analysis for Flood Risk Management. Imperial College Press, London, 2013.
- [6]Кирста, Ю.Б., Лубенец, Л.Ф., Черных, Д.В. Типизация ландшафтов для оценки речного стока в Алтае-Саянской горной стране // Устойчивое развитие горных территорий, 2011, 2(8), 51-56.
- [7]Кирста, Ю.Б., Пузанов, А.В., Ловцкая, О.В., Лубенец, Л.Ф., Кузнецкий, Я.Э., Пахотнова, А.Ю. Имитационная математическая модель стока средних и малых рек для горных территорий // Известия Самарского научного центра РАН, 2012, 14, 2334-2342.
- [8]Кирста, Ю.Б., Пузанов, А.В. Моделирование гидрохимического стока горных рек: 1. Модель стока фосфатов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2016, 6(140), 78-84.
- [9]Koch, M., Cherie, N. SWAT-modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the upper blue Nile river basin, Ethiopia. In: Proceedings of the Sixth International Conference on Water Resources and Environment Research, ICWRER 2013. Germany, 2013, 428-523.
- [10]Кирста, Ю.Б. Моделирование гидрохимического стока горных рек: 2. Оценка качества модели стока фосфатов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2016, 6 (140), 85-91.

Chapter III/62: MODELLING THE IMPACT OF FOREST CONVERSION ON GROUNDWATER RECHARGE UNDER A CHANGING CLIMATE

Глава III/62: Моделирование влияния конверсии лесов на питание подземных вод в условиях изменяющегося климата

Marco Natkhin^{*1}, Jörg Steidl², Ottfried Dietrich², Gunnar Lischeid^{2,3}

DOI 10.25680/9746.2018.54.92.255

*Email: natkhin@gmx.de

- 1.Thünen Institute of Forest Ecosystems, Alfred-Möller-Str. 1 H.41/42, 16225 Eberswalde, Germany
- 2.Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg, Germany
- 3.Institute of Earth and Environmental Science, University of Potsdam, Karl-Liebknecht-Str. 24–25, 14476 Potsdam-Golm, Germany

ABSTRACT. Groundwater recharge is an important factor for the landscape water balance. In forested catchments groundwater recharge is controlled by complex interactions between climate, soil and vegetation. In this paper we analysed the impact of forest management and climate change on groundwater recharge in a small forested lowland catchment in Germany. We used the water balance model WaSim-ETH with different forest development and climate change scenarios to distinguish between the impact of vegetation and climate on the groundwater recharge. The climate change scenario results show a decrease in groundwater recharge by 26% (REMO-B1) and 44% (REMO-A1B). Depending on the amount of conversion, the forest conversion from coniferous trees to broadleaf trees increases the groundwater recharge. Thus, the forest conversion helps to attenuate the impact of climate change to groundwater recharge.

Резюме. Питание подземных вод является важным фактором для водного баланса ландшафтов. В лесных водосборах питание подземных вод контролируется сложными взаимодействиями между климатом, почвой и растительностью. В этой статье анализируется влияние управления лесным хозяйством и влияние изменения климата на питание подземных вод в небольшом равнинном лесном водосборе в Германии. Для того, чтобы отделить влияние климата от влияния растительности на питание подземных вод использовались модель водного баланса WaSim-ETH и различные сценарии изменения климата и развития леса. Результаты сценариев изменения климата показали уменьшение величины питания подземных вод на 26% (сценарий REMO-B1) и на 44% (сценарий REMO-A1B). Конверсия лесов из хвойных в широколиственные повышает величину питания подземных вод, повышение зависит от объёма конверсии. Таким образом, конверсия лесов помогает смягчить влияние изменения климата на питание подземных вод.

KEYWORDS: land cover and land use change, forest management, climate scenarios, groundwater recharge, WaSim-ETH

Ключевые слова: Изменение растительного покрова/землепользования, управление лесным хозяйством, климатические сценарии, питание подземных вод, WaSim-ETH

INTRODUCTION

Currently, forest landscapes in North-East Germany are mostly dominated by pine monocultures. In the eastern parts of this region, the mean annual precipitation is low with about 600 mm. In addition, the predominant sandy soils have a low water storage capacity. Among these pine forests only a very small groundwater recharge occurs. The already limited groundwater recharge was significantly reduced by 113 mm/yr from 1958 to 2007 due to change in climate and conversions of the forest structure [1] with considerable consequences for the groundwater- and lake level.

Currently the regional forest administrations organized the expansion of the share of broad-leaved trees among mixed deciduous forest in future [2]. With a change of pine-dominated silviculture to broad-leaved species, long-term changes in groundwater recharge are expected. Because the long-term nature of a forest conversion, such a conversion and in consequence the groundwater recharge can be affected by changes in climate. Relevant climate projections suggest an increase of water scarcity for this region up to the year 2100 [3].

Many studies observed the influence of land use changes on the water balance of catchments. The most paired catchment studies analyse the impact of clear-cut or pronounced conversions from forest to agriculture [4]. Only a few consider actual forest conversions with their dynamic aspects.

In this paper, we analyse the impact of forest conversion on groundwater recharge in a lowland catchment of North-East Germany. We use a model-based approach with two forest conversion scenarios, which are based on realistic conditions, as they consider stand age of trees, economic rotation time and good silvicultural practice, as well as soil and climate conditions. Due to the long periods of the forest conversion, our approach takes into account the interactions with possible climatic changes. We quantified how the impacts of forest and climate amplify or attenuate each other.

MATERIAL AND METHODS

The study area is located in North-East Germany, about 50 km northeast of Berlin. Its hydrologic conditions and the hydrogeology are detailed in [1] and [5] respectively. Predominant soils are sandy Cambisols, in part clayey and Cambisol/Podsols. Forests are dominated by a pine monoculture (*Pinus sylvestris*) [1]. The climate is characterized by a long-term (1958–2007) mean precipitation of 529 mm/yr, a mean air temperature of 8.6 °C and a mean grass reference evapotranspiration after Penman-Monteith of about 570 mm/yr (at Angermünde, about 10 km southeast of the study area).

The future developments of groundwater recharge and water levels are governed by changes in climatic boundary conditions and a transition from pine monoculture to broad-leaved trees. The physically based and fully distributed water balance model WaSiM-ETH was used to investigate the impact of possible changes on the hydrologic cycle of the catchment. The used catchment model was build up, tested and successfully used to analyse changes in the past as presented in [1]. The combination of different forest development scenarios and climate scenarios was used to distinguish individual effects.

Possible developments of the water balance were simulated under the influence of climate change and forest conversion until 2100. The regionalised climate scenarios of the REMO-model A1B and B1 were used as climatic boundary conditions [6, 7]. Bias correction after [8] minimized systematic errors in the scenarios. Therefore observed time series for the control period 1951–2000 where compared with the

REMO-C20 climate data [9]. Differences in amount and frequency were used to adapt the future climate scenarios.

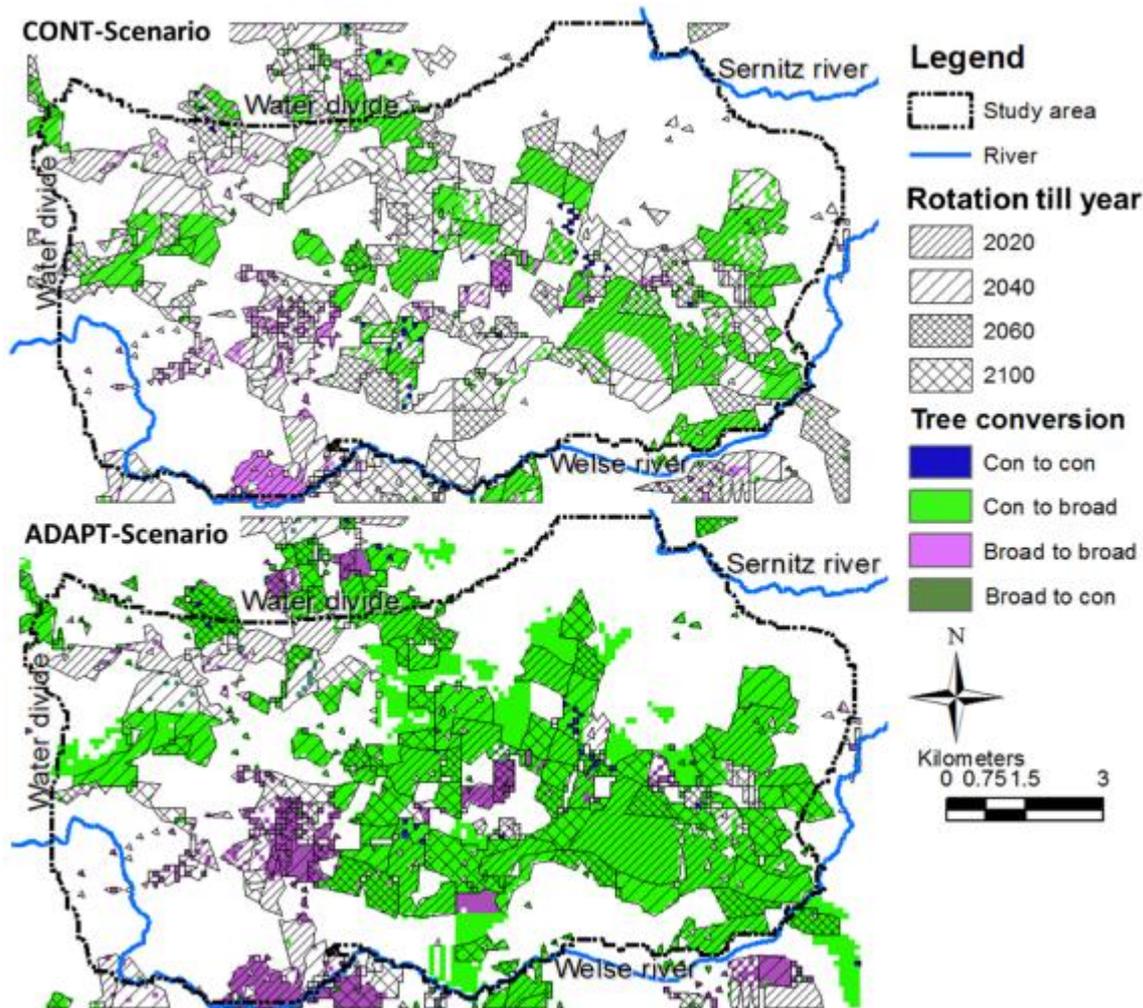


Figure 1 - Map of forest conversion and times of harvest cuts for the two forest development scenarios ADAPT and CONT.

Two forest conversion scenarios, developed by [10] within the BMBF Research Project NEWAL-NET, were chosen as a basis for this study. Both scenarios are based on the observed forest status of the year 2006. They include five development states in 20-year-intervals starting 2020. One of these scenarios is the sustainable forest development, adapted to currently discussed climate change scenarios (ADAPT). The second forest scenario (CONT) delineates the continuous development following actual administrative rules. Both scenarios include a development from coniferous trees to broadleaf trees. But the conversion of forested area is in the ADAPT scenario much stronger than in the CONT scenario, 57% and 23% respectively. After the first 20-year period trees are cut at about 30% of forest areas in both scenarios. In the next 20-year periods the cutting areas are smaller at about 15% of forested area.

Besides the two development scenarios ADAPT and CONT, a third scenario assumes that the forest stand structure remains unchanged since the reference year 2006 (STAT). Thus, changes in groundwater recharge over time will be induced only by climate change.

RESULTS AND DISCUSSION

Bias correction of climate scenarios. The precipitation in the control period (1951–2000) was 11% overestimated in the REMO-C20 (Tab. 1). The bias correction leads to a reduction of mean precipitation for the climate scenarios. The daily air temperature was in the REMO-C20 in average also higher than the observed one. In contrary relative humidity and sunshine duration were underestimated in the REMO-C20. Mean wind speed was well mapped. The differences between REMO-C20 and observed values underline the importance for bias correction as a first step using climate scenarios.

Table 1. Comparison of observed and modelled meteorological data (control period 1951 – 2000) and original and bias-corrected meteorological data (years 2001 – 2100) of REMO scenarios A1B and B1 in the study area

	REMO 20C	Obs.	A1B original	A1B bias corrected	B1 original	B1 bias corrected
Annual precipitation in mm · yr ⁻¹	678	609	689	617	719	646
Mean daily air temperature in °C	9.0	8.3	10.8	10.3	10.3	9.8
Mean relative air humidity in %	70	79	65	76	66	77
Mean relative sunshine duration in %	32	36	33	34	34	35
Mean Wind speed in m · s ⁻¹	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

Climate impact without forest conversion – STAT-scenario. With the assumption of a stationary forest vegetation over the whole modelling time the modelled mean groundwater recharge under the forest area decreases from 91 mm/yr (1958 - 2007) to 48 mm/yr and 65 mm/yr with REMO-A1B and REMO-B1 respectively (2008 - 2100). Only in the forests far from the groundwater table the evapotranspiration does not increase due to limited soil water storage, but the water stress during summer increases. Using the regionalised climate change scenarios, evaporation from lake surface increases more than 100 mm/yr, and a similar situation occurs in sufficiently water supplied wetlands.

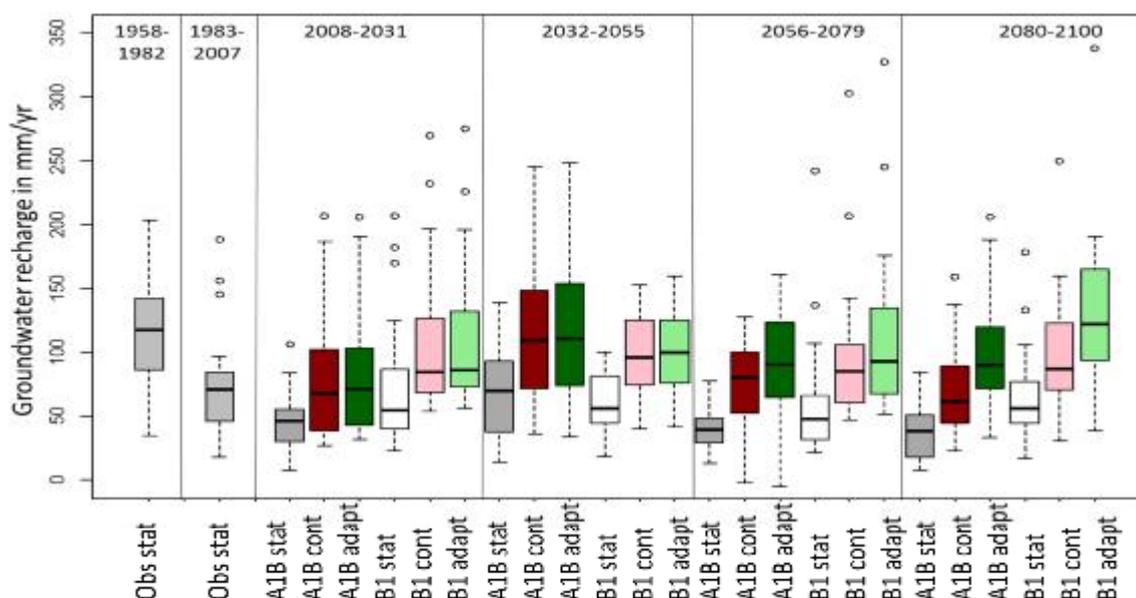


Figure 2 - Groundwater recharge of land use scenarios (STAT, CONT, ADAPT) and climate scenarios (A1B, B1) scenarios ADAPT and CONT.

Impact of forest conversion. A forest conversion can have positive effects on groundwater recharge. The scenario CONT, which corresponds to the actual administrative rules for forest conversion, has already provided a 36 mm/yr higher groundwater recharge under the forest area as the scenario STAT with the stationary forest vegetation. The scenario ADAPT with an adaptable forest conversion has, compared to the scenario CONT, in average a 20 mm/yr and 45 mm/yr higher groundwater recharge after 2080 in the climate scenarios A1B and B1 respectively.

CONCLUSIONS

1. With the help of modelling we can distinguish between the impact of climate and vegetation changes on the groundwater recharge.
2. Climate change described by scenarios will decrease the groundwater recharge in the study area if no forest conversion was carried out.
3. An adapted forest conversion can stabilize the groundwater recharge.

REFERENCES

- [1]Natkhin, M., et al. 2012. Differentiating between climate effects and forest growth dynamics effects on decreasing groundwater recharge in a lowland region in Northeast Germany. *Journal of Hydrology*. 448: p. 245-254.
- [2]Anders, S., et al. 2005, BMBF-Forschungsverbund "Zukunftsorientierte Waldwirtschaft": Ökologischer Waldumbau im nordostdeutschen Tiefland. Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg: Potsdam.
- [3]Lischeid, G. and M. Natkhin. 2011 The potential of land use change to mitigate water scarcity in Northeast Germany: a review. *Die Erde*. 142(1-2): p. 1-18.
- [4]Brown, A.E., et al.2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*. 310(1-4): p. 28-61.
- [5]Lischeid, G., et al. 2010. Assessing coupling between lakes and layered aquifers in a complex Pleistocene landscape based on water level dynamics. *Advances in Water Resources*, 2010. 33(SI): p. 1331-1339.
- [6]Jacob, D. 2005. REMO B1 Scenario Run, UBA Project, 0.088 Degree Resolution, Run No. 006212, 1H Data. CERA-DB "REMO_UBA_A1B_1_R006212_1H".
- [7]Jacob, D. 2005. REMO A1B Scenario Run, UBA Project, 0.088 Degree Resolution, Run No. 006211, 1H Data. CERA-DB "REMO_UBA_A1B_1_R006211_1H".
- [8]Piani, C., et al. 2008. Practical methodologies to correct biases in climate model output, and to quantify and handle resulting uncertainties in estimates of future components of the global water cycle.
- [9]Jacob, D. 2005. REMO Climate of the 20th Century Run, UBA Project, 0.088 Degree Resolution, Run No. 006210, 1H Data. CERA-DB "REMO_UBA_C20_1_R006210_1H".
- [10]Jenssen, M. 2009. Realization of the model of climate-adaptive forests in forest practice of the Northeast German lowlands. *Forst und Holz*. 64(10): p. 18-21.

Chapter III/63: MODELLING FRESHWATER HABITATS AND THEIR MACROINVERTEBRATE COMMUNITIES

Глава III/63: Моделирование пресноводных сред обитания и их макробеспозвоночных сообществ

Jens Kiesel^{*1,2}, Daniel Hering³, Maria Ceylan⁴, Mathias Kuemmerlen⁵, Sonja Jähnig¹, Britta Schmalz⁶, Nicola Fohrer²

DOI 10.25680/5045.2018.95.10.256

*Email: kiesel@igb-berlin.de

1. Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries (IGB), Dep. of Ecosystem Research, Germany

2. Christian-Albrechts-University Kiel, Department of Hydrology and Water Resources Management, Germany

3. University of Duisburg-Essen, Faculty of Biology, Aquatic Ecology, Germany

4. Senckenberg Research Institute, Department of River Ecology and Conservation, Germany

5. EAWAG, Department Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling, Switzerland

6. Technische Universität Darmstadt, Chair of Engineering Hydrology and Water Management, Germany

ABSTRACT. For a simulation of freshwater habitats, it is important to link landscape and instream processes. Therefore, a methodology is developed to jointly simulate catchment, instream and habitat-defining processes at different scales. Hydrologic and hydraulic processes, as well as ecologic methods, are technically coupled and depicted in one simulation approach. The simulation results, which define the riverine habitat, have been validated across these different scales. The model framework allows the prediction of species occurrences, as well as the community structure based on the simulated environmental parameters from the landscape to the microhabitat. We show that the approach is applicable across different ecoregions and also list further challenges towards a holistic simulation of freshwater ecosystems.

Резюме. Для моделирования пресноводных местообитаний важно связать процессы в ландшафте и в ручье. Для этого разработана методология совместного моделирования процессов водосборных бассейнов, ручьев и процессов, определяющих среду обитания в разных масштабах. Гидрологические и гидравлические процессы, а также экологические методы технически взаимосвязаны и представлены в одном имитационном подходе. Результаты моделирования, определяющие среду обитания рек, были оценены в разных масштабах. Структура модели позволяет прогнозировать появление видов, а также структуру сообщества, основанную на моделируемых параметрах окружающей среды от ландшафта до микросреды обитания. Показано, что данный подход применим в различных экорегионах, а также перечислены другие проблемы на пути к целостному моделированию пресноводных экосистем.

KEYWORDS: integrated modelling, landscape, stream, hydrology, hydraulics, substrates, freshwater habitats

Ключевые слова: интегрированное моделирование, ландшафт, ручей, гидрология, гидравлика, субстраты, пресноводные места обитания

INTRODUCTION

The status of freshwater streams is governed by natural processes and anthropogenic influences which occur at different spatial scales in the landscape, the stream channel or the stream sections. These processes and influences interact with freshwater biota through a complex spatio-temporal cause-effect chain. Thus, for a complete assessment of freshwater ecosystems, it is essential that each link of the chain between the landscape and the stream biota is considered. In that way, drivers, pressures, state and impacts of the riverine system become connected, which is also a fundamental requirement for planning and executing successful management measures [1,2].

Simulations need to fully integrate this comprehensive approach for testing scenarios in modelling systems. However, there are no models considering the overall system "landscape-streams-habitat-aquatic biota" since tools suitable to assess natural processes or test the effects of restoration measures on stream ecosystem are unavailable. Thus, there is a general lack of comprehensive simulations including catchment, instream and habitat-defining processes. This is a well-known research deficit in the field of integrated modelling [3,4], which leads to the main objective of this work: the conceptualisation and application of an integrated model framework that can simulate the impact of catchment and instream changes on the riverine habitat of macroinvertebrate species.

ESTABLISHING THE MODEL FRAMEWORK

A model system to jointly simulate catchment, instream and habitat defining processes to assess impacts on stream macroinvertebrates is developed [5] and applied in the 50 km²-catchment of the Kielstau in the northern German lowlands. The model framework is used to depict habitat-defining processes on the three scales catchment, stream channel and small-scale stream sections over the course of one year (2008-2009) on a daily time step. Ecohydrologic processes in the lowland catchment are simulated with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT, [6]), at a resolution of about 0.1 km². For successful simulations of the catchment water balance, agricultural tile drainages and landscape depressions are incorporated into the simulations [7]. Field and tile drainage sediment input have to be considered for the simulation of the catchment sediment input to the streams [8]. Technical solutions are developed to transfer these catchment-scale outputs to the stream channel [9], where the hydraulic model HEC-RAS [10] is used to simulate channel hydraulics and sediment transport along the 9 km-long main channel of the Kielstau in a resolution of about 15 m². The HEC-RAS results are then transferred to the two-dimensional hydraulic model ADH [11], which is used to depict hydraulic processes on a 230 m-long stream section in a mean resolution of 50 cm². For ADH, an ArcGIS user interface was developed [9]. Through these developed links sequentially coupling different models, the catchment processes directly impact stream hydraulics and are connected to the small-scale processes on micro-habitats [12].

INTEGRATED ABIOTIC SIMULATIONS AND VERIFICATION

The decisive advantage of such a model cascade is the generation of results as time series and on different scales: The SWAT model shows good agreement with observed daily discharge at the catchment outlet for the five year calibration and five year validation period ($r^2 = 0.82$). The HEC-RAS model, driven with flow data from SWAT, generally matches measured water depths ($r^2 = 0.90$) and flow velocities ($r^2 = 0.88$) at the three locations along the stream channel very well. The ADH model results match meas-

ured water depths at eight cross sections in the 230 m-long stream section very well ($r^2 = 0.94$) while flow velocity distributions are simulated sufficiently well ($r^2 = 0.70$). Sediment transport calculations are also validated at three scales: reasonably good agreement could be reached when comparing daily modelled to observed sediment load leaving the catchment ($r^2 = 0.56$). Channel sediment transport processes simulated with HEC-RAS are in good agreement with field observations: for instance, the highest modelled erosive location (4.8 cm yr^{-1}) coincides with a spot where farmers regularly have to move their fences due to the channel bank retreat. The combined SWAT and HEC-RAS model supplies flow and sediment time series to the ADH model. Validation of the ADH model results are carried out by comparing simulated with mapped substrate sizes within the modelled reach section (Figure 1).

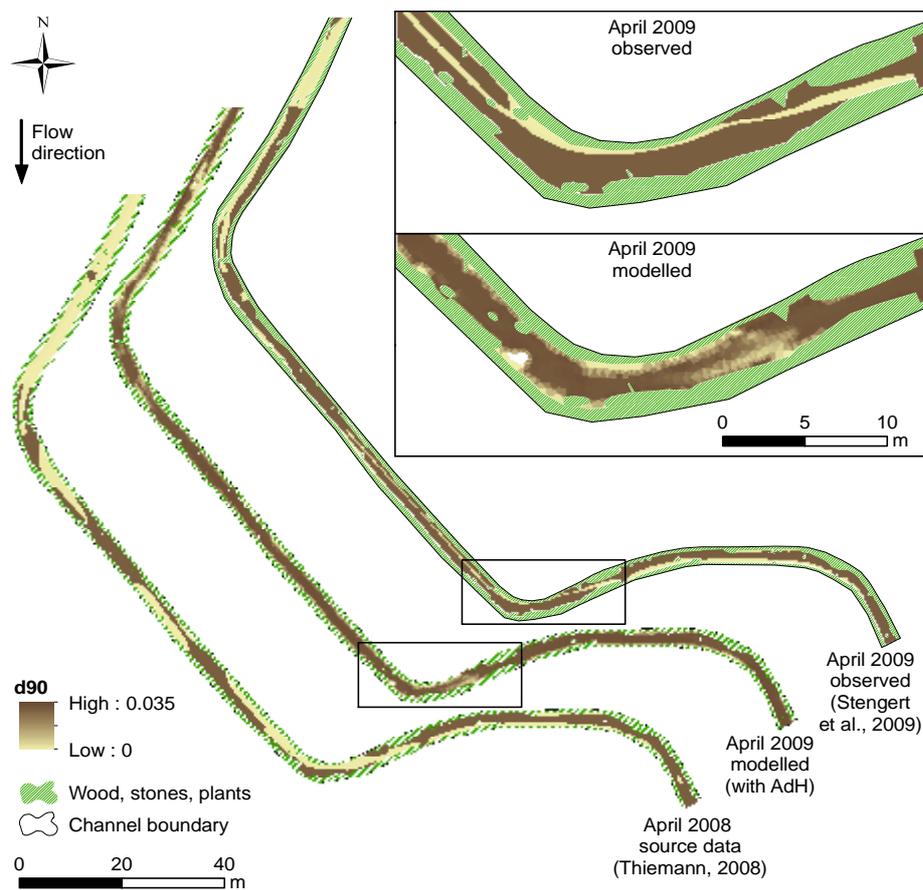


Figure 1 - Comparison of simulated and observed substrate sizes (d_{90} in mm) from the SWAT-HEC-RAS-ADH model cascade over the course of one year (2008-2009) [12]

As can be seen, ADH can depict the observed situation of eroding sands from 2008 to 2009 very well. It is important to note that the ADH results are based on the catchment and stream channel boundary conditions simulated by SWAT and HEC-RAS. The results thus show the impact of catchment and upstream channel processes on substrates at the micro-scale. The stream bed, as simulated by ADH, is relatively stable during most months of the year and major erosive events occur in the winter months November, December and January.

Non-mobile substrates (large wood debris, stones and water plants) have been mapped in the field and are superimposed on the substrate maps using the GIS submodel. These hydraulic parameters and substrate conditions, available on high temporal and spatial resolution across scales form the basis for an integrated assessment of abiotic habitat properties.

MODELLING SPECIES RESPONSE

Based on the abiotic habitat properties, two habitat suitability simulation approaches have been carried out: The first approach uses abiotic habitat properties at the stream channel scale, depicted through the

model cascade SWAT-HEC-RAS: Occurrence probability of the freshwater clam *Sphaerium corneum* is simulated with the R-package BIOMOD (Figure 2a) [13]. The model results are in very good agreement with observed distributions (AUC 0.96, Kappa 0.86). The most important parameters for model prediction were sediment load, water depth, flow velocity and stream power, in accordance with the known impact of instream substrates on the macroinvertebrate community [14]. Therefore, the second approach is based on the simulated substrate properties by the model cascade SWAT-HEC-RAS-ADH (Figure 1) on the stream section scale, leading to the development of the Habitat Evaluation Tool (HET) capable of simulating species communities [15]. Figure 2b illustrates the simulated spatial distribution of species density for *Gammarus pulex* for two points in time. Comparison of HET simulations with observations shows good agreement (Renkonen Index of 56). Generally, the increase of gravel substrates over the course of the year has led to higher individual numbers. This is comparable to other species, whose individual numbers mostly increased from 2008 to 2009 (Figure 3) based on electronic Multi-Habitat-Samplings. The spread of the boxplots represents the uncertainty in the simulations.

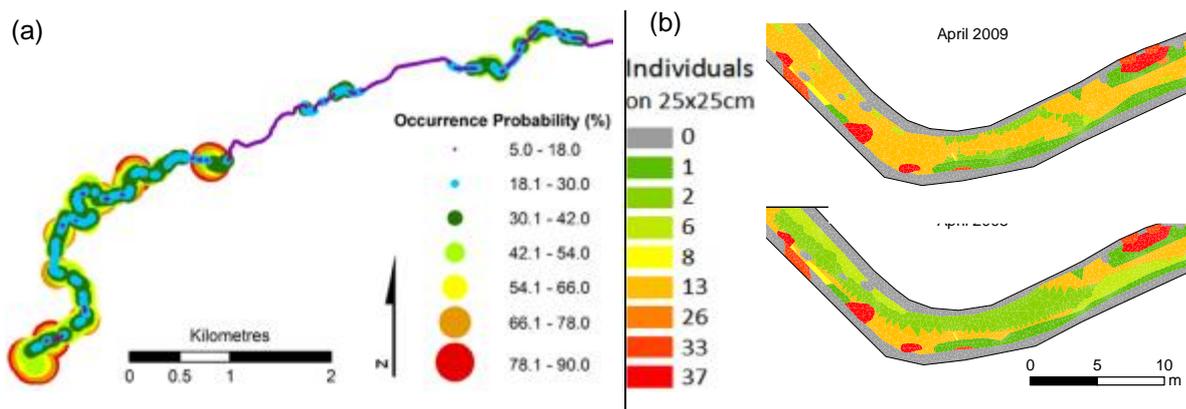


Figure 2 - Occurrence probability maps for *Sphaerium corneum* on the stream channel scale (a) [13] and species density maps for *Gammarus pulex* on the micro-habitat scale (b)

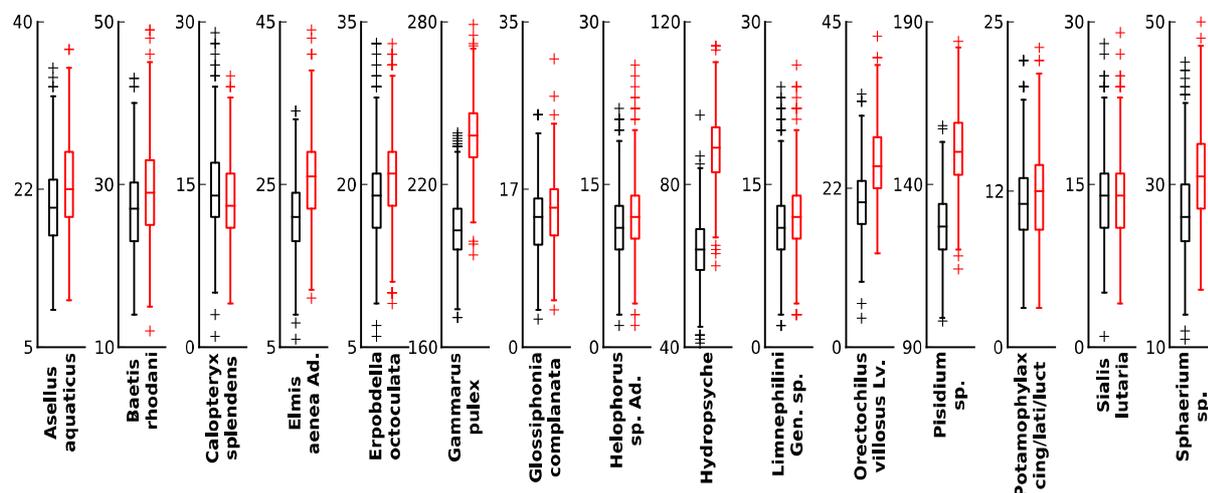


Figure 3 - Boxplots showing changes in species density (nr. individuals on y-axis) simulated with HET from 2008 (black) to 2009 (red) using electronic multi habitat sampling on the substrate distribution depicted through the cascade SWAT-HECRAS-ADH. [15]

CONCLUSIONS

The main conclusions that can be drawn from the analysis are:

1. The presented model framework can be used to test large scale environmental changes, as well as planned restoration measures influencing water and sediment balances and channel hydraulics, for their influence on macroinvertebrates

2. The applicability and transferability to other scales and also ecoregions (lowland, mid-range mountain and mountainous environments), has been shown in successful applications to a German low mountain range basin [16], a mountainous Chinese catchment [17,18], and its implementation as part of the IMPACT project [19,20].
3. Further improvements would be the integration of abiotic parameters like water quality, oxygen and temperature, shading, food sources and plant growth as well as the consideration of stream macroinvertebrate habitat demands at different life stages.
4. An additional step forward would then be the simulation of interactions [21]: competition, predator-prey relationships and feedback loops of the biota with their environment.

REFERENCES

- [1]Beechie TJ, Sear DA, Olden JD, Pess GR, Buffington JM, Moir H, Roni P, Pollock MM. 2010. Process-based Principles for Restoring River Ecosystems. *Bioscience* 60(3), 209-222.
- [2]Feld CK, Birk S, Bradley DC, Hering D, Kail J, Marzin A, Melcher A, Nemitz D, Pedersen ML, Pletterbauer F, Pont D, Verdonshot PFM, Fridberg N. 2011. From Natural to Degraded Rivers and Back Again: A Test of Restoration Ecology Theory and Practice. *Advances in Ecological Research* 44.
- [3]Newman BD, Wilcox BP, Archer SR, Breshears DD, et al. 2006. Ecohydrology of water-limited environments: A scientific vision. *Wat. Res. Res.* 42, 1-15.
- [4]Diembeck D, Lorenzen D, Reck H, Trepel M, Windhorst W. 2008. Anforderungen an Habitatmodelle als Planungshilfe für die Wasserrahmenrichtlinie. *WasserWirtschaft*, 1-2, 13-17.
- [5]Kiesel J, Hering D, Schmalz B, Fohrer N. 2009. A transdisciplinary approach for modelling macroinvertebrate habitats in lowland streams. *IAHS Publication Red Book Series* 328, 24-33.
- [6]Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I, model development. *Journal of American Water Resources Association* 34(1), 73-89.
- [7]Kiesel J, Fohrer N, Schmalz B, White MJ. 2010. Incorporating landscape depressions and tile drainages of a northern German lowland catchment into a semi-distributed model. *Hydrological Processes* 24, 1472-1486.
- [8]Kiesel J, Schmalz B, Fohrer N. 2009. SEPAL – a simple GIS-based tool to estimate sediment pathways in lowland catchments. *Advances in Geosciences* 21(3), 25-32.
- [9]Kiesel J, Schmalz B, Savant G, Fohrer N. 2012. Across the scales: From catchment hydrology to in-stream hydraulics. *TuTech Innovation*.
- [10]USACE. 2010. HEC-RAS, River Analysis System, User's Manual Version 4.1, US Army Corps of Engineers, Hydraulic Engineering Center, 1-790.
- [11]Berger RC, Tate JN, Brown GL, Savant G. 2011. Adaptive Hydraulics – A two-dimensional modeling system, ADH v4.01, USACE CHL-ERDC, Vicksburg, 1-90.
- [12]Kiesel J, Schmalz B, Brown G, Fohrer N. 2013. Application of a hydrological-hydraulic modelling cascade in lowlands for investigating water and sediment fluxes in the catchment, channel and reach. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 61(4), 334-346.
- [13]Jähnig SC, Kuemmerlen M, Kiesel J, Domisch S, Cai Q, Schmalz B, Fohrer N. 2012. Modelling of riverine ecosystems by integrating models: conceptual approach, a case study and research agenda. *Journal of Biogeography* 39(12), 2253–2263.
- [14]Schröder M, Kiesel J, Schattmann A, Jähnig SC, Lorenz AW, Kramm S, Keizer-Vlek H, Rolaufts P, Graf W, Leitner P, Hering D. 2013. Substratum associations of benthic invertebrates in lowland and mountain streams. *Ecological Indicators* 30, 178-189.
- [15]Kiesel J, Schröder M, Hering D, Schmalz B, Hörmann G, Jähnig SC, Fohrer N. 2015. A new model linking macroinvertebrate assemblages to habitat composition in rivers: development, sensitivity and univariate application. *Fundamental and Applied Limnology* 186 (1-2).
- [16]Schmalz B, Kiesel J, Meurer J, Song S, Kühling I, Fohrer N. 2012. Hydrologische und hydraulische Untersuchungen im Kinzig-Einzugsgebiet, im Auftrag von Senckenberg, Forschungsinstitute und Naturmuseen. Department of Hydrology and Water Resources Management, CAU Kiel, 1-83.
- [17]Schmalz B, Kuemmerlen M, Kiesel J, Cai Q, Jähnig SC, Fohrer N. 2014. Impacts of land use changes on hydrological components and macroinvertebrate distributions in the Poyang lake area. *Ecohydrology*, DOI: 10.1002/eco.1569
- [18]Kuemmerlen M, Schmalz B, Cai Q, Haase P, Fohrer N, Jähnig SC. 2015. An attack on two fronts: predicting how changes in land use and climate affect the distribution of stream macroinvertebrates. *Freshwater Biology* 60(7): 1443-1458. DOI: 10.1111/fwb.12580.

- [19]Guse B, Kail J, Radinger K, Schröder M, Kiesel J, Hering D, Wolter C, Fohrer N. 2015. Eco-hydrologic model cascades: Simulating land use and climate change impacts on hydrology, hydraulics and habitats for fish and macroinvertebrates. *Science of the Total Environment* 533: 542-556.
- [20]Kail J, Guse B, Radinger J, Schröder M, Kiesel J, Kleinhans M, Schuurman F, Fohrer N, Hering D, Wolter C. 2015. From hydrology to species assemblages - a modelling framework to assess the effect of pressures on river habitat conditions and biota. *PLOS ONE* | DOI:10.1371/journal.pone.0130228.
- [21]Mondy CP, Schuwirth N. 2017. Integrating ecological theories and traits in process-based modeling of macroinvertebrate community dynamics in streams. *Ecological Applications*, DOI: 10.1002/eap.1530.

Chapter III/64: QUANTIFYING INTERACTION NETWORKS AND STABILITY PROPERTIES OF PLANKTON FOOD WEBS USING MULTIVARIATE FIRST ORDER AUTOREGRESSIVE MODELLING

Глава III/64: Количественное определение взаимодействия и свойств устойчивости пищевых цепей планктона с использованием многовариантного авторегрессионного моделирования первого порядка

Alena S. Gsell^{1*}, Deniz Özkundakci^{2,3}, Marie-Pier Hébert⁴, Rita Adrian^{5,6}

DOI 10.25680/3366.2018.41.77.257

*Email: a.gsell@nioo.knaw.nl

1. Aquatic Ecology, Netherlands Institute of Ecology (NIOO-KNAW), Wageningen, The Netherlands
2. Waikato Regional Council, Hamilton, New Zealand
3. Environmental Research Institute, The University of Waikato, Hamilton, New Zealand
4. Department of Biology, University McGill, Montreal, Quebec, Canada
5. Ecosystem Research, Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries, Berlin, Germany
6. Department of Biology, Chemistry, Pharmacy, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany

ABSTRACT. Lakes and reservoirs have been identified as sentinels of global change as they integrate changes in the surrounding landscape. While univariate indicator variables are relatively well assessed, the lack of knowledge on temporal changes in species interactions under pressure has been identified as a major gap in the bio-monitoring sciences. Multivariate autoregressive models can be used to assess direction and strength of both direct and indirect interactions in complex communities over time. This model framework also allows calculation of network stability properties (variance, resilience and reactivity). Moreover, the interaction matrix can be further analyzed for classical network structure properties (closeness- and betweenness centrality). These measures are useful indicators of changes in ecosystem stability and help identify biotic keystone groups and/or groups of species that are particularly vulnerable to changes in the landscape.

Резюме. Озера и водохранилища являются стражами глобальных изменений, поскольку они интегрируют в себе изменения в окружающем ландшафте. В то время как одномерные индикаторные переменные относительно хорошо изучены, недостаток знаний об изменениях в видовом взаимодействии под антропогенным давлением является большим пробелом в науках о биологическом мониторинге. Многомерные авторегрессионные модели могут быть использованы для оценки динамики направления и силы как прямых, так и косвенных взаимодействий в сложных сообществах. Эта модельная структура также позволяет рассчитывать свойства устойчивости сети (дисперсия, устойчивость и реактивность). Более того, матрица взаимодействия может быть дополнительно проанализирована для свойств классической структуры сети (центральность по близости и посредничеству). Эти меры являются важными индикаторами изменений в стабильности экосистем и помогают определить биотические ключевые группы и/или группы видов, которые особенно уязвимы к изменениям ландшафта.

KEYWORDS: community stability, interaction networks, long-term research, network centrality
Ключевые слова: стабильность сообщества, сети взаимодействия, долгосрочные исследования, сетевая центральность

INTRODUCTION

Constituting the lowest points in the landscape, lakes and reservoirs integrate changes in the catchment and atmosphere, and can be regarded as sentinels of past and current environmental changes across regions [1,2]. Physical, chemical and biological variables that are sensitive to climate and land-use changes have been identified as sentinel indicators, ranging from e.g., ice phenology to dissolved nutrient concentrations to community composition [1,2]. Long-term monitoring data for such sentinel indicators are necessary to extract information as to how aquatic landscapes respond to a rapidly changing world; for example, through the assessment of decadal temperature changes in a global set of lakes [3].

While temporal changes in physical and chemical variables in lakes and reservoirs have been relatively well explored, especially during growing seasons, less is known as to how plankton interactions, community composition and network topography change over time and under environmental pressure [4]. This lack of direct, observational data on species interactions and community network response to stress has been identified as a major gap in the bio-monitoring sciences [5]. When long-term empirical data are available, multivariate first order autoregressive, or MAR(1), models can be used to quantify the direction and strength of species interactions and community stability properties in complex communities (reviewed by [6]). Moreover, the resulting interaction matrix can help characterize network structure and identify keystone species or groups [7]. These stability and network structure properties of MAR(1) models provide useful biological indicators that can be applied for e.g. conservation management and underlines the general importance of the maintenance of well-designed long term monitoring programs.

MAR(1) models have predominantly been used to assess interaction networks in freshwater and marine ecosystems, likely because the short generation time of plankton allows for the assessment of many generations' worth of dynamics over comparably few years. The model framework has been used to analyze biotic and abiotic drivers of community dynamics [6,8]. Several studies have explored the effect fish predation pressure on lower trophic levels and assessed the direct and indirect pathways through which changes in predation pressure cascaded through interaction networks [9,10]. MAR(1) models have also been used to assess the role of predation pressure on phytoplankton and ciliate population dynamics [11] and on disease transmission [12], the effects of biotic invasions on pelagic food web structure [13], the effects of climate change and eutrophication on the structure of plankton communities and food webs in lakes [14-16], the effects of carbon and nutrient manipulations on pelagic networks [17], and the interactive effects of environmental drivers on species interactions [18]. MAR(1) models have also allowed to uncover interactions that were previously overlooked or underestimated in their importance to shape interaction networks [7,19].

MAR(1) MODEL APPLICATION

An comprehensive guide for data preparation and analysis steps, including an introduction to the R package "MAR1" has been published by Scheef and coauthors [20]. In a nutshell, to avoid overparameterization of the MAR(1) models, it may be necessary to group plankton species data, whereby the choice of grouping depends on the specific aims of a study. Biotic groups and environmental variables can then be categorized either as variates or covariates for inclusion in the MAR(1) model [21]. Variables that can affect their own dynamics and/or the dynamics of other groups are considered as variates. Covariates are variables that can affect the dynamics of variates but are unlikely to be influenced by themselves. These covariates are generally abiotic variables such as temperature or relatively static biotics such as fish predation pressure. Seasonality may also need to be accounted for; for example, by adding a time 'dummy' variable as covariate [9]. The choice of time intervals to which the data are aggregated can influence the outcome of the model. Longer intervals (e.g., monthly intervals) have been shown to efficiently capture time-lagged responses of biotic interactions in lake networks, but may also increase the chance to capture signals of indirect effects [19]. Data can be log-transformed to linearize non-linear relationships between groups (as many trophic relationships are non-linear; [9]), and z-scoring allows direct comparison of the interaction coefficients among groups [20]. The MAR(1) model needs to be initiated by prior characterization of all potential interactions. Often, the choice is to allow only biologically plausible interactions [21], with or without restrictions as to the sign of interactions (negative or positive interactions). However, depending on the research question, it may also be of interest to allow the full suite of potential interactions to explore all potential outcomes [20]; however, this will lead to a higher number of parameters fitted to the model. Therefore, care should be taken to allow and/or restrict interactions based on *a priori* knowledge of a given system.

The principle of MAR(1) models is analogous to most autoregressive models: for a given time point (t), the biomass of each variate is predicted by multiple linear regression, using data of all other variates and

covariates from the previous time point as predictors (for details, see [9,21]). Hence, MAR(1) models assume linear relationships, often approximated by linearizing input data. Advances in MAR(1) models include the development of the moving window MAR(1) (mwMAR), which quantifies the interaction network on a moving data window and allows tracking changes in interaction strength over time [22]. Other model frameworks have been developed to allow the analysis of nonlinear relationships and changes in attractor directly such as S-maps [23].

Network stability measures. Network stability indicators derived from MAR1 models are based on measurements relative to deviations from an “equilibrium” state, i.e., the stationary distribution of a community under environmental noise. The stability indicators (Figure 1) are expressed as (i) variance, (ii) return rate, and (iii) reactivity (for a detailed derivation, see 21). ‘Variance’ (Figure 1a) is expressed as the ratio of stationary distribution variance to environmental variance. Unstable systems with low resilience (i.e., slow return to its stationary distribution) and low resistance (i.e., high reactivity) tend to fluctuate more strongly as species interactions amplify the system response to environmental variation [21]. ‘Resilience’ (Figure 1b) is the return rate to ‘equilibrium’ after a perturbation (e.g., heat wave). Resilience increases as return rate increases [21]. ‘Reactivity’ (Figure 1c) describes the potential maximal reaction strength of a system to a perturbation. Unstable systems exhibit larger deviations from the stationary distribution after perturbations. Resistance increases as reactivity decreases [21]. These stability indicators are directly comparable across systems, as they are not affected by the magnitude of fluctuations in system variables [6] and thereby allow to assess the stability of ecosystems over time or space.

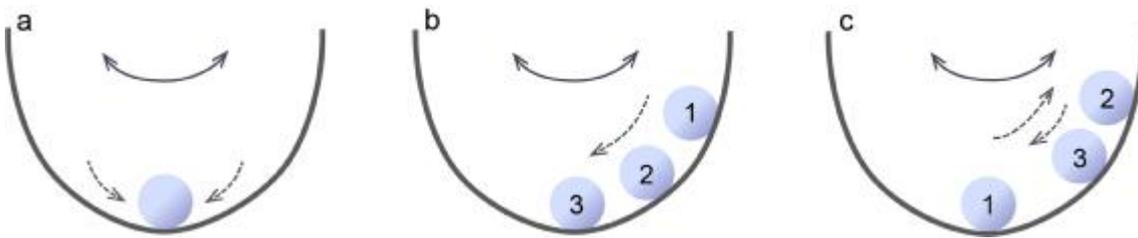


Figure1: Simplified balls in cup illustration of three stability measures modified from Figure 2 in Ives et al (21) for a) variance, b) return rate, and c) reactivity with a disturbance (solid arrows) and a stability measure response (dashed arrows). In unstable systems, variance (a) is higher as the ball spends more time away from the center, return rate (b) is lower as the force to return to the center is lower, and reactivity (c) is higher as the ball is moved further away from the center after a disturbance.

Network structure measures. The MAR(1) model interaction matrices can be used as a network analysis input to calculate network structure properties, quantifying the influence that every group exerts on the entire network. Betweenness and closeness centrality (Figure 2) can be used to identify keystone groups. However, this is based on the assumption that well-connected groups (i.e., strongly linked to multiple other groups) in the network are major interactors, and should therefore exert a greater influence on the structure and stability of the network than other groups [24,25]. Closeness centrality (Figure 2, yellow vertices) describes how strongly a change in one vertex influences the entire network. This indicator quantifies the distance of each vertex to every other vertex in the network. A vertex with a direct connection to every other vertex in the network has a high closeness value, whereas a vertex connected to other vertices through many intermediaries has a low closeness value [26]. Betweenness centrality (Figure 2, blue vertex) assesses vertices that connect separated modules of the network (e.g., sub-networks). This indicator is derived from the number of shortest paths passing through a given vertex (intermediary; [26]).

Advantages and disadvantages. MAR(1) models provide quantitative estimates of interaction strengths, enabling the identification of direct and strong links but also of indirect “long and weak” links [24]. While most models reported in the literature only allow biologically plausible interactions, MAR(1) models can be used to uncover previously unrecognized or overlooked interactions; hence the exclusion of, and restrictions (e.g., on the sign) of interactions should be considered with care. MAR(1)-based interaction coefficients represent maintained interactions (across seasons and years) among groups. Hence, interactions that are important for a short period per year, or those that are not consistent among years, tend to be eliminated during the model searching process. Applying MAR(1) to short time series can reduce the potential to capture the signal of environmental long-term change and render interaction coefficients more sensitive to stochastic variability. Moreover, the interpretation of interactions using MAR(1) needs

to take into account that seemingly direct interactions could also result from indirect effects (e.g., consumers increasing nutrient cycling; [27]) or from an unobserved explanatory variable shared between groups.

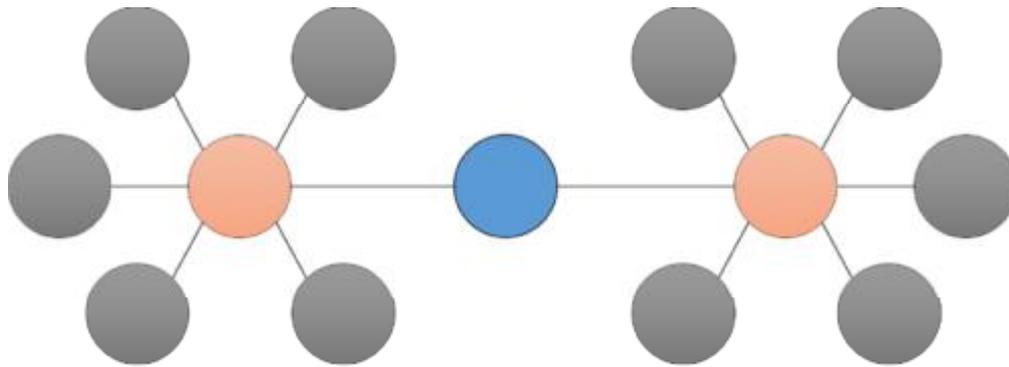


Figure 2: Simplified and idealized graphical illustration of a network structure with two sub-networks, including a visualization of network members having high betweenness (blue vertex) and closeness (yellow vertices) centrality values. The vertices can have different lengths and thickness representing the interactions strength between members; e.g., MAR(1) model interaction matrices.

CONCLUSIONS

1. The application of MAR(1) or mwMAR models can help better understand how the structure of interaction networks and the stability of ecological communities respond to anthropogenic pressures. Ultimately, the application of such model framework in biomonitoring programs can improve our ability to predict changes in aquatic landscapes.
2. MAR(1)-derived stability and centrality measures may be used as integrated ecological indicators in landscape research, with the aim of detecting changes in ecosystem stability (to prevent tipping points, for instance) and identifying particularly vulnerable components of the network.

REFERENCES

- [1]Adrian, R., C. M. O'Reilly, H. Zagarese, S. B. Baines, D. O. Hessen, W. Keller, D. M. Livingstone, R. Sommaruga, D. Straile, E. Van Donk. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnol.Oceanog.* **54**:2283-2297.
- [2]Williamson, C. E., J. E. Saros, D. W. Schindler. 2009. Sentinels of change. *Science*, **323**:887-888.
- [3]O'Reilly, C. M., S. Sharma, D. K. Gray, S. E. Hampton, J. S. Read, R. J. Rowley, P. Schneider, J. D. Lenters, P. B. McIntyre, B. M. Kraemer. 2015. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters* **42**.
- [4]McMeans, B. C., K. S. McCann, M. Humphries, N. Rooney, A. T. Fisk. 2015. Food web structure in temporally-forced ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution* **30**:662-672.
- [5]Gray, C., D. J. Baird, S. Baumgartner, U. Jacob, G. B. Jenkins, E. J. O'Gorman, X. Lu, A. Ma, M. J. Pocock, N. Schuwirth. 2014. FORUM: Ecological networks: the missing links in biomonitoring science. *Journal of Applied Ecology* **51**:1444-1449.
- [6]Hampton, S. E., E. E. Holmes, L. P. Scheef, M. D. Scheuerell, S. L. Katz, D. E. Pendleton, E. J. Ward. 2013. Quantifying effects of abiotic and biotic drivers on community dynamics with multivariate autoregressive (MAR) models. *Ecology* **94**:2663-2669.
- [7]Gsell, A. S., D. Özkundakci, M.P. Hébert, R. Adrian. 2016. Quantifying change in pelagic plankton network stability and topology based on empirical long-term data. *Ecol. Ind.* **65**:76-88.
- [8]Mac Nally, R., J. R. Thomson, W. J. Kimmerer, F. Feyrer, K. B. Newman, A. Sih, W. A. Bennett, L. Brown, E. Fleishman, S. D. Culbertson. 2010. Analysis of pelagic species decline in the upper San Francisco Estuary using multivariate autoregressive modeling (MAR). *Ecol.Appl.* **20**:1417-1430.
- [9]Ives, A. R., S. R. Carpenter, B. Dennis. 1999. Community interaction webs and zooplankton responses to planktivory manipulations. *Ecology* **80**:1405-1421.
- [10]Beisner, B. E., A. R. Ives, and S. R. Carpenter. 2003. The effects of an exotic fish invasion on the prey communities of two lakes. *J. Anim. Ecol.* **72**:331-342.
- [11]Huber, V., U. Gaedke. 2006. The role of predation for seasonal variability patterns among phytoplankton and ciliates. *Oikos* **114**:265-276.

- [12]Duffy, M. A. 2007. Selective predation, parasitism, and trophic cascades in a bluegill-Daphnia-parasite system. *Oecologia* **153**:453-460.
- [13]Kratina, P., R. Mac Nally, W. J. Kimmerer, J. R. Thomson, M. Winder. 2014. Human-induced biotic invasions and changes in plankton interaction networks. *Appl.Ecol.* **51**:1066-1074.
- [14]Hampton, S. E., M. D. Scheuerell, D. E. Schindler. 2006. Coalescence in the Lake Washington story: Interaction strengths in a planktonic food web. *Limnol.Oceanog.* **51**:2042-2051.
- [15]Hampton, S. E., E. Izmet, R. Lyubov, M. V. Moore, S. L. Katz, B. Dennis, E. A. Silow. 2008. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake–Lake Baikal, Siberia. *Global Change Biology* **14**:1947-1958.
- [16]Carter, J. L., D. E. Schindler, T. B. Francis. 2017. Effects of climate change on zooplankton community interactions in an Alaskan lake. *Climate Change Responses* **4**:3.
- [17]Klug, J. L., K. L. Cottingham. 2001. Interactions among environmental drivers: Community responses to changing nutrients and dissolved organic carbon. *Ecology* **82**:3390-3403.
- [18]Torres, M. A., M. Casini, M. Huss, S. A. Otto, M. Kadin, A. Gårdmark. 2017. Food-web indicators accounting for species interactions respond to multiple pressures. *Ecol.Ind.***77**:67-79.
- [19]Hampton, S. E., D. E. Schindler. 2006. Empirical evaluation of observation scale effects in community time series. *Oikos* **113**:424-439.
- [20]Scheef, L. 2013. MAR1: Multivariate Autoregressive Modeling for Analysis of Community Time-Series Data. <http://cran.r-project.org/web/packages/MAR1/>.
- [21]Ives, A., B. Dennis, K. Cottingham, S. Carpenter. 2003. Estimating community stability and ecological interactions from time-series data. *Ecological Monographs* **73**:301-330.
- [22]Francis, T. B., E. M. Wolkovich, M. D. Scheuerell, S. L. Katz, E. E. Holmes, S. E. Hampton. 2014. Shifting Regimes and Changing Interactions in the Lake Washington, USA, Plankton Community from 1962–1994. *PloS one*, **9(10)**, e110363.
- [23]Deyle, E. R., R. M. May, S. B. Munch, G. Sugihara. 2016. Tracking and forecasting ecosystem interactions in real time. *Proc. R. Soc. B.* **283**:1822
- [24]Jordán, F. 2009. Keystone species and food webs. *Phil. Trans. R. Soc. B.* **364**:1733-1741.
- [25]Jordán, F., G. Osváth. 2009. The sensitivity of food web topology to temporal data aggregation. *Ecological Modelling* **220**:3141-3146.
- [26]Vasas, V., F. Jordán. 2006. Topological keystone species in ecological interaction networks: considering link quality and non-trophic effects. *Ecological Modelling* **196**:365-378.
- [27]Kitchell, J. F., R. V. O'Neill, D. Webb, G. W. Gallepp, S. M. Bartell, J. F. Koonce, B.S. Ausmus. 1979. Consumer regulation of nutrient cycling. *BioScience*, **29**:28-34.

Основная глава 11.3 Моделирование ландшафтных отделений Main Chapter 11.3 Modelling Landscape Compartments

Глава III/65: ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ В БОЛОТНО-ОЗЕРНЫХ ЛАНДШАФТАХ Chapter III/65: A Model of the Dynamics of the Frozen Soil Depth in Bog-Lake Landscapes

Виктор М. Белолипецкий*, Светлана Н. Генова

DOI 10.25680/6852.2018.29.22.258

*Эл. Почта: belolip@icm.krasn.ru

Институт вычислительного моделирования (Федеральный исследовательский центр КНЦ СО РАН),
660036 Красноярск, Россия

РЕЗЮМЕ. Теоретическое описание температурного поля в почвах при их промерзании или оттаивании осуществляется с помощью решений задач Стефана. Математическая модель основывается на уравнениях теплопроводности для мерзлых и талых слоев. Рассматриваются территории, на которых имеются озера или болота. Выделяются следующие слои в вертикальной структуре зоны вечной мерзлоты: талый грунт, мерзлый грунт, вода, лед, снег. Предлагается упрощенный численный алгоритм решения одномерных (в вертикальном направлении) задач теплопроводности с подвижными границами фазового перехода с образованием новых и аннулированием существующих слоев.

Abstract. The theoretical description of temperature fields in soils during freezing or thawing is carried out using solutions of Stefan's problem. We developed a mathematical model based on the equations of thermal conductivity for frozen and thawed layers. Those areas in which are lakes or bogs were considered. We distinguished between following layers in the vertical structure of the zone of permafrost: thawed soil, frozen soil, water, ice, snow. We offer a simplified numerical algorithm for solving of one-dimensional (in the vertical direction) heat conduction problems with moving boundaries of phase transition with the formation of new and cancellation of existing layers.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вечная мерзлота, задачи Стефана, мерзлые и талые слои, малоразмерная численная модель

Keywords: permafrost, Stefan's problem, thawed and frozen soil, small dimensional numerical model

ВВЕДЕНИЕ

В связи с изменением глобальной температуры воздуха представляют интерес оценки реакции вечной мерзлоты на изменение климата. Рассматриваются территории, на которых имеются озера или болота. Так как вертикальные градиенты температуры, как правило, значительно превосходят горизонтальные, то при описании теплопереноса все физические процессы предполагаются одномерными в вертикальном направлении. В вертикальном направлении выделяются следующие слои: снег, лед, вода, талый грунт, мерзлый грунт. Теоретическое описание температурного поля в воде и почвах при их промерзании или оттаивании осуществляется с помощью решений задач Стефана [1]. Математическая модель основывается на уравнениях теплопроводности для мерзлой и талой зон. На границах фазового перехода (замерзания-таяния) ставятся условия равенства температур температуре фазового перехода и условие Стефана. Имеется обширная литература по математическому моделированию вечной мерзлоты (см., например, [2-8]).

В настоящей работе рассматривается малоразмерная численная модель вертикальных распределений температуры в талых и мерзлых слоях, учитывающая образование новых и аннулирование существующих слоев, (предложенная в [9]). Можно выделить два типа водоемов: а) водоемы, которые зимой промерзают до дна, а летом лед тает по всей глубине и протаивают верхние слои дна («мелкие» водоемы); б) водоемы, которые зимой не замерзают до дна («глубокие» водоемы). Возможны различные варианты расположения мерзлых и талых слоев (таблица 1). Для «глубоких» озер возможны три варианта. Вариант 1: слой воды, слой талого грунта, слой мерзлого грунта, слой талого грунта; вариант 2: слой снег-лед, слой воды, слой талого грунта, слой мерзлого грунта, слой талого грунта; вариант 8: слой воды, слой льда, слой воды, слой талого грунта, слой мерзлого грунта, слой талого грунта. Для «мелких» водоемов рассматриваются семь вариантов (варианты 1-7). При переходе с одного варианта на другой слои добавляются или исключаются.

Таблица 1 Варианты расположения мерзлых и талых слоев в болотно-озерных ландшафтах

№ варианта	Вода	Лед снег)	Вода	Талый грунт	Мерзлый грунт	Талый грунт	Мерзлый грунт	Талый грунт
1	+					+	+	+
2		+	+			+	+	+
3		+			+	+	+	+
4		+					+	+
5	+	+					+	+
6	+	+			+	+	+	+
7	+			+	+	+	+	+
8	+	+	+			+	+	+

ЦЕЛЬ МЕТОДА

Изменение климата оказывает влияние на динамику вечной мерзлоты. Для прогнозирования сезонного оттаивания вечной мерзлоты в болотно-озерных ландшафтах разрабатываются компьютерные модели, учитывающие метеоусловия и глубину водоема.

ПРИНЦИП И ПРОЦЕДУРА

Математическая модель динамики замерзания-таяния вечной мерзлоты.

Вертикальные распределения температуры в каждом слое определяются из решения уравнения теплопроводности, удовлетворяющего соответствующим граничным условиям:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = K_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2}. \quad (1)$$

Здесь $T_i(t, z)$ – температура i – го слоя, K_i – коэффициент теплопроводности, t – время, z – вертикальная координата (направлена вниз), $h_{i-1} \leq z \leq h_i$.

Граничные условия. Условие на границе атмосфера – вода ($z=0$)

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = - \frac{F_n}{c_w \Gamma_w}, \quad (2)$$

условие на границе атмосфера – снег+лед ($z=0$)

$$T = T_{ice}. \quad (3)$$

Условие на дне водоема (границе i -го $h_{i-1} \leq z \leq h_i$ и $(i+1)$ -го $h_i \leq z \leq h_{i+1}$ слоев, $z = h_i = h_{bt}$)

$$T_i = T_{i+1}, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (4)$$

На подвижных границах фазового перехода ($z = h_j$)

$$T_j = T_{j+1} = T_{ph}, \quad \Gamma_j L_j \frac{dh_j}{dt} = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} - \lambda \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (5)$$

Здесь Γ_w – плотность воды, c_w – удельная теплоемкость воды, F_n – полный тепловой поток на границе атмосфера – вода, T_{ice} – температура на поверхности льда, $z = h_i$ – координата границы между i – ым и $(i+1)$ – ым слоями, λ – коэффициент теплопроводности, T_{ph} – температура фазового перехода, Γ_j – плотность j - го слоя, $L_j = L_w \times W_j$ – скрытая объемная теплота плавления среды в j – ом слое, $W_j = \frac{W_{jw}}{W_j}$ – влажность грунта в j – ом слое, W_{jw} – объем воды в грунте, W_j – объем всего грунта.

На нижней границе слоя вечной мерзлоты условия (7) дополняются заданием геотермического градиента в слое талого грунта $G = \frac{\partial T}{\partial z}$, ($G=0.02 - 0.05$ °C/m [10]).

Начальные условия: $T_i(0, z) = T_i^0, \quad d_i = d_i^0. \quad (6)$

Рассмотрим произвольный i -ый слой: $h_{i-1} \leq z \leq h_i, \quad d_i = h_i - h_{i-1}$, где d_i – толщина i -го слоя. Введем новые независимые переменные (t, x) :

$$\hat{t} = t, \quad x_i = \frac{z_i - h_{i-1}}{d_i}, \quad 0 \leq x_i \leq 1.$$

Так как $\frac{\partial}{\partial z_i} = \frac{1}{d_i} \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad \frac{\partial^2}{\partial z_i^2} = \frac{1}{d_i^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}, \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} + w_i \frac{\partial}{\partial x_i},$

$w_i = \frac{\partial x_i}{\partial t} = \frac{1}{d_i} \frac{dh_{i-1}}{dt} - x_i \frac{dh_i}{dt} \frac{1}{d_i}$, то уравнение (1) и граничные условия (2) – (5) запишутся в виде

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} + w_i \frac{\partial T_i}{\partial x_i} = \frac{K_i}{d_i^2} \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} \frac{\partial T_i}{\partial x_i} = - \frac{F_n}{c_w \gamma_w}, \quad T_i|_{x_i=0} = T_{ice}, \quad T_i|_{x_i=1} = T_{i+1}|_{x_{i+1}=0}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial x_i} \Big|_{x_i=1} = \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x_{i+1}} \Big|_{x_{i+1}=0}, \quad T_j|_{x_j=1} = T_{j+1}|_{x_{j+1}=0} = T_{ph}, \quad (9)$$

$$r_j L_j \frac{dh_j}{dt} = \frac{\partial T_j}{\partial x_j} \Big|_{x_j=1} - \frac{\partial T_{j+1}}{\partial x_{j+1}} \Big|_{x_{j+1}=0}. \quad (10)$$

Численное решение сформулированных задач находится на грубой (трехточечной) сетке в каждом слое [9]. Уравнение (7) аппроксимируется с помощью неявной разностной схемы и направленных разностей для конвективных слагаемых. Граничные условия (8) – (10) записываются для рассматриваемой разностной сетки.

Если при расчетах d_i становится меньше заданной малой величины e ($d_i < e$), то соответствующий слой аннулируется. Если в результате таяния или замерзания образуется новый k – ый слой, то для этого слоя задаются начальная толщина $d_k^0 = e$ и значения температуры.

Таблица 2. Толщина слоя протаивания мерзлого грунта(см)

Глубина болота (см)	25	50	75
2010 г.	47.8	29.8	21.8
2011 г.	59.9	39.7	28.2

Таблица 3. Интервалы времени существования слоя талого грунта (дата начала таяния грунта – дата замерзания всего талого слоя)

Глубина болота (см)	25	50	75
2010 г.	07.06 – 10.02	10.06 – 25.02	19.06 – 19.05
2011 г.	3.05 –	12.05 –	27.05 -

РЕЗУЛЬТАТЫ

Выполнены модельные расчеты для глубин болот 25 см, 50 см, 75 см и метеоданных 2010 – 2011 гг метеостанции г. Дудинка. 2010 год можно считать «холодным» (около 240 суток со среднесуточной отрицательной температурой, средняя температура за период с 1.10 по 30.04 -20.72°C), 2011 – «теплым» (190 суток с отрицательной температурой и среднесуточной октябрь-апрель -15.22°C). Определены глубины сезонного оттаивания многолетнемерзлых грунтов, температуры талого слоя, интервалы времени существования слоя талого грунта. В таблицах приведены результаты расчетов, которые показывают влияния глубины болота и метеоданных на основные характеристики вечной мерзлоты.

Из приведенных в таблицах результатов расчетов замерзания - протаивания грунта следует, что с увеличением глубины «мелкого» водоема возрастает время существования слоя талого грунта. Для достаточно больших глубин озера слой талого грунта не замерзает полностью в течение года. При дальнейшем увеличении глубины водоема он не замерзает до дна («глубокий» водоем) и талый слой существует в течение года.

ВЫВОДЫ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДА

Предложенный численный алгоритм позволяет описать годовую динамику замерзания-оттаивания вечной мерзлоты в болотно-озерных ландшафтах и оценить влияние изменения климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенная одномерная (в вертикальном направлении) математическая модель позволяет оценить сезонную динамику вертикальной структуры вечной мерзлоты в болотно-озерных ландшафтах.
2. Компьютерная модель описывает вертикальную структуру зоны вечной мерзлоты, состоящей из слоев льда, воды, талого грунта и мерзлого грунта.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мейрманов А.М. Задача Стефана. - Новосибирск, Наука, 1986.- 239 с.
- [2] Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э. 1998. Прогноз изменения мерзлотных условий в северном полушарии: применение результатов балансовых и транзитивных расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы, Криосфера Земли, № 2, 53-57.
- [3] Малевский-Малевиц С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д. 2000. Модельные оценки эволюции вечной мерзлоты и распределения слоя сезонного протаивания в зависимости от климатических условий в северных регионах Западной Сибири, Криосфера Земли, № 4, 49-57.
- [4] Аржанов М.М., Елисеев А.В., Демченко П.Ф., Мохов И.И. 2007. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа), Криосфера Земли, № 4, 65-69.
- [5] T.S. Sazonova T.S, V.E. Romanovsky V.E. 2003. A model for regional scale estimation of temporal and spatial variability of active layer thickness and mean annual ground temperatures, Permafrost and Periglacial Processes, № 2, 125- 140.
- [6] Goodrich L.E. 1982. The influence of snow cover on the ground thermal regime. - Canadian Geotechnical Journal, vol. 19, № 4, 421-432.
- [7] Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Alekseev V.F., Lawrence D.M. Improved modeling of permafrost dynamics in a GCM land-surface scheme, Geophysical Research Letters, № L08501. DOI:10.1029/2007GL029525.
- [8] Zhang T.J., Frauenfeld O.W., Serreze M.C., Etringer A., Oelke C., McCreight J., Barry R.G., Gilichinsky D., Yang D.O., Ye H.C., Ling F., Chudinova S. 2005. Spatial and temporal variability in active layer thickness over the Russian Arctic drainage basin, Journal of Geophysical Research-Atmospheres, № D16, p. Art. No. D16101.
- [9] Belolipetskii Victor M., Genova Svetlana N. 2016. A numerical model of the seasonal thawing of permafrost in the bog-lake landscapes, Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics, 9(2), 158-165.
- [10] Красс М.С., Мерзликин В.Г. Радиационная теплофизика снега и льда. - Ленинград, Гидрометеоиздат, 1990. – 265 с.

Глава III/66: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПО ПОЧВЕННОМУ ПРОФИЛЮ РАЗЛИЧНЫХ ЛАНДШАФТОВ
Chapter III/66: Use of Parameter-Reduced Dynamic Models to Describe the Migration of Heavy Metals in the Soil Profile of Various Landscapes

Александр С. Фрид*, Татьяна И. Борисочкина

DOI 10.25680/1287.2018.88.21.259

*Эл. Почта: asfrid@mail.ru

Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер. 7-2, 119017 Москва, Россия

РЕЗЮМЕ. Предложен подход к математическому описанию многолетней радиальной миграции тяжелых металлов в почвах различных ландшафтов при их загрязнении тяжелыми металлами с помощью динамических моделей диффузии и конвективной диффузии с постоянными во времени и пространстве параметрами. При сборе эмпирического материала указано на важность отбора проб в полевых условиях в виде монолитов, которые затем разрезаются на слои 1-2 см и даже менее. В моделях используются валовые содержания элементов. Информация о свойствах почв и формах соединений тяжелых металлов в почвах может быть использована для оценки статистических связей их с параметрами моделей миграции.

Abstract. An approach is proposed to the mathematical description using dynamic models of diffusion and convective diffusion with constant parameters in time and in space of the long-term radial migration of heavy metals in soils of different landscapes contaminated with heavy metals. The importance of sampling in the field in the form of monoliths is indicated, which are then cut into layers of 1-2 cm and even less (for collection of empirical material). The models use the gross content of the elements. Information on the properties of soils and forms of heavy metal compounds in soils can be used to evaluate their statistical relationships with the parameters of migration models.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ландшафты, загрязнение тяжелыми металлами, радиальная миграция, динамические модели, параметры моделей, отбор проб, монолиты

Keywords: landscapes, heavy metal contamination, radial migration, dynamic models, model parameters, sampling, monoliths

ВВЕДЕНИЕ

Техногенное загрязнение тяжелыми металлами (ТМ) и естественными радионуклидами природных и сельскохозяйственных ландшафтов имеет широкое распространение. Тяжелые металлы выпадают на земную поверхность при аэротехногенном загрязнении или поступают в почву при внесении удобрений (в наиболее значительной степени это происходит при орошении сточными водами и внесении осадков сточных вод). Почва – депонирующий компонент ландшафта и она сохраняет вышеуказанные элементы неопределенно долгое время, даже если при этом перестают функционировать источники загрязнения. Тяжелые металлы, попадая в почву, преимущественно аккумулируются поверхностными слоями. Однако, исследования почв в динамике, проведенные для длительных временных интервалов, свидетельствуют о миграции тяжелых металлов в почвах [1,2]. Наличие процессов миграции свидетельствует о необходимости сбора эмпирического материала по динамике тяжелых металлов, а также о необходимости математического описания передвижения металлов в почве во времени. Математические модели необходимы для оценки риска опасности загрязнения ландшафта в длительной перспективе и возможности прогнозирования латеральной и радиальной миграции соответствующих элементов на десятки и сотни лет. Для решения этой проблемы были использованы динамические модели [3-5]. Как правило, эти модели в основном применяют для описания поведения легкорастворимых солей или разлагающихся органических загрязняющих веществ, аварийных радионуклидов, а не для характеристики поведения устойчивых к разложению и прочно сорбирующихся почвой ТМ.

ЦЕЛЬ МЕТОДА

Оценить возможность использования малопараметрических динамических моделей радиальной миграции для описания профильных распределений ТМ и составления долговременного прогноза (на основе математической обработки авторских и литературных эмпирических данных о верти-

кальном распределении ТМ по почвенному профилю при многолетних загрязнениях). Собрав информационную базу для широкого набора природных условий, можно попытаться оценить статистические связи параметров моделей миграции с характеристиками почв ландшафтов для последующей интерполяции.

ПРИНЦИП И ПРОЦЕДУРА

Миграция ТМ в почвах при многолетнем загрязнении имеет свои особенности. Это – постоянная смена условий увлажнения и температуры, приводящая то к усилению сорбционных и миграционных процессов, то к их ослаблению. Возможно образование трещин при иссушении почв, и соответственно просыпание вниз наиболее загрязненных частиц почвы с поверхности. Временами могут образовываться почвенные коллоиды, перемещающиеся с потоками влаги и т.д. За много лет эти процессы дают некую усредненную картину вертикального почвенного распределения ТМ, при этом морфологические особенности конкретной почвы могут даже не проявляться. Могут не проявляться и колебания интенсивности выпадений ТМ на поверхность почвы, если только не произошло резкое снижение или повышение среднего уровня выпадений [6]. В результате, параметры математических моделей (как эмпирических, так и полуэмпирических), описывающих распределение ТМ по глубине почвы, могут рассматриваться в качестве постоянных (усредненных, как по времени (годам), так и по глубине).

Наш опыт применения полуэмпирических динамических моделей диффузии и конвективной диффузии к подобным проявлениям миграции подтверждает возможность и оправданность такого подхода [6,7], что значительно упрощает работу с указанными моделями.

При проведении этих работ очень важное значение имеет процедура отбора почвенных образцов. Если для оценки степени загрязнения почв отбирают образцы из слоя 0-10 см (ненарушенные почвы) или 0-20 см (пахотные почвы), то для оценки скорости радиальной миграции такой отбор неприемлем, так как миграция происходит довольно медленно, и градиенты концентрации часто имеют место на первых сантиметрах от поверхности или от нижней границы пахотного слоя. Из-за опасности механического загрязнения при отборе нижележащих слоев следует вести отбор монолитами с ненарушенной структурой, которые затем расчлняются на более тонкие слои, каждый из которых анализируется на содержание тяжелых металлов [8,9]. Поэтому желателен отбор образцов не толще 1-2 см. При изучении менее длительной миграции (месяцы) приходится отбирать образцы даже в 1-2 мм [8]. Подтверждение необходимости такого подхода мы получили, исследуя вертикальную миграцию ТМ в пахотной почве при 20-летнем загрязнении осадками сточных вод: миграцию ниже пахотного слоя мы не обнаружили, хотя другие авторы при отборе буром получали здесь же противоположные результаты.

При изучении миграции оценивают валовое содержание элементов в почве, а содержание различных форм их соединений может быть использовано для интерпретации результатов и создания упомянутой информационной базы данных.

В настоящее время существует много публикаций по характеристике форм соединений тяжелых металлов в почве. Группу соединений тяжелых металлов, извлекаемых из почв определенными экстрагентами (в РФ чаще для этой цели используется ацетатно-аммонийный буферный раствор с рН 4,8), принято называть подвижными. Данный экстрагент был разработан и обычно используется для характеристики поступления ТМ в растения. Убедительных работ, характеризующих корреляционные связи между содержанием подвижных форм и радиальной миграционной подвижностью металлов в настоящее время нет. Проведенные нами исследования на сельскохозяйственных ландшафтах с внесением осадков сточных вод на супесчаных почвах показали наличие связи между высоким содержанием подвижных (переходящих в ацетатно-аммонийную вытяжку) форм кадмия и достаточно активной его латеральной миграцией в ландшафте.

Проведенный нами анализ показал, что в качестве динамических моделей для описания длительной вертикальной миграции достаточно использовать модели диффузии и конвективной диффузии с постоянными параметрами и подбором начальных и граничных условий, соответствующих конкретным обстоятельствам загрязнения [6,7,10]. Адекватность моделей и подобранных параметров конкретным данным оценивали по качественному совпадению расчетных и экспериментальных профилей концентрации, по количественному соответствию этих распределений с учетом экспериментальных ошибок измерения концентраций, по количественному соответствию содержания элемента в профиле почвы сверх фона и рассчитанному по моделям входу элемента в почву за известное время загрязнения.

Из сказанного во введении следует, что подобранные таким образом параметры моделей миграции являются не истинными, а «кажущимися», что не уменьшает их ценность для практического использования.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Апробация метода проведена на данных, полученных в России [6,10], Египте [7], Франции [10], Китае (в печати), причем в Египте – для сельскохозяйственных ландшафтов с многолетним орошением городскими сточными водами. В последнем случае коэффициенты диффузии (D) и конвективной диффузии для всей изученной группы элементов (Cu, Zn, Cd, Fe, Co, Ni, Mn, Pb) имели порядок величины $n \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$; эти очень высокие значения могут быть связаны как с засоленностью этих почв и оросительных вод, так и с возможными недостатками отбора почвенных проб, о чем говорилось выше. В других условиях порядок величин D был значительно ниже (таблица 1.).

Таблица 1. Оценки значений коэффициентов диффузии (D) в почвах различных ландшафтов при многолетних загрязнениях, $D \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$

Элемент	Россия, таежный ландшафт	Россия-Якутия, горно-таежный ландшафт	Франция, пахотная почва (подпахотный слой)	Китай, ненарушенные почвы на лессах
Zn	3.6	-	4.8	0.61
Pb	1.5	-	-	0.9
Cd	-	-	3.9	1.1
Cu	-	-	-	4.4
U	-	1.12	-	-
Th	-	6.8	-	-
Ra	-	1.35	-	-

На рисунке показаны примеры распределения цинка по профилю почв для двух ненарушенных ландшафтов с близкими величинами загрязнения. Видно более крутое падение концентрации для почвы Китая, что соответствует меньшему значению D .

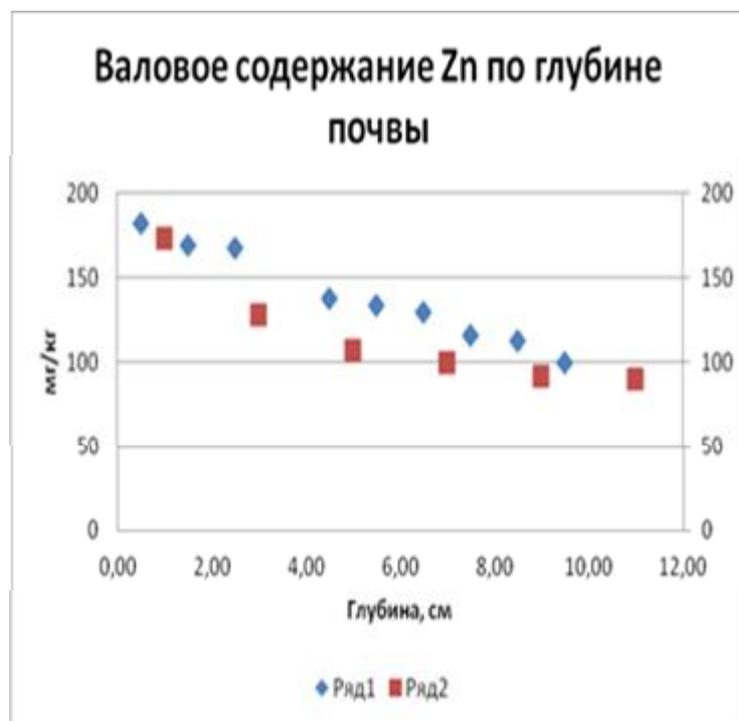


Рис.1. Распределение по глубине валового содержания цинка в загрязненных почвах России и Китая. Обозначения: Ряд 1 – Россия, таежный ландшафт, Ряд 2 – Китай, ненарушенная почва на лессах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Описание длительной (многолетней) радиальной миграции тяжелых металлов и естественных радионуклидов в почвах различных ландшафтов малопараметрическими динамическими моделями диффузии и конвективной диффузии с постоянными по времени и глубине параметрами вполне реализуемо. Проведенные исследования показали перспективность использования существующих математических моделей при прогнозировании загрязненности почвенного покрова тяжелыми металлами в рамках экологического мониторинга. Данные модели могут быть использованы для ретроспективного и перспективного прогноза загрязнения почв.
2. Адекватную картину миграции тяжелых металлов в почвах можно получить только при отборе почвенных проб монолитами с ненарушенной структурой с последующим их расчленением на слои 1-2 см или меньше.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кайданова О.В., Борисочкина Т.И. Изменение содержаний тяжелых металлов и молибдена в природно-антропогенных ландшафтах Курской области // Сборник материалов II Международной научной конференции “Современные проблемы загрязнения почв” т.2. М. МГУ. 2007. с.196-200.
- [2] Плеханова И.О. Самоочищение супесчаных дерново-подзолистых почв при полиэлементном загрязнении при применении осадков сточных вод // Сборник материалов II Международной научной конференции “Современные проблемы загрязнения почв” т.1. М. МГУ. 2007. с.198-202
- [3] Полянин А.Д., Вязьмин А.В., Журов А.И., Казенин Д.А. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса. М.: Факториал, 1998, 368 с.
- [4] Малкович Р.Ш. Математика диффузии в полупроводниках. [Malkovich_R.Sh.]_Matematika_diffuzii_v_poluprovod (BookFi.org).djvu.
- [5] van Genuchten M.Th., Alves W.J. Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation // U.S. Department of Agriculture. Technic. Bul. 1982. № 1661. 151 p.
- [6] Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Использование миграционных моделей при исследовании перемещения тяжелых металлов в загрязненных почвах // Сборник трудов совещания «Проблемы техногенного воздействия на сферу агропромышленного производства: теория и практика (8 июня 2010 г., ВНИИСХРАЭ, Обнинск) / Под ред. акад. Р.М. Алексахина. Обнинск. 2011. С.100-105.
- [7] Фрид А.С., М.А. Гома Ботхина Саад, Т.И. Борисочкина. Миграция тяжелых металлов в аридных почвах Египта, орошаемых природными и городскими сточными водами (подведение итогов) // Агрохимия, 2016, № 11, с.46-57.
- [8] Dorronsoro C., Martin F., Ortiz I, García I., Simón M., Fernández E., Aguilar J., Fernández J. Migration of trace elements from pyrite tailings in carbonate soils // J. Environ. Qual., 2002, vol.31, p.829-835.
- [9] Ruan Xin-Ling, Zhang Gan-Lin, Ni Liu-Jian, He Yue. Distribution and migration of heavy metals in undisturbed forest soils: a high resolution sampling method // Pedosphere, 2008, v.18 (3), p.386-393.
- [10] Фрид А.С., Борисочкина Т.И. Математическое описание миграции тяжелых металлов по профилю почв при длительном агрогенном и техногенном загрязнении // Тез. докл. VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с зарубежным участием научн. конфер., Белгород, 15-22 авг. 2016 г., Москва-Белгород, 2016. Часть II, с.96-97.

**Глава III/67: ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА
КОМПОНЕНТОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ОКРЕСТНОСТЯХ
ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОН-
НОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

**Chapter III/67: Approach to Monitoring the Status and Assessment of the Quality of Environmen-
tal Components in the Vicinity of a Mining and Processing Plant Based on Methods of Remote
Sensing**

**Геннадий П. Глазунов*¹; Владимир М. Гендугов²; Мария В. Евдокимова¹; Мария В. Шеста-
кова¹.**

DOI 10.25680/1255.2018.81.27.260

*Эл. Почта: glazng@mail.ru

1. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Факультет почвоведения, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, 119991 Москва, Россия

2. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Механико-математический факультет почвоведения, Ленинские горы, д. 1, стр. 1, 119991 Москва, Россия

РЕЗЮМЕ. В основе подхода к использованию данных дистанционного зондирования Земли в виде сезонных значений NDVI для оценки состояния и нормирования качества почв и растительного покрова в окрестностях горно-обогатительного комбината – 1) создание математической модели роста и отмирания зеленой биомассы в рамках законов сохранения механики и макроскопической химической кинетики реагирующих биологических систем с использованием теории подобия и анализа размерности, 2) аналитическое решение модели и 3) интерпретация решений. Решение модели при допущении постоянства субстрата, дает макрокинетические характеристики сезонной динамики биомассы (или ее количественной оценки, например, в виде NDVI), характеризующие состояние растительного покрова. Решение модели при фиксированном времени дает особые точки дозовой зависимости, позволяющие найти пороговое для растительного покрова значение результирующей концентрации присутствующих в почве загрязняющих веществ и ранжировать территорию по степени нарушенности в результате загрязнения.

Abstract. We based our approach to the use of remote sensing data in the form of seasonal NDVI values for assessing the status and regulation of soil quality and vegetation cover in the vicinity of the mining plant on the: 1) derivation of mathematical models of growth and decay of green biomass in the framework of the conservation laws of mechanics the macroscopic chemical kinetics of reacting biological systems with the use of similarity theory and dimensions analysis, 2) analytical solution of the model, and 3) interpretation of solutions. The solution of the model under the assumption of the constancy of the substrate, gives the macrokinetic characteristics of the seasonal dynamics of biomass (or its measure, for example, in the form of NDVI) describing the state of the vegetation. The solution of the model for a fixed time gives singular points on the dose-response curve, allowing to find a threshold resultant concentration of a mixture of components as well as of the singular ones and to rank the territory according to the degree of pollution.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ландшафт, качество почв, сезонная динамика растительности, вегетационный индекс, закон биологического роста, закон толерантности, дозовая зависимость

Keywords: landscape, soil quality, seasonal dynamics of vegetation, NDVI, the law of growth, the law of tolerance, dose-response curve

ВВЕДЕНИЕ

Среди глобальных проблем, встающих перед человечеством в XXI веке, как минимум две, продовольственная и экологической безопасности, напрямую связаны с устойчивостью функционирования почв. Для оценки состояния и нормирования качества почв созданы национальные системы мониторинга качества почв и национальные нормативы качества, однако появление новых источников загрязнения и новых загрязняющих веществ делает актуальной необходимость совершенствования систем и методов мониторинга и обновления законодательства.

Среди перспективных систем непрерывного мониторинга параметров окружающей среды наиболее информативны глобальные спутниковые системы, поставляющие в системе открытого доступа многочисленные параметры дистанционного зондирования Земли, полезные в деле оценки состояния и нормирования качества почв и растительности. Высокая степень коррелированности значе-

ний вегетационных индексов и текущей зеленой массы на земной поверхности установлена во многих работах, что позволяет использовать индексы в системах мониторинга. Использование вместо единичных значений вегетационных индексов показателей их сезонной динамики еще более информативно. В качестве информативных показателей, извлекаемых анализом сезонных рядов динамики вегетационных индексов, используют: дату начала вегетационного периода, дату окончания вегетационного периода, продолжительность вегетационного периода, время наступления максимума роста и сам максимум, площадь под сезонной кривой динамики и другие показатели. Теоретическим преимуществом этих показателей является то, что они получены объективными методами на основе математических приемов, часто весьма сложных. Практическим преимуществом многих из этих показателей является то, что для них имеются алгоритмы и методы их автоматической генерации на основе первичных данных дистанционного зондирования Земли. Недостатком этих показателей, сужающим возможности их применения, является то, что они выведены опытным путем на основе произвольных критериев. Устранение этого недостатка, направленное на получение теоретически содержательных показателей сезонной динамики вегетационного индекса, используемых в качестве индикаторов состояния растительного покрова, является одной из задач данной работы.

Другая проблема, требующая решения, – количественный анализ дозовой зависимости с целью извлечения из нее пороговых значений. Решив задачу получения из данных дистанционного зондирования содержательного показателя, характеризующего биомассу растительности, его можно использовать в качестве зависимой переменной зависимости типа доза–эффект, в которой независимой переменной является концентрация загрязняющих веществ в почве. В настоящее время в токсикологии анализ дозовых зависимостей ведут на основе уравнения Хилла, не учитывающего эффект гормезиса. В качестве критерия пороговой концентрации используют либо точку наибольшей выпуклости, либо точку, соответствующую наперед заданному эффекту, например, увеличению угнетения на 5% по сравнению с контролем. Существуют также подходы на основе эмпирических уравнений, учитывающих гормезис, а также подходы с использованием раздельного анализа правых и левых ветвей экспериментальной дозовой зависимости, в том числе с использованием уравнения Митчерлиха. Решение проблемы объективного определения пороговой концентрации на основе анализа эмпирической зависимости доза–эффект находится в сфере теоретических решений, одно из которых и обсуждается в данной статье.

Обычно загрязняющие вещества в почве присутствуют в комплексе. Как правило, с использованием дозовых зависимостей анализируют однокомпонентные смеси в поисках пороговой концентрации одного загрязняющего вещества. В данной работе обсуждается подход, основанный на использовании в качестве независимой переменной результирующей концентрации произвольного числа загрязняющих веществ в форме среднего геометрического из концентраций присутствующих веществ.

При наличии нормативов качества компонентов окружающей среды их оценка сводится к чисто технической задаче систематического применения критерия. При наличии критерия все земли оцениваемой территории делятся по качеству на две категории, загрязненные (концентрация загрязнителя в почве больше норматива) и незагрязненные (концентрация загрязнителя в почве меньше норматива). При наличии критериальных таблиц возможно более дробное деление территории по критерию качества. При отсутствии нормативов ранжированию предшествует построение и анализ экспериментальных дозовых зависимостей с целью получения пороговых значений, пригодных для нормирования и оценки качества компонентов среды. Проблемы, требующие решения при выполнении этой задачи, и предложения по их решению являются предметом данной статьи. Кроме того, предметом статьи является обоснование возможности использования данных дистанционного зондирования в качестве источника сведений для получения пороговых значений концентраций загрязняющих веществ методом анализа дозовой зависимости. В случае необходимости дробного ранжирования территории по содержанию загрязняющих веществ критериальная таблица может быть получена из той же экспериментальной дозовой зависимости путем анализа производных второго и третьего порядков.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Обоснование подхода к мониторингу состояния и нормированию качества компонентов окружающей среды путем: а) моделирования сезонной динамики вегетационного индекса в рамках представлений сплошной среды на основе законов сохранения механики и макроскопической химической кинетики реагирующих биологических систем с применением теории подобия и анализа раз-

мерности, б) анализа и исследования решений модели, получаемых в двух приближениях, (1) постоянства начальной концентрации компонентов субстрата, (2) постоянства времени, в) подгонки модели роста, получаемой в результате решения уравнений модели в приближении (1) к сезонным значениям вегетационного индекса NDVI для точек на поверхности Земли, обеспеченных наземными экспериментальными данными, г) подгонки модели толерантности, получаемой в результате решения уравнений модели в приближении (2) к одновременным (время достижения максимума роста) значениям вегетационного индекса NDVI для точек на поверхности Земли, обеспеченных наземными экспериментальными данными, д) интерпретации дозовой зависимости для NDVI в окрестностях горно-обогатительного комбината в рамках модели с получением пороговых значений концентрации загрязняющих веществ и особых точек дозовой зависимости и е) получения критериальной таблицы для ранжирования территории в окрестностях горно-обогатительного комбината по степени загрязнения почв на основе данных дистанционного зондирования.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА НА МНОГОКОМПОНЕНТНОМ СУБСТРАТЕ

Кинетические исследования роста на многокомпонентных субстратах широко используются в количественной биологии. Обычно в них сочетаются измерение динамики роста в функции начальных концентраций компонентов субстрата и анализ с использованием систем дифференциальных уравнений, моделирующих рост. Нелинейность этих систем является причиной преобладания численных методов их решения. В рамках представлений сплошной среды на основе законов сохранения механики и макроскопической химической кинетики реагирующих биологических систем с применением теории подобия и анализа размерности

выведена [2] модель роста клеточных популяций на субстрате с многими компонентами:

$$q = a (tz)^{-b} \exp \left(\frac{\alpha k}{\epsilon t z} \right),$$

где q – показатель роста, t – время от начала роста, z – среднее геометрическое из концентраций утченных компонентов субстрата, a, b, k – эмпирические коэффициенты, являющиеся свертками множества стехиометрических коэффициентов химических реакций и биохимических превращений, определяющих рост. В случае постоянства z эта переменная включается в константы модели роста:

$$q = A (t)^{-B} \exp \left(\frac{\alpha K}{\epsilon t} \right),$$

где A, B, K – эмпирические коэффициенты, являющиеся свертками мно-

жества стехиометрических коэффициентов химических реакций и биохимических превращений, определяющих рост, и начальных концентрации компонентов субстрата, z .

Модель характеризуется наличием шести особых точек, разграничивающих семь фаз роста, характеризующихся собственным набором значений кинетических характеристик (скоростей роста, ускорений роста). При стремлении времени к нулю правая часть также стремится к нулю, поэтому в точке $t=0$ величина q доопределяется значением $q=0$, что не противоречит общебиологическим представлениям. При стремлении времени к бесконечности правая часть также стремится к нулю, что также не противоречит общебиологическим представлениям. Модель позволяет обоснованно и точно определить границы фаз роста по экспериментальной динамике роста.

В случае постоянства t эта переменная включается в константы модели:

$$q = a (z)^{-b} \exp \left(\frac{\alpha k}{\epsilon z} \right),$$

где a, b, k – эмпирические коэффициенты, являющиеся свертками множе-

ства стехиометрических коэффициентов химических реакций и биохимических превращений, определяющих рост, и фиксированного времени наблюдения над ростом, t .

График модели, имеющий вид деформированного колокола, характеризуется наличием шести особых точек, разграничивающих семь интервалов в фазовом пространстве зависимости роста от концентрации z , характеризующихся собственным набором значений "кинетических" характеристик.

Модель, по сути представляющая собой математическое выражение закона толерантности, полезна при анализе дозовых зависимостей и экологическом нормировании.

Особая точка	Диапазон	q	$\frac{dq}{dz}$	$\frac{d^2q}{dz^2}$
z_0 – начала наблюдений	$z_0 < z \leq z_1$	+ -	+ -	+ -
z_1 – наибольшей вогнутости слева от максимума	$z_1 < z \leq z_2$	+ -	+ -	+ -
z_2 – перегиба слева от максимума	$z_2 < z \leq z_3$	+ -	+ -	- -
z_3 – наибольшей выпуклости слева от максимума	$z_3 < z \leq z_4$	+ -	+ -	- -
z_4 – максимума	$z_4 < z \leq z_5$	+ -	- -	- -
z_5 – перегиба справа от максимума	$z_5 < z \leq z_6$	+ -	- -	+ -
z_6 – наибольшей вогнутости справа от максимума	$z_6 < z$	+ -	- -	+ -

Здесь "+"- функция положительна, "-"- функция отрицательна, "- -" функция растет, "- -" функция убывает. При стремлении z к нулю правая часть также стремится к нулю, поэтому в точке $z=0$ величина q доопределяется значением $q=0$, что не противоречит общебиологическим представлениям.

Проверку адекватности решений модели в форме приведенных уравнений проводили их подгонкой к экспериментальным дозовым зависимостям субстрат индуцированного микробного дыхания в образцах черноземных почв из окрестностей горно-обогатительного комбината [1] от валового содержания (мкг/г) химических элементов (Li, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, Pb) и максимального за сезон значения вегетационного индекса от содержания этих же элементов для соответствующих пунктов (рис. 1), а также к сезонной динамике вегетационного индекса для этих же пунктов.

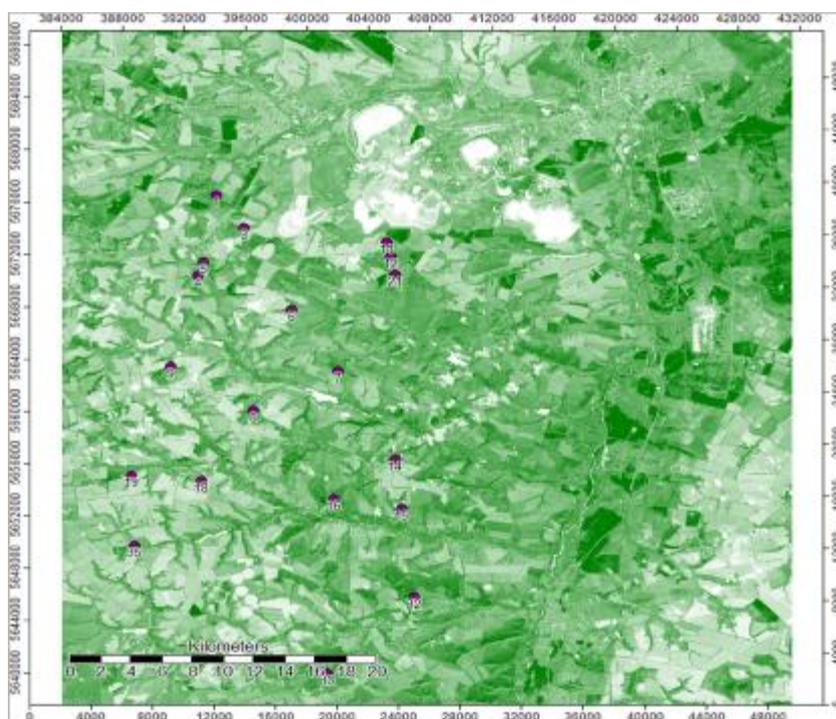


Рисунок 1 - Карта значений индекса NDVI в марте 2013 для окрестностей горно-обогатительного комбината в Белгородской области и положение точек взятия проб для анализа химического состава и определения микробного дыхания из [1] (объекты горно-обогатительного комбината изображены в виде группы белых пятен сверху снимка)

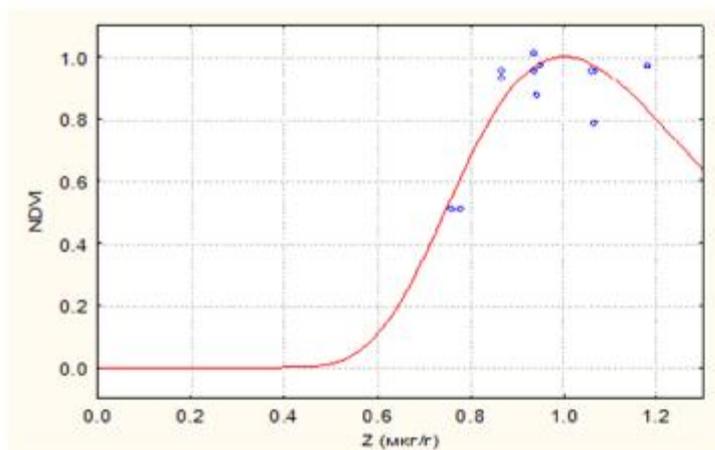


Рисунок 2 - Зависимость значений индекса NDVI в 2013 для окрестностей горно-обогатительного комбината в Белгородской области от результирующей концентрации химических элементов в почве (точки – значения NDVI для мест взятия почвенных проб для химического анализа, линия – подгонка модели)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выведенная модель адекватна экспериментальным данным по: а) сезонной динамике вегетационного индекса, б) зависимости максимальных за сезон значений вегетационного индекса от результирующей концентрации всех изученных элементов, их сочетаний и индивидуальных концентраций с разной степенью тесноты связи, в) зависимости субстрат индуцированного дыхания от результирующей концентрации всех изученных элементов и их сочетаний.
2. Выведенная модель пригодна для выявления макрокинетических показателей сезонной динамики вегетационного индекса и для анализа дозовых зависимостей с целью нахождения пороговых концентраций индивидуальных загрязняющих веществ и их комплексов.
3. Выведенная модель пригодна для создания критериальных таблиц на основе особых точек модели для целей экологического нормирования.
4. Показана приемлемость предложенного подхода для целей мониторинга экологического состояния территорий инормирования их качества в окрестностях горно-обогатительного комбината в Белгородской области.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бакунович Н.О., Хохлова О.С., Мякшина Т.Н., Русаков А.В., Шаповалов А.С. Загрязнение тяжелыми металлами и дыхательная активность микроорганизмов в нативных почвах и искусственных субстратах (на примере заповедного участка “Ямская степь”) Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2016. № 85. С. 131-149.
- [2] Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Макрокинетическая модель микробного роста на многокомпонентном субстрате Вестник Московского университета. 2014. Серия 17. Почвоведение, № 3, с. 10-16

Chapter III/68: THE USE OF HYPER SPECTRAL DATA FOR CROP CLASSIFICATION USING MACHINE LEARNING

Глава III/68: Использование гиперспектральных данных для классификации культур с использованием машинного обучения

Ralf Wieland*; Batunacun

DOI 10.25680/1530.2018.89.32.261

*Email: rwieland@zalf.de

Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Eberswalder Str. 84, 15374 Muencheberg, Germany

ABSTRACT. A set of ground truth hyper spectral data was prepared and stored as open data using a GitHub repository. From this data set a subset was selected according to the satellites bands of Sentinel 2. Five popular machine learning algorithms (adaboost, decision tree, logistic regression, random forest and support vector machine) were selected to train plant classification models. The models were evaluated using the statistical measures: precision, recall and f1score. Additionally, some pros and cons of the used machine learning methods were discussed. The support vector machine and the logistic regression produced the highest statistical measures. The implementation is presented as open source software on the same Github repository. The aim of this article is to introduce in machine learning using of hyper spectral data. Additionally, the paper enables the user to experiment independently with the models, to combine them, to compile the data differently, etc.

Резюме. С помощью репозитория GitHub был подготовлен и сохранен в виде открытых данных набор гиперспектральных данных наземного контроля. Из этого набора данных было выбрано подмножество в соответствии с полосами спутников Sentinel 2. Для подготовки моделей классификации растений были выбраны пять популярных алгоритмов машинного обучения (Ada-Boost, дерево принятия решения, логистическая регрессия, метод случайного леса и опорных векторов). Модели оценивались с использованием статистических показателей: точности, отзыва и f1оценки. Кроме того, обсуждались некоторые плюсы и минусы используемых методов машинного обучения. Методы опорных векторов и логистическая регрессия дали самые высокие статистические показатели. Реализация представлена в виде программного обеспечения с открытым исходным кодом в том же репозитории GitHub. Цель этой статьи - ввести в машинное обучение использование гиперспектральных данных. Кроме того, результаты, изложенные в статье, позволяют пользователю самостоятельно экспериментировать с моделями, комбинировать их, по-разному компилировать данные и т. д.

KEYWORDS: hyper spectral data, satellite based data, Sentinel2, machine learning, Python programming

Ключевые слова: гиперспектральные данные, спутниковые данные, Sentinel2, машинное обучение, программирование на Python

INTRODUCTION

Remote sensing based on airborne and spaceborne platforms provides valuable data for mapping, environment monitoring, disaster management and civil and military intelligence. In the example the remote sensing is used to determine agricultural crops from satellite images of different spectral bands. However, the satellites have some limitations. Firstly, the spectrum is limited to a set of spectral bands ("Sentinel 2" [1]) has 13 bands), and has specific resolution (10m, 20m, 60m).

The actual Landsat [2] has 12 spectral bands with two resolutions (30m, 100m). Secondly, more important is the satellite data can be only used if the sky is cloud free. The restriction of the spectral bands and the time between two overflights are limiting factors in the use of satellite images.

Hyper spectral data provide larger spectral range and can be used without the limitations of real satellite images. So is the spectra not divided into small bands and the sampling do not depend on the overflight of the satellite.

The presented hyper spectral data were sampled using a field spectrometer: "FieldSpec Pro JR (A 110080) of the American company "Analytical Spectral Devices". The hyper spectral data comprises a spectral range from 350nm to 2500nm with a spectral resolution of 1nm. The modeler can use the complete spectra or select some bands for modeling. This opens new options: the modeler can investigate how available satellites images can be used by selecting the bands of a satellite, he can combine data from

different satellites, the modeler can estimate the most informative spectral range for crop classification, etc.

The third part of the use of spectral data is machine learning. For a crop classification based on satellite images the modeler has to build a model which estimates the crop. The hyper spectral data can be used for training of model using machine learning algorithms. The open source software "scikit" [3] provide a set of well tested machine learning algorithms implemented in Python. Additionally, Scikit includes methods for preprocessing the data and of the statistical analysis of the results which are really helpful for implementation of machine learning programs (Scikit acts as Python module inside a Python program which has to be programmed by the modeler).

DATA AND METHODS

The data were sampled next to Muencheberg(Fig.1), a small town located 50km east of Berlin using the FieldSpec Pro JR (A 110080) in the season of 2002. The data are stored in Excel for a set of selected agricultural crops: (Alfalfa, Cocks Grass, Lupin, Pea, Potato, Silo Maize, Triticale, Winter Barley, Winter Rape, Winter Rye, Winter Wheat). Each file contains the hyper spectral data for different plots and different sensing times. The Python script "gen_sample_all.py" reads the data and transform it so that it can be used for training.



Figure 1: Measuring hyper spectral data of a cereal field using a field spectrometer

As machine learning methods were used a set of popular algorithms: Adaboost [4], Decision Tree (DTree) [5], Logistic Regression (LogReg) [6], Random Forest [7] and the Support Vector Machine (SVM) [8]. This set can be easily expanded using scikit.

The machine learning algorithms implemented as Python program (Adaboost.py, DTree.py, LogReg.py, Random_Forest.py and SVM.py) uses the "gen_sample_all.py" to read the data. Each model can run autonomous and depends on Python, the numeric package numpy and scikit which should be installed. The programs run in an terminal and write the output back into the terminal. The user can modify the inputs, the hyper parameters (to control the training) and the output statistics according his wishes.

The data set was randomly split into a part used for training and a part used for testing (training:testing=67:33). The testing part was used to produce the confusion matrix and the classification statistics based on precision and recall. The precision is defined as:

$$precision = \frac{T_P}{T_P + F_P} \quad (1)$$

The recall is defined as:

$$recall = \frac{T_P}{T_P + F_n} \quad (2)$$

and f1score used precision and recall:

$$f1score = 2 * \frac{precision*recall}{precision+recall} \quad (3)$$

Tp means true positive (the true value was positive and the predicted values was positive too), Fp means false positive (true value is negative, predicted values was positive), Fn means false negative (the true value is positive the predicted value was negative).

RESULTS AND COMPARISON OF THE ALGORITHMS

In the example the crops: (Silo Maize, Potato, Winter Rape, Winter Wheat, Winter Rye) was used to build the model. The user can select the time of the sample by an index ∈ 0..4, the medium sample (index=2) is used by default.

The table 1 summarizes the training quality using a confusion matrix for the DTree.

The table 1 shows some differences from the main diagonal, that means training errors. It should be remarked that the result based on one selected training run and should repeated for statistical valid results.

Table 1: Confusion matrix Dtree, X=true input, Y=simulated

		Y				
X	9	0	1	0	0	
	0	3	0	1	0	
	0	0	8	0	0	
	0	0	0	6	0	
	1	0	0	0	2	

For one training run a table 2 containing the precision, the recall and the f1score can be made from the confusion matrix:

Table 2: RTree, precision, recall, f1score for on training run

	precision	recall	f1score
Winter Rape	0.90	0.90	0.90
Winter Rye	1.00	0.75	0.86
Winter Wheat	0.89	1.00	0.94
Silo Maize	0.86	1.00	0.92
Potato	1.00	0.67	0.80
total	0.91	0.90	0.90

To overcome the variance of different runs a cross validation (with cv=10) of the training was applied. The table 3 summarizes the results of all used machine learning algorithms:

Table 3: Result of cross validation c=10

Name	Precision		Recall	
	mean	std	mean	std
Adaboos	0.8844	0.078	0.887	0.105
Dtree	0.733	0.182	0.742	0.168
LogReg	0.921	0.071	0.911	0.085
Random_Forest	0.908	0.092	0.905	0.072
SVM	9.926	0.067	0.921	0.092

The SVM was the best training algorithm in this example but all the other did a good job too. The training time was so short that no significant different could be seen. For a larger data set or combination of different training algorithm the training time could be an important value.

All algorithms need so called 'hyper parameter' which controls the training. SVM used: kernel='rbf', C=1000, gamma=0.1 as hyper parameters. These parameters must be updated (optimized using grid search) during the model construction procedure. This can be a time consuming process.

REMARKS ABOUT MACHINE LEARNING

Before a machine learning procedure can be applied to the data set, the data set itself has to be prepared. In the example the hyper spectral measurement has to be calibrated, the data has to be corrected, for example by removing the water bands and interpolation the gaps using a polynomial of fourth order. In general the modeler has to take care about the data, remove outliers, fill gaps etc. the scikit can support the modeler but the modeler is responsible for the data integrity.

The provided hyper spectral data were sampled at different dates. This can be used to train models for each sample date and combine the models. At different dates the crops are in different grow states. The knowledge about the growth of the plants can help to get better classification results for selected crops. Such a sequential model refinement (using models with different f1scores for the crops) can be helpful in many ways. For example an satellite image made early in the season can be used for a first estimation of the crop distribution which can be refined using later satellite images. Another idea is to include the a priori knowledge about well known crop distribution from the last years can help to improve the models accuracy [9].

The machine learning algorithms used in this paper are selected due to its popularity. For a real project each algorithm has its own specific which has to take into account. For example the DTree can be easily interpreted by the modeler which could be a reason to prefer it despite of its poor accuracy. A grid search to find appropriate hyper parameters can be a time consuming process. A random forest algorithm has a lot of hyper parameters (n_estimators, criterion, max_features, ...) but the default parameters produce often a satisfying result so the random forest can be used without adapting the hyper parameters in many cases. The SVM on the other hand has less hyper parameters but without a fine tuning it should not be used.

The presented data set and the open source software can be used as a basis for training in machine learning. You can expand the software according your interests. You could combine different models, could select different sample data, could combine models at different sample dates, etc. Even when the spectral data is not portable to your region you can check if a field spectrometer could be useful for you. The data and the software can be found at: <https://github.com/Ralf3/Remote-Sensing>.

CONCLUSIONS

1. Hyper spectral data is high precision ground truth data.
2. Data needs to be preprocessed before they can be used for machine learning.
3. Machine learning methods differ in accuracy, the number of hyper parameters and many others and should be selected with care.
4. Only the open science idea: to combine data and methods as open source give the user the freedom that he needs to make science.

ACKNOWLEDGEMENT

We want to thank our former Colleague Dr. Bernd Zbell for the data collection and we want to thank the Python community providing the the wonderful scikit-learn. This paper was funded by the Federal Ministry of Food and Agriculture and the Ministry for Science, Research and Cultures of the State of Brandenburg (MWFK), Germany.

REFERENCES

- [1]http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2
- [2]<https://landsat.usgs.gov/landsat-8>
- [3]F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, E. Duchesnay. 2011. Scikit-learn: Machine Learning in Python, Journal of Machine Learning Research, 12, pp. 2825-2830
- [4]Freund, Y., R. Schapire 1995. A Decision-Theoretic Generalization of on-Line Learning and an Application to Boosting, Journal of Computer and System Sciences, Volume 55, Issue 1, pp. 119-139
- [5]Breiman, L., J. Friedman, R. Olshen, C. Stone 1984. Classification and Regression Trees, Wadsworth, Belmont, CA, 1984., 368p.
- [6]Aurelion Geron 2017. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn & TensorFlow

O Reilly, 543p. pp. 134-144

[7]Liaw A., M. Wiener (2002). Classification and Regression by randomForest. R News 2(3), pp. 18-22.

[8]Chang, Chih-Chung, Lin, Chih-Jen 2011. LIBSVM: A library for support vector machines, ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, Vol. 2(3) pp. 21-27

[9]Bishop Ch. M. 2006. Pattern Recognition and Machine Learning, Springer 729p.

**Глава III/69: МЕТОДЫ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В
БАССЕЙНЕ Р. ОКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЛЬЕФА, КЛИМАТА И ПОЧВ
Chapter III/69: Methods for Forecast of Winter Wheat Yield in the Oka Basin Using Relief, Cli-
mate and Soil Data**

Петр А. Шарый^{*1}, Лариса С. Шарая², Ольга В. Рухович³

DOI 10.25680/2042.2018.37.32.262

*Эл. Почта: p_shary@mail.ru

1.Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ул. Институтская д.2, 142290 г.Пушино Московской области, Россия

2.Институт экологии Волжского бассейна РАН, ул. Комзина д.10, 445003 г.Тольятти Самарской области, Россия

3.Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии РАН, ул. Прянишникова д.31а, 127550 г.Москва, Россия

РЕЗЮМЕ. Хотя в глобальном изменении климата с 1998 г. наблюдается пауза, ее нет в России; поэтому для России актуален прогноз урожайности сельскохозяйственных культур. Анализ одновременного влияния природных факторов (климата, почв и рельефа) на урожайность озимой пшеницы в Нечерноземной области для современного периода выявил, что ведущим является микроклимат, описываемый освещенностью мезосклонов, и который не учитывался ранее в исследованиях. Построена прогнозная модель урожайности озимой пшеницы на 2050 г. с использованием прогнозной климатической модели E GISS НАСА. Для учета важных для урожая хронологически последовательных климатических факторов, запрещенных к введению в регрессионные модели из-за тесной связи между ними, введен новый фактор – *климатический инвариант*. Пространственная гетерогенность прогнозируемой урожайности существенна и определена не только климатическими изменениями, но и освещенностью мезосклонов: на более освещенных склонах прогнозируется ее возрастание в 1.6–1.9 раз по сравнению с менее освещенными. Эти различия важны при планировании посевных площадей к 2050 г.

Abstract. Although some hiatus is observed in global climate change since 1998, it is absent in Russia; hence a forecast of crop production is actual for Russia. Our analysis of influence of natural factors (climate, soils, and topography) to winter wheat in Non-Chernozem region of Russia showed that the impact of microclimate is a leading factor and was not taken into account in previous studies. We have developed a forecast model for winter wheat for 2050 using climate projection using the E GISS model of the NASA. To take into account important for crop yields chronologically sequential climatic factors into regression models, we suggest a new factor – *climatic invariant*. The spatial heterogeneity of crop yield is essential and is defined not only by the climate change, but also by slope insolation: crop yields on more insolated slopes are 1.6–1.9 times greater than on other slopes. These distinctions are important for planning crop areas in 2050.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: озимая пшеница, прогноз, рельеф, регрессия

Keywords: winter wheat, forecast, topography, regression

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость адаптации сельского хозяйства России связана с глобальным изменением климата: при глобальном росте температуры 0.17 °C/10 лет за 1976–2015 гг., за тот же период рост температуры в России составил 0.45 °C/10 лет [1]. Хотя с 1998 года наблюдается пауза в глобальном

потеплении, $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ [2], а современные модели климата предсказывают глобальное потепление $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$ [2], это расхождение прогнозов и наблюдений не отмечается в России, где нет этой паузы [1], а климатические нормы существенно превышены уже сегодня. Поэтому существующие прогнозы изменения климата здесь могут рассматриваться как более надежные, если рассматривать их на не слишком длительный период, 30–60 лет.

В настоящей работе для построения региональной прогнозной модели урожайности озимой пшеницы на 2050 год мы использовали описанную нами ранее [3] модель пространственной вариабельности озимой пшеницы для запада Окского бассейна (Нечерноземная зона России, Рис.1). Эта модель показала, что урожайность культуры зависит не только от климата региона и типов почв, но и от освещенности мезосклонов (характеристики рельефа), которая по влиятельности превосходит все другие факторы среды.

Обычные препятствия при построении регрессионной модели урожайности состоят: (А) в низких коэффициентах детерминации между урожайностью и факторами среды, такими как почвы, климат и рельеф (R^2 от 0.29 до 0.41 [4]), и (Б) в трудностях учета микроклимата. Одной из причин (А) является трудно учитываемая история полей, для решения препятствия (Б) необходимым оказался учет рельефа, определяющего изменение микроклимата.

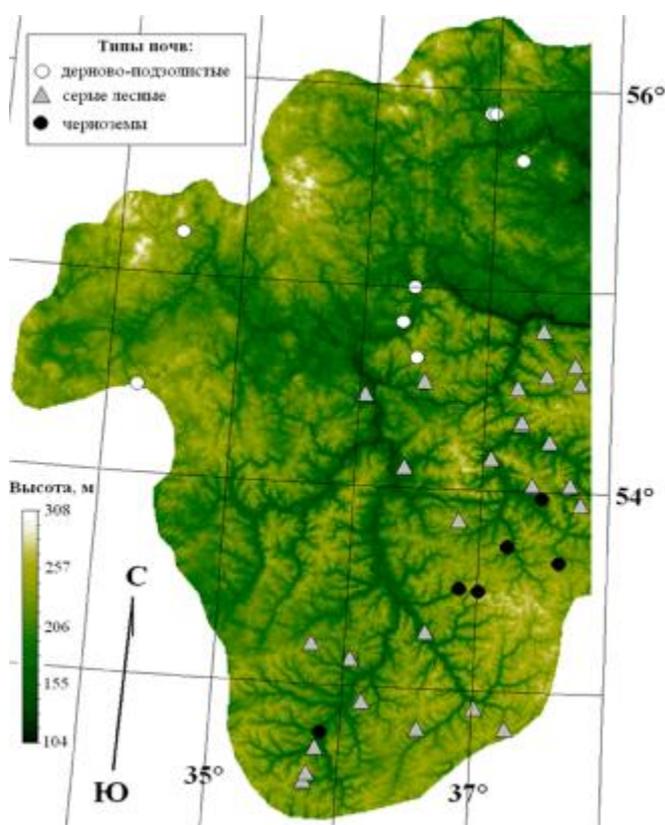


Рисунок 1. Участок исследования и точки наблюдения

Для решения задачи (А) урожайность характеризовалась в [3] тремя усредненными по годам показателями: (1) максимальная по опыту (получаемая при внесении оптимальной дозы удобрений), (2) контроль (без внесения удобрений) и (3) максимальная прибавка, то есть разность (1) и (3). Для озимой пшеницы прибавка составляет 60% от контроля. Поскольку история полей входит в опыт и контроль, то она играет значительно меньшую роль в их разности, то есть в прибавке. Последняя поэтому наиболее тесно связана с природными факторами [3].

Для решения задачи (Б) использовалась предложенная нами в [5] освещенность склонов, характеризующая перпендикулярность падения солнечных лучей на земную поверхность, отражающая в большей степени, чем экспозиция, тепловой и световой режим склонов. Использовался шаг решетки 600 метров, отвечающий описанию мезорельефа, поскольку, как показывают исследования физики атмосферы [6], перенос тепла потоками воздуха близ земной поверхности усредняет тепловые эффекты малых форм рельефа, делая влияние микрорельефа несущественным. Была получена регрессионная модель с $R^2 = 0.740$, где главным предиктором оказалась описывающая микро-

климат освещенность склонов с юго-запада, но важны были также типы почв, осадки февраля и сумма годовых осадков [3].

Целью данной главы является построение пространственно-временных моделей урожайности озимой пшеницы с учетом влияния климата, мезорельефа и почв для выяснения изменений урожайности при прогнозируемом изменении климата.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученная в [3] регрессионная модель для базового (современного) периода есть

$$\text{Прибавка} = 4.292F(35^\circ, 235^\circ) + 3.411P_{\text{feb}} + 0.202ИИД F(35^\circ, 235^\circ) - 0.299P_{\text{year}} - 151.61, \\ R^2 = 0.740, P < 10^{-6} \quad (1)$$

Эта модель объясняет 74% дисперсии прибавки. Здесь $F(35^\circ, 235^\circ)$ есть освещенность склонов с юго-запада (азимут Солнца 235° , склонение от горизонта 35°), P_{feb} – осадки февраля, P_{year} – среднегодовые осадки, индикаторная переменная $ИИД$ равна 1 для дерново-подзолистых почв и 0 для остальных. По модели (1) рассчитана карта пространственного распределения прибавки, см. Рис.2.

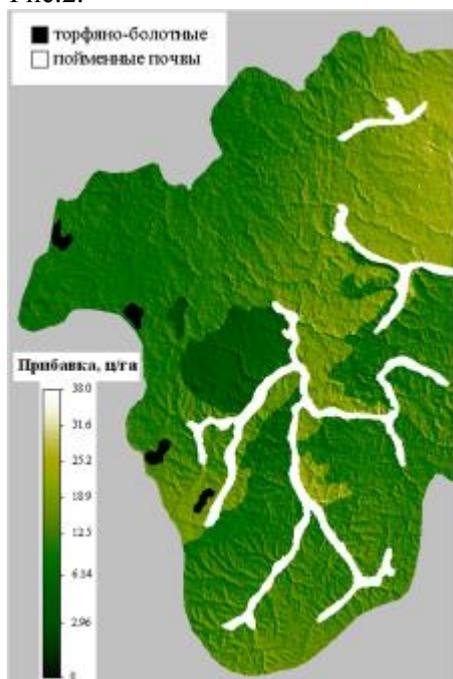


Рисунок 2. Карта прибавки к урожаю озимой пшеницы, построенная по модели (1). Торфяно-болотные (черный) и пойменные (белый) почвы исключены из рассмотрения, поскольку в них не было точек наблюдения.

Данные об урожайности взяты из базы данных «Агрогеос» [7], о рельефе – SRTM30, о климате – усредненные за 50 лет данные WorldClim [8], о почвах – из почвенной карты М 1 : 2.5 млн.

Согласно модели (1), где предикторы расположены в порядке убывания их значимости (слева направо) главную роль в пространственной вариабельности прибавки мягкой озимой пшеницы *Triticum aestivum* L. играет микроклимат, то есть освещенность склонов с юго-запада $F(35^\circ, 235^\circ)$. При изменении освещенности всего лишь на 5%, то есть на 25 Вт/м^2 , средняя урожайность озимой пшеницы изменяется в 1.86 раза, а прибавка – в 2.09 раз.

Для изучения изменения урожайности озимой пшеницы со временем использовался прогноз по модели изменения климата E GISS (НАСА) на 2050 год. Как отмечено во Введении, эту модель можно рассматривать как сравнительно надежную в России.

При рассмотрении влияния изменения климата на урожайность сельскохозяйственных культур возникают две дополнительные трудности. Первая заключается в том, что здесь важны не только сами показатели климата, но и хронологическая последовательность их действия. Например, если теплая весна наступает после обильных снегов в конце зимы, то это благоприятно для урожаев озимой пшеницы. Вторая состоит в том, что соответствующие климатические переменные могут быть зависимы, в то время как регрессионная модель требует независимости факторов среды.

Мы обходим обе эти трудности с помощью введения «климатического инварианта», то есть такого сочетания температур и осадков, которое меньше всего варьирует в пространстве [9] и потому может рассматриваться как стабильное. Это сочетание включается в регрессионную модель, и

если оно там значимо, то может описывать совместное влияние температур и осадков, включая хронологически последовательные показатели, не нарушая запретов регрессионных моделей.

Если две величины, X и Y , отрицательно связаны между собой в пространстве, то их стабильное сочетание есть $X+aY$, где параметр a определяется по формуле [9]

$$a = \frac{\bar{Y} + A |r| \bar{X}}{A(\bar{X} + |r| \bar{Y})}, \text{ где } A = \frac{SD_Y}{SD_X} \text{ и } a > 0; \quad (2)$$

здесь r есть коэффициент корреляции Пирсона между X и Y , их средние обозначены как \bar{X} и \bar{Y} , стандартные отклонения – как SD_X и SD_Y . Формула (2) применима и при положительной связи между X и Y , когда стабильное сочетание есть $X + a(2\bar{Y} - Y)$ [9].

Используя формулу (2) и наибольшее R^2 в модели регрессии, находим, что инвариант для изучаемой территории есть $INV = P_{feb} + a(2\overline{T_{spring}} - T_{spring})$, где T_{spring} есть средняя многолетняя температура весны в данной географической точке, а $\overline{T_{spring}}$ – ее среднее в пространстве. Найденное по формуле (2) значение a равно 3.313 мм/градус. Карта INV показана на Рис.3. Уравнение регрессии для прогноза прибавки на 2050 год есть

$$\text{Прибавка} = 4.462F(35^\circ, 230^\circ) + 10.20ИНДТ_{march-april} - 0.6987P_{summer} + 1.462INV - 153.9; \quad R^2 = 0.756, P < 10^{-6}. \quad (3)$$

Эта модель объясняет 76% дисперсии прибавки. Здесь $ИНДТ_{march-april}$ есть средняя сумма температур марта и апреля для дерново-подзолистых почв, P_{summer} есть средняя многолетняя сумма летних осадков для 2050 г., остальные предикторы объяснены выше. Как и в модели (1), описывающая микроклимат освещенность склонов с юго-запада играет главную роль. Прогнозная карта показана на Рис.4. На изученной территории к 2050 г. прогнозируется среднее возрастание прибавки на 25%.

Эта карта прогнозирует существенное увеличение прибавки на севере региона и уменьшение – на юге, по сравнению с базовым (современным) периодом.

Заметная пространственная неоднородность прогнозируемой прибавки на карте Рис.4 является результатом изменения прибавки вследствие изменения прогнозируемых: температур весны для дерново-подзолистых почв, инварианта и летних осадков изученной территории. Карта разности между прибавками прогнозного и базового периодов отражает изменения климатических показателей, прогнозируемых моделью E GISS на 2050 г., Рис.5.

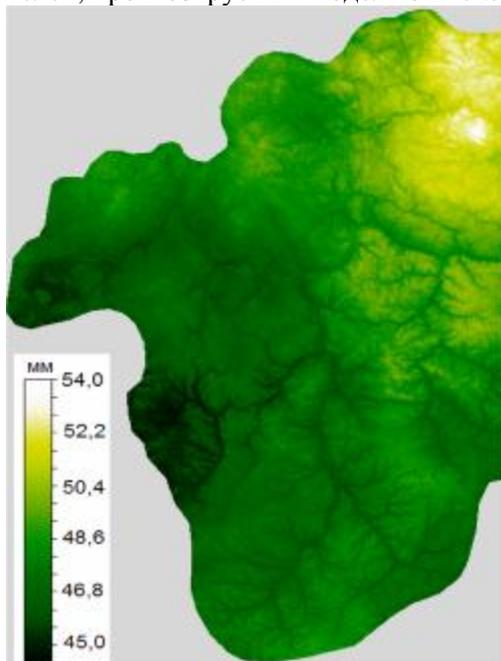


Рисунок 3. Карта найденного стабильного сочетания INV температур и осадков для участка исследования. Эта величина, INV , описывает повторяющуюся много лет хронологическую последовательность действия осадков февраля P_{feb} и температуры весны T_{spring} на урожайность озимой пшеницы.

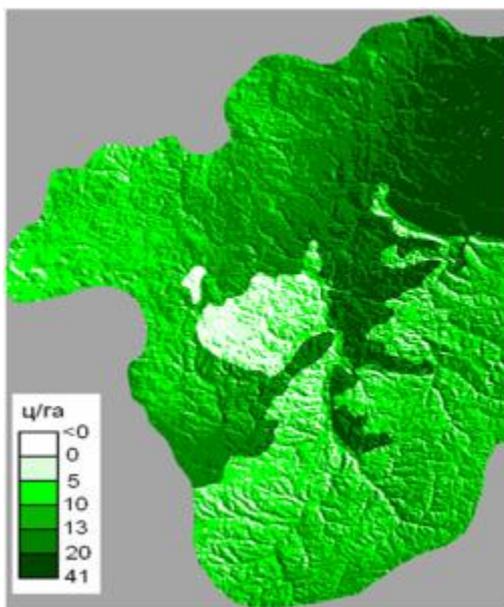


Рисунок 4. Прогнозная карта прибавки к урожаю озимой пшеницы на 2050 год для того же участка исследования, рассчитанная по модели (3).

Представленные результаты показывают, что учет освещенности мезосклонов при планировании посевов озимой пшеницы в условиях меняющегося климата может привести к получению больших урожаев, и даже небольшие изменения в освещенности (на 25 Вт) способны приводить к большим (в 1.6–1.9 раз) изменениям в урожайности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для западной части Окского бассейна с учетом почв, климата и рельефа получены прогнозные оценки изменения показателей урожайности озимой пшеницы на 2050 г. в связи с изменением климата и рассчитана их подробная карта.
2. Показано, что при выборе посевных площадей важен учет микроклимата, который отражается характеристикой рельефа – освещенностью мезосклонов.
3. Для изученного региона целесообразно использовать в первую очередь освещенные с юго-запада мезосклоны, на которых прибавка к урожайности возрастает в полтора-два раза.
4. У метода есть потенциал для более корректной оценки прогнозируемой урожайности и ее детального картографирования.

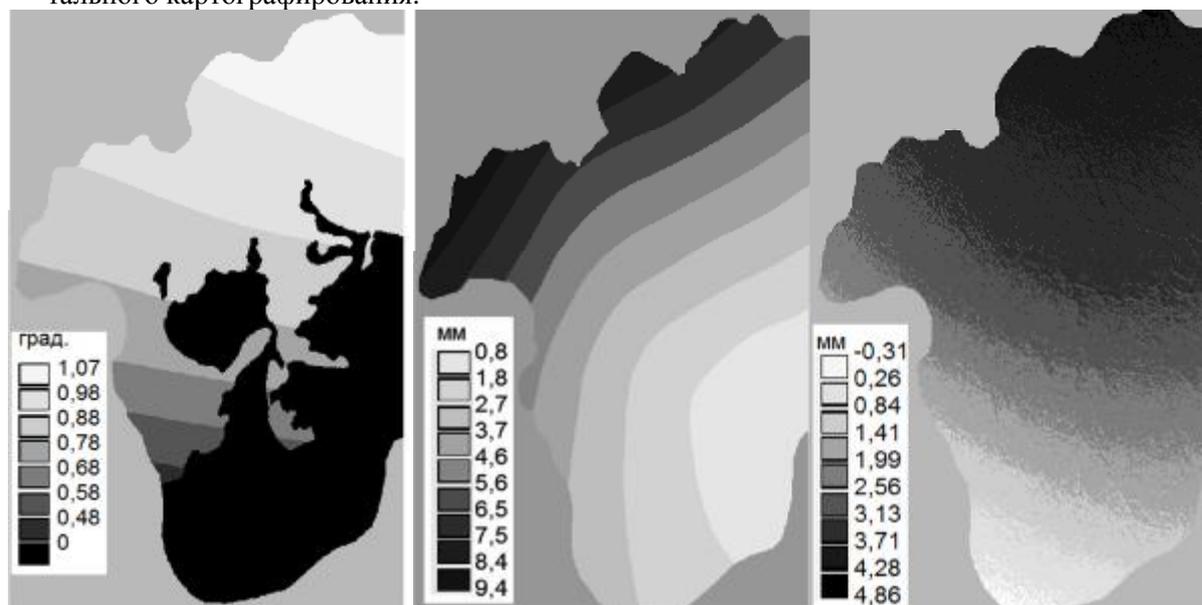


Рисунок 5. Карты изменения средней температуры марта-апреля для дерново-подзолистых почв (слева), суммы осадков лета (в центре) и инварианта (справа) на 2050 г.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Росгидромет, 2016. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2015 год. М.: Росгидромет. 67 с.
- [2] Tollefson J., 2014. Climate change: The case of the missing heat. *Nature* 505: 276-278.
- [3] Shary P.A., Rukhovich O.V., Sharaya L.S., 2016. Analytical and cartographic predictive modeling of arable land productivity. In: Mueller L., Sheudshen A.K., Eulestein F. (Eds.). *Novel Methods for Monitoring and Management Land and Water Resources in Siberia*. Heidelberg: Springer, 2016. Chapter 21, pp. 489-502.
- [4] Lobell D.B., Field C.B., 2007. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters* 2: 014002.
- [5] Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V., 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma* 107: 1-32.
- [6] Floors R., Peña A., Gryning, S.E., 2015. The effect of baroclinicity on the wind in the planetary boundary layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141(687): 619-630.
- [7] Сычев В.Г., Рухович О.В., Романенков В.А., Беличенко М.В., Листова М.П., 2008. Опыт создания единой систематизированной базы данных полевых опытов Агротехслужбы и Геосети «Агрогеос». *Проблемы агрохимии и экологии* 3: 35-38.
- [8] Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.J., Jarvis A., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- [9] Шарый П.А., 2010. Ряды стабильностей пар элементов в серой лесной почве. Биосферные функции почвенного покрова. *Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 40-летию юбилею Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН*. Пушкино: SYNCHROBOOK, 2010. Часть 3, стр. 347-349.

Глава III/70: ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ Chapter III/70: Yield Forecasting of Agricultural Crops by the Method of Functional Approximation

Маргарита Листова¹, Михаил Альперович², Евгений Альперович³

DOI 10.25680/3298.2018.18.76.263

*Эл. Почта: malper01@yahoo.com, ejen1@yahoo.com

1. Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова РАН
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

2. Abivia LLC, Tampa FL, USA

3. ALPIR Inc, New York, USA

РЕЗЮМЕ. В работе подробно изложен предложенный авторами математический метод моделирования случайных процессов. Метод функциональной аппроксимации (МФА) основан на использовании прототипа моделируемого процесса. Метод использован для моделирования урожайности озимой ржи при внесении удобрений в нормативных дозах и урожая картофеля без внесения удобрений на дерново-подзолистой супесчаной почве (южнотаежно-лесной зоны) в зависимости от её обеспеченности подвижным фосфором опытных участков. В качестве прототипа использована продуктивность озимой ржи (без внесения удобрений), как функция содержания подвижного фосфора в почве. Результаты моделирования показали хорошую точность МФА при интерполяции и экстраполяции продуктивности сельскохозяйственных культур. Показана возможность применения МФА для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур, используя в качестве прототипа одну и ту же модель продуктивности подробно изученной культуры в зависимости от состояния почвенного плодородия.

Abstract. In the study a mathematical method of the simulation of random processes which was developed by the authors is described in detail. Method of functional approximation (MFA) is based on the use of the prototype modeling process. The method was used to simulate the yield of winter rye with application of fertilizer in regulatory doses and yield of potatoes without fertilizer application on sod-podzolic sandy loam soils (southern taiga-forest zone) depending on the availability of mobile phosphorus on the test sites. As a prototype the productivity of winter rye (without fertilization) was used, as a function of the content of mobile phosphorus in the soil. The simulation results showed good accuracy of MFA in the interpolation and extrapolation of productivity of agricultural crops. The possibility of using MFA for forecasting crop yields is shown. For this purpose, the same model of productivity of a thoroughly studied culture is used as a prototype, depending on the state of soil fertility.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Обобщение опытов Геосети, моделирование, метод функциональной аппроксимации, прототип, корректирующая функция, расчет прогнозируемой урожайности, плодородие

Keywords: Generalization of Geoset experiments, modeling, functional approximation method, prototype, corrective function, calculation of predicted yield, fertility

ВВЕДЕНИЕ

При взгляде на графические зависимости различных процессов, описывающих одно и то же явление, часто бросается в глаза их очевидная похожесть. Действительно, достаточно взглянуть на листья дерева и сразу очевидно, что это листья клена, но приложив два любых из них один к другому, легко убедиться, что они не совпадают и сильно отличаются. Рассматривая контуры кленовых листьев, как функцию двух переменных и умножая каждую точку одного контура на некий коэффициент, чтобы она совпала с соответствующей точкой другого, добьемся полного совпадения контуров между собой. Множество таких коэффициентов образует некоторую корректирующую функцию, достаточно сложного вида. Для удобства работы, обычно заменяют эту функцию более простой, которую нетрудно вычислить в заданном интервале изменения аргумента, т.е. используют аппроксимацию. Ниже излагается предлагаемый метод аппроксимации, названный методом функциональной аппроксимации (МФА).

МЕТОД ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Предположим, имеется функция одной переменной $F(x)$, описывающая реализацию некоторого процесса, зависящего от ряда параметров. Из-за изменения значений части параметров, новая функциональная зависимость $F_1(x)$ отклонилась от $F(x)$. Предположим, что функцию $V(x)$, аппроксимирующую исследуемый процесс, можно представить как произведение двух функций. Первый сомножитель – $F(x)$ – функция, описывающая одну из предыдущих реализаций или другой участок одного и того же процесса; или усредненную по нескольким реализациям функциональную зависимость этого процесса. Второй сомножитель – функция $U(x)$, корректирующая отклонения этой функциональной зависимости так, чтобы аппроксимировать функцию $F_1(x)$, описывающую исследуемый процесс.

Функция $F(x)$ должна задаваться не меньшим числом точек, чем $F_1(x)$, или быть непрерывной и иметь тот же тип, что и функция $F_1(x)$, которую надо аппроксимировать.

Будем называть функцию $F(x)$ «*прототипом*».

В соответствии с предположением, аппроксимирующая функция $V(x)$ имеет вид:

$$F_1(x) \approx V(x) = F(x) U(x), \quad (1.1)$$

где $F(x)$ – указанная выше функция - *прототип*, а $U(x)$ – *аналитическая функция*, учитывающая отклонения от исследуемого процесса, т.е. *корректирующая функция* (КФ).

Представим корректирующую функцию $U(x)$ рядом Тейлора. Ограничиваясь конечным числом членов ряда, мы естественно допускаем ошибку, которую можно оценить и соответственно выбрать нужную степень полинома [1].

Пусть для представления функции $U(x)$ выбран полиномом степени s :

$$U(x) = \sum_{i=0}^s a_i x^i, \text{ где } a_s \neq 0, i = 0, 1, \dots, s \quad (1.2)$$

Тогда при $s = 0$, имеем подобие между $V(x)$ и $F(x)$, где U – масштабный множитель.

Самый простой вид КФ, отличающийся от подобия, это линейный МФА.

$$U(x) = bx + c. \quad (1.3)$$

Если выбрана аппроксимация для $U(x)$ линейная, квадратичная или полиномиальная (более высокого порядка), то задача сводится к отысканию коэффициентов полинома, определяющего функцию $U(x)$. Для этого необходимо иметь значения аппроксимируемой функции $F_1(x)$ в $(s+1)$ точках (x_0, x_1, \dots, x_m) и выписать систему из $s+1$ линейных уравнений:

$$\frac{F_1(x_i)}{F(x_i)} = \sum_{j=1}^{s+1} a_{i-1} x_j^{i-1}, \quad j = 0, \dots, s. \quad (s \leq m) \quad (1.4)$$

Если процесс описывается данными эксперимента, содержащими ошибки измерения, то полином, аппроксимирующий корректирующую функцию $U(x)$, целесообразно строить по методу наименьших квадратов, а в качестве экспериментальных значений корректирующей функции брать отношения:

$$U(x_i) = \frac{F_1(x_i)}{F(x_i)}, \quad \text{в точках } x_i, \quad i = 0, 1, \dots, s \quad (1.5)$$

В случае оценки урожайности часто используют функцию 3-х переменных. Это 3 вида удобрений: азот (N), фосфор (P), калий (K). Функция трех переменных $V(x, y, z)$ может быть представлена в виде:

$$V(x, y, z) = U_1(x) U_2(y) U_3(z) F(x, y, z), \quad (1.6),$$

где $U_1(x), U_2(y)$ и $U_3(z)$ – соответствующие КФ, а $F(x, y, z)$ – прототип.

По сути МФА является разновидностью мультипликативной аппроксимации, что позволяет при малом числе данных учесть специфические особенности исследуемого процесса за счёт его предыдущих реализаций.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ РЖИ

Результаты обобщения опытов Геосети по природно-сельскохозяйственным зонам России за многолетний период методом группировок, согласно методике разработки нормативов плодородия [2] показали, как возрастает урожай полевых культур без внесения и при внесении средних доз минеральных удобрений, когда в различных типах почв изменяется содержание подвижного фосфора [3,4,5,6].

В качестве примера использования метода функциональной аппроксимации (МФА) рассмотрим моделирование урожайности озимой ржи на дерново-подзолистой супесчаной почве при внесении удобрений в нормативных дозах ($N_{60-90}P_{40-90}K_{40-90}$) [7] на полях с разным содержанием подвижного фосфора. Обычно функцию урожайности зерновых при этом аппроксимируют либо логарифмической функцией, либо кривой 2-ого порядка в виде уравнения регрессии [8].

В качестве прототипа выбрана квадратичная аппроксимация урожайности озимой ржи (без удобрений), Y б/у как функция зависимости от содержания подвижного фосфора в почве X .

$$Y \text{ б/у} = -0.04X^2 + 1.48X + 4 \quad (2.1)$$

Приведенная ниже таблица содержит всю необходимую для использования МФА информацию.

При МФА выбор типа аппроксимации не существен, поскольку ошибки аппроксимации прототипа (2.1) учитываются корректирующей функцией. Для проверки точности МФА использовалась логарифмическая аппроксимация зависимости урожайности от наличия P_2O_5 в почве по методу наименьших квадратов средствами “Microsoft Excel” по 10 точкам эксперимента. Логарифмическая функция имеет вид: $Y = 5.54 \ln(X) + 13.95X + 4$ (2.2)

Во всем диапазоне использования данных таблицы 1 в точках с содержанием подвижного фосфора от 4 до 21 мг/100г ошибка экстраполяции относительно логарифмической аппроксимации не превысила 10%.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОЖАЯ КАРТОФЕЛЯ ФУНКЦИЕЙ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ РЖИ

Большим преимуществом МФА по сравнению с другими методами аппроксимации является то, что функция прототипа похожа, но может значительно отличаться от реальной кривой. Её отклонения будут устраняться корректирующей функцией. Это особенно существенно для объектов живой природы - растений, у которых существует гомеостаз и похожи функции роста, что позволяет использовать одну и ту же функцию урожайности в качестве прототипа для абсолютно разных культур.

Для примера рассмотрим аппроксимацию урожая картофеля без внесения удобрений от обеспеченности дерново-подзолистых почв подвижным фосфором по данным таблицы 1. Используем в

качестве прототипа рассмотренную ранее квадратичную аппроксимацию урожайности озимой ржи (без внесения удобрений). (2.1).

Таблица 1. Данные экспериментов и прогноз урожайности по МФА озимой ржи при внесении удобрений и картофеля без внесения удобрений

Содержание P_2O_5 (мг/100г почвы)	Урожай б/у, ц/га, озимая рожь (прототип)	Озимая рожь				Картофель		
		Урожай по (NPK), ц/га, exper.	Коррект. функция $U=F1/F$	Урожай по МФА, ц/га	$\ln()$ аппр. урожая *	Урожай б/у экспер., ц/га	Коррект. функция $U=F1/F$	Урожай по МФА, ц/га
4,00	9,28		2,04	18,95	21,62		8,62	83,31
5,00	10,40		2,02	20,95	22,86	110,00	10,58	94,81
6,00	11,44		1,90	22,74	23,84		10,49	105,88
7,00	12,40	27,50	1,97	24,32	24,72	130,00	10,48	116,49
8,00	13,28		1,93	25,68	25,46	170,00	12,80	126,61
9,00	14,08		1,90	26,85	26,11	150,00	10,65	136,20
10,00	14,80		1,88	27,83	26,67	150,00	10,14	145,22
11,00	15,44		1,85	28,61	27,22	130,00	8,42	153,65
12,00	16,00	31,75	1,83	29,22	27,70		8,94	161,45
13,00	16,48	27,50	1,80	29,65	28,15		9,53	168,59
14,00	16,88	22,50	1,77	29,92	28,56	170,00	10,07	175,03
15,00	17,20		1,75	30,02	28,94	140,00	8,14	180,74
16,00	17,44		1,72	29,97	29,30	150,00	8,60	185,69
17,00	17,60		1,69	29,77	29,63	190,00	10,80	189,84
18,00	17,68	37,50	1,66	29,43	29,95		10,46	193,17
19,00	17,68		1,64	28,96	30,25	180,00	10,18	195,63
20,00	17,60		1,61	28,35	30,53		10,40	197,19
21,00	17,44		1,58	27,63	30,80		10,67	197,83
22,00	17,2					190,00	11,05	197,50
23,00	16,88						11,85	196,18

*Примечание. Перед вычислением корректирующей функции проведена линейная интерполяция данных эксперимента в пропущенных точках

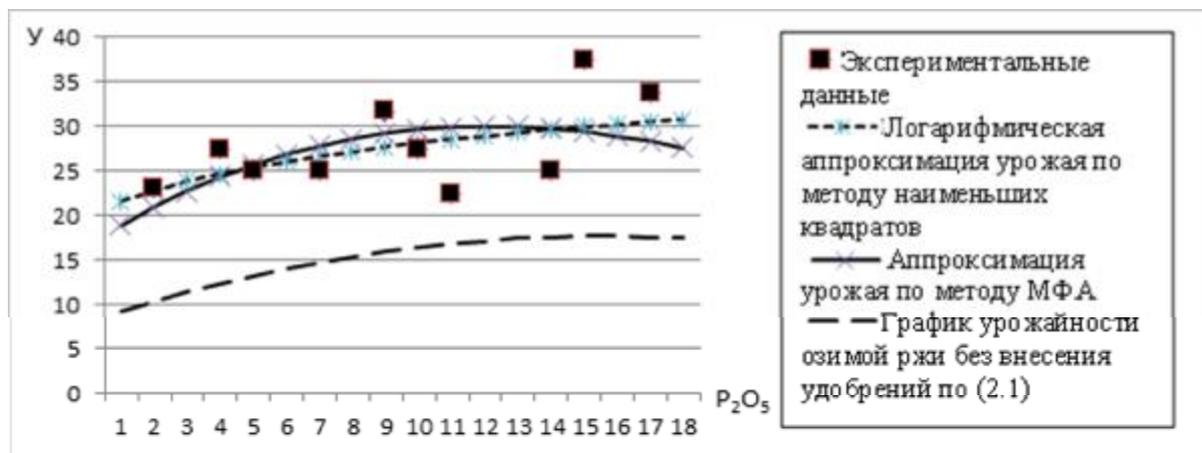


Рисунок 1 - Данные эксперимента и МФА прогнозируемой урожайности озимой ржи при внесении удобрений

Линейная аппроксимация корректирующей функции, полученная средствами Microsoft Excel имеет вид: $Y = 0.139X + 8.420$ (3.1)

Заметим, что ошибка аппроксимации в крайних точках изменения концентрации подвижного фосфора в почве (4,00 и 190 мг $P_2O_5/100г$) соответственно составляет $\approx 4\%$ от опытных значений данного эксперимента.

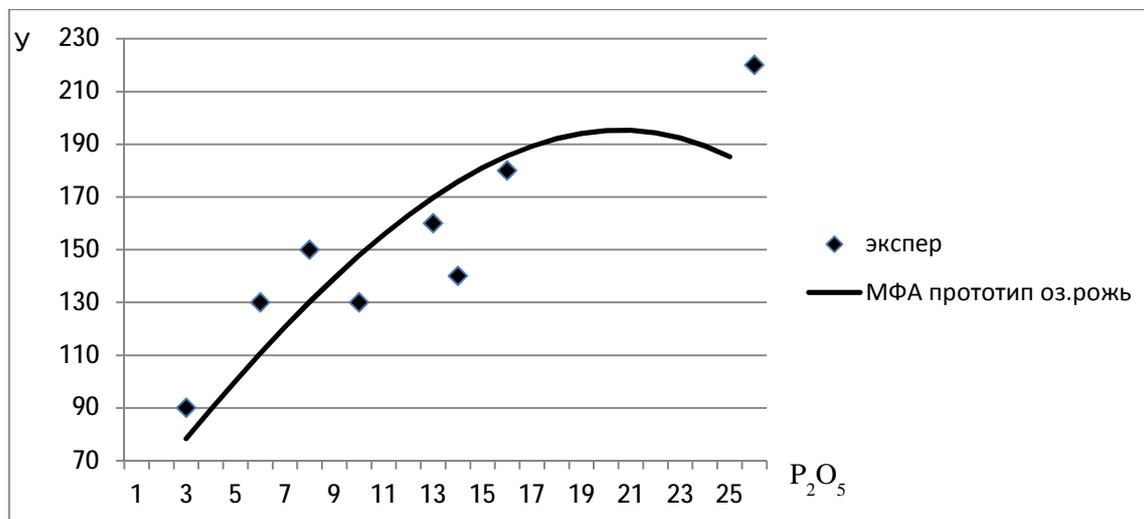


Рисунок 2 - Урожай картофеля без внесения удобрений в зависимости от обеспеченности дерново-подзолистых почв подвижным фосфором по данным (табл. 1) и по методу МФА прототип озимая рожь)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенный метод функциональной аппроксимации (МФА) показал хорошую точность при интерполяции и экстраполяции продуктивности сельскохозяйственных культур.
2. Несложная компьютерная программа, основанная на методе функциональной аппроксимации (МФА), дает возможность прогнозировать и оценивать урожайность сельскохозяйственных культур с достаточно высокой точностью даже при малом числе экспериментальных данных. (4 значения).
3. Это позволяет отказаться от значительного числа затратных исследований и может быть полезным советчиком для аграриев с небольшим опытом работы.
4. Очень важным является тот факт, что для хорошей аппроксимации разных культур можно использовать достаточно подробно зафиксированные экспериментальные данные всего одной из сельскохозяйственных культур агроландшафта в качестве прототипа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа. Том 1 М., 2015, 448 с.
- [2] Методика разработки нормативов зависимости урожая с/х культур от показателей плодородия почв М. ВИУА, 1990 -49 с.
- [3] Сычев. В.Г. Основные ресурсы урожайности с/х культур и их взаимосвязь. М. Изд-во ЦИНАО, 2003.228 с.
- [4] Листова М.П. Моделирование агроэкосистем по данным Агрохимслужбы и Геосети// Плодородие 2007, №1 с2-4
- [5] Фосфатный режим почв земель с/х назначения. // Бюллетень Геосети. Вып. 11. М.: ВНИИА, 2011. - 63 с.
- [6] Совершенствование единой системы мониторинга в длительных агрохимических полевых опытах Геосети Бюллетень Геосети. Вып. 22. М.: ВНИИА, 2016. - 44 с
- [7] Нормы и нормативы для планирования в сельском хозяйстве. Растениеводство М. ВО «Агропромиздат» 1988 272 с
- [8] Прошкин В.А. Характеристика моделей прогноза эффективности минеральных удобрений Плодородие 2011 №3 с27-31

Chapter III/71: SIMULATING THE EFFECTS OF AGROCHEMICALS AND OTHER RISK-BEARING MANAGEMENT MEASURES ON THE TERRESTRIAL AGROBIODIVERSITY: THE RISKMIN APPROACH

Глава III/71: Моделирование влияния агрохимикатов и других мер по управлению рисками в наземном агробиоценозе: подход RISKMIN

Matthias Trapp*¹; Mark Deubert¹; Lucas Streib¹; Martina Roß-Nickoll²; Björn Scholz-Starke²; Andreas Toschki³

DOI 10.25680/5187.2018.80.87.264

*Email: matthias.trapp@agroscience.rlp.de

1. Institute for AgroEcology (IfA), RLP AgroScience, Breitenweg 71, 67435 Neustadt, Germany.

2. Institute for Environmental Research (Biology V), RWTH Aachen University, Worringerweg 1, 52074 Aachen, Germany.

3. gaiac - Research Institute for Ecosystem Analysis and Assessment, Kackertstraße 10, 52072 Aachen, Germany.

ABSTRACT. The RISKMIN Model was a research project of the German Federal Office of Consumer Protection and Food Safety to develop a landscape-based mitigation approach for assessing different measures and their effects on agrobiodiversity. Based on an interdisciplinary cooperation between different research groups in Germany two representative landscapes were chosen as pilot regions. Based on a very high resolution landscape analysis and a comprehensive survey of the biodiversity in these regions a simulation of different risk mitigation measures was realized by reference to potential scenarios. The resulting effects could be quantified and visualized with the help of geographic information systems (GIS). Main results are that the most effects on landscape level are the extensification of the land use, but on the other hand, that the combination of in crop and off crop measures does have the most effects for the landscape elements with the highest ecological values.

Резюме. Модель RISKMIN является исследовательским проектом Федерального управления по защите прав потребителей и безопасности пищевых продуктов Германии по разработке ландшафтного подхода к смягчению негативных последствий и для оценки различных мер и их воздействия на агробиоразнообразие. На основе междисциплинарного сотрудничества между различными исследовательскими группами в Германии в качестве пилотных регионов были выбраны два репрезентативных ландшафта. Основываясь на ландшафтном анализе с очень высоким разрешением и всестороннем обзоре биоразнообразия в этих регионах, было проведено моделирование различных мер по снижению риска с учетом возможных сценариев. Полученные результаты можно количественно оценить и визуализировать с помощью географических информационных систем (ГИС). Основные результаты заключаются в том, что наибольшее влияние на ландшафтный уровень оказывает экстенсификация землепользования, но, с другой стороны, сочетание мер в области растениеводства оказывает наибольшее воздействие на элементы ландшафта с самыми высокими экологическими ценностями.

KEYWORDS: biodiversity, ecological values, landscape classification and analysis, risk assessment, mitigation measures, GIS

Ключевые слова: биоразнообразие, экологические ценности, классификация и анализ ландшафта, оценка рисков, смягчающие меры, ГИС

INTRODUCTION

Biodiversity is the basic resource maintaining and supporting ecosystem services and functions. Biodiversity is realized at different levels in the complexity of a given landscape. Therefore when dealing with biodiversity related aspects the analysis of landscapes and not of single fields is important. EFSA published different opinions and scientific papers in the context recovery and recolonisation. In these opinions a clear relationship between landscape and risk is formulated. "There is, therefore, an important interplay between homogeneity of agricultural practices over spatial scales, and the potential for recovery from stresses. Landscape features therefore may need to be assessed when assessing the potential for external recovery. This is clearly problematic as it indicates that not the assessed product or species per se

may be decisive for the recovery from impact, but the properties of the environment in which these products or species are having an effect. This is challenging from a regulatory perspective” ([1]). It is widely accepted that species diversity and habitat quality is dramatically decreasing in Germany. The loss of habitats and intensity of agricultural land-use are one of the main accepted reasons for this. In recent years indeed a constant decline of the biodiversity of agricultural landscapes is observed, indicated by e.g. birds & butterflies (Aichi targets adopted by the EU) [2]. Environmental stressors (like pesticides) act on the landscape level [3]. This adverse effect is relevant within national as well as EU legislation. Important questions in landscape risk assessment are (1) how to protect biodiversity at landscape level, (2) how to quantify and assess the impact of land use scenarios and (3) whether there is a state or a known situation, to which the quality of biodiversity can be compared (reference state). Biodiversity depends on the combination of landscape elements and the environmental conditions of a landscape area. An ecological value is deduced from “biotope valences” made for environmental assessments within the German “impact mitigation regulation”. In the German multidisciplinary project RISKMIN, sponsored by the German Federal Office of Consumer Protection and Food Safety these approaches were investigated and tested for two pilot regions in Germany [4]. This publication gives a short overview about methods and results of the RISKMIN project.

MATERIAL AND METHODS

RISKMIN is an interdisciplinary cooperation between geographers, ecologists, ecotoxicologists and risk managers. At first a conceptual approach (fig. 1) of the RISKMIN model was developed, in which six modules are differed. This modular approach offers the opportunity to handover data and information between the work packages.

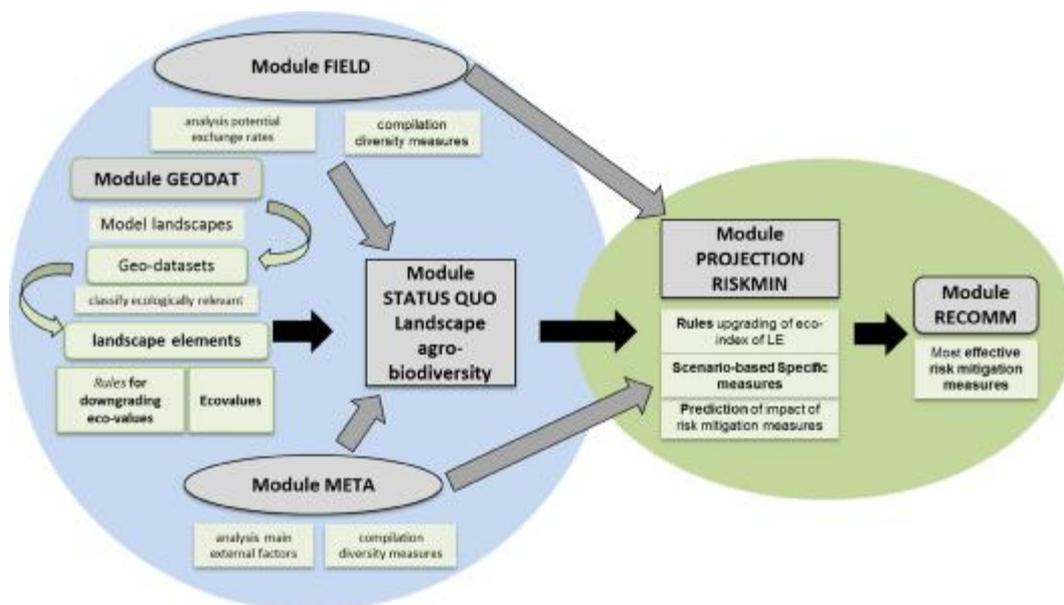


Figure 1 – Conceptual approach of the RISKMIN Model

The modul **Field** as practical in field survey covers the important, regionally-relevant types of biotopes of agricultural landscapes from in-crop like cropland and meadows and off-crop like hedges, fallow cropland and fallow meadows.

The modul **Meta** is based on a comprehensive literature research and covers the most important factors affecting the agrobiodiversity like farming practices, pesticide and fertiliser use.

The modul **Geodat** delivers a high resolution landscape classification following the approach of NatFlo, published by Tintrup et al. 2015 [5] and Trapp et al. 2015 [6] as input for the indicator based mapping of the structural diversity in the agricultural landscape resulting in landscape elements and land cover.

In the moduls **Status Quo** as well as in the moduls **Projection RiskMin** and **Recomm** the linkage of the automated analyses of landscape structures with measures of biodiversity, mobility of populations, and impacts of (pesticide) risk management measures is conducted.

To each of the landscape elements (LE) mapped in the modul **Geodat** an ecological value, derived from impact regulation between 0 and 100 is assigned which reflects the relative natural value of the respective element in the agricultural landscape, which is closely related to the biotope type.

An integrated landscape ecological value is calculated as the sum of all values of the single LE by the module **Status Quo**, which is then corrected for intensive agricultural use for LE nearby the in-crop areas. This value is basis for mitigation on landscape level. The module **Projection** then identifies risk mitigation measures (RMM) of different mechanisms, defines most promising RMM and implements rules for mechanisms of melioration on landscape level. The effects of different RMM and the most effective ones are then calculated and interpreted in the module **Recomm**. The modules **Field** and **Meta** deliver information and data whenever necessary and lacking for the main thread of the project.

The model landscapes and GIS-based classification of their elements

Two different types of landscapes have been chosen for the development of the concept, that should be valid and applicable at least to Germany, however, the principle is transferable to all agricultural landscapes throughout Europe. The ‘Horbacher Börde’ in the natural area ‘Vennvorland and Aachener Hügelland’ is well wooded, grassland-dominated cultural landscape that is considered comparable well-equipped with structural elements that host biodiversity, even though not of high ecological value. The ‘Vorderpfalz’ in the natural areas ‘Haardtrand-Weinstrasse and Vorderpfälzer Tiefland’ is a purely viticulturally characterised landscape with small fields and a high degree of different landscape structures combined with an intensive land use.

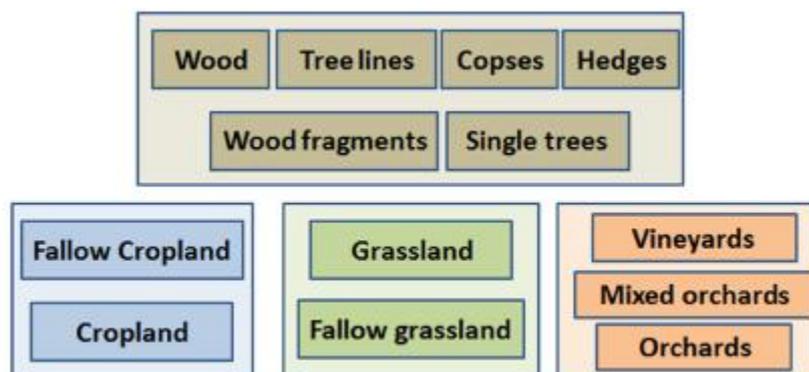


Figure 1: Main categories of landscape elements. Eco-values are assigned to sub-categories by several criteria (intensity of use, age, biodiversity, etc.), which sum up to about 50 LE-types.

In the two landscapes, all structural elements have been identified by the software ‘ecognition’ and the vegetation has been surveyed by the combination of digital surface and the digital elevation models with high resolution aerial photographs with infrared channel (method: ‘NatFlo [5]). After then, height, width, area and descriptive statistics for each of the LEs was calculated and used in combination with geo-referenced land-use information and statistical assignments for the definition of up to 50 different ecologically relevant LE-Types.

The LE-types have been classified into 13 main categories and have been further differentiated to characteristic eco-values by intensity of use, age, extent, proportion of typical plant species and others (fig. 2). The ‘landscape-wide eco-value’ is then calculated as the status quo sum of all eco-values of the LE in the respective landscape section.

The analysis of the data from the field surveys found some generalizable rules how LE-biocoenoses could contribute exchange to a similar LE-type and how this could lead to an upgrade of the actual state of a landscape element. We describe the effect of introducing more, new or better equipped LE-types that host biodiversity into a given landscape and how would less intense use affect the state of biodiversity. We give recommendations which measures would be best suited considering the specific boundary condition in as landscape and where they would be placed best for effectiveness.

RESULTS AND DISCUSSION

The methodology is considered well established but needs calibration by data from different landscapes. The model that was derived from the RISKMIN project puts the discussion on landscape-based RMM a

fine step forward. The RISKMIN concept is an option for risk managers especially to optimize RMM on a local to regional level alongside with national programs for sustainable land use. The following figure 3 visualizes an example of one of the landscape related simulation and compares the Status Quo and the Scenario 1 (= extensification of arable land). Therefore you can see in detail how many fields would be extensified and with the help of georeferenced data you can quantify the effect by calculating the sums of the overall ecological values.

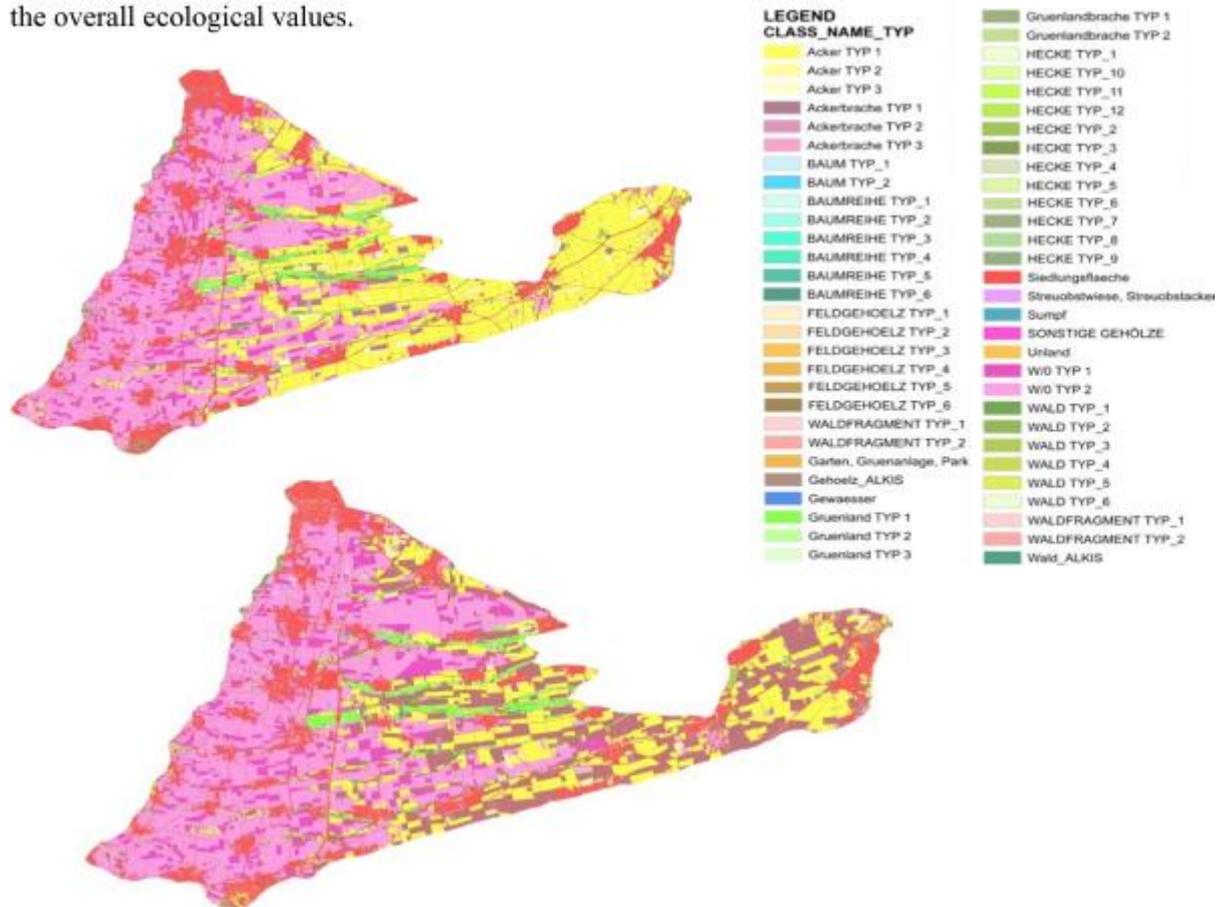


Figure 3: Visualisation of one landscape related simulation: Comparison between the Status Quo and one extensification scenario.

One important result of the RISKMIN project is that the ‘regulations’ RMM do not much impact the total landscape ecological valences due to the small amount of area of ‘high-value off-crop structures’ compared to in-field area. Therefore the ‘extensification’ of large in-field areas has the highest absolute impact on the total landscape ecological valences.

On the other hand the other important result can be described by ‘type-related affectedness’. This means that the combination of in field and off field mitigation measures linked in landscape contexts have more effects than spatial singular measures, e.g. narrow margins would benefit most.

CONCLUSIONS

1. With respect to landscape level, different RMM need to be calibrated to different landscape types. Landscape related mitigation measures are more effective than measures without respect to the environmental conditions and the neighbourhood relations in spatiotemporal context.
2. Most effective is a more extensive landuse, but implementing different kinds of mitigation measures in crop and off crop to support synergistic effects and building up a network could lead to similar results.
3. In future, the effects could be validated by on-site monitoring of the biodiversity or of the quality of landscape elements and a region specific assessment should be applied by defining “general principles” for different types of landscapes.
4. Heat-maps of biodiversity hotspots or sinks could be helpful for risk managers deciding on the most efficient measures to be implemented.

REFERENCES

- [1]European Food Safety Authority (EFSA), 2016. Recovery in environmental risk assessments (ERA). EFSA Journal 2016;14(2):4313, pp. 85. doi: 10.2903/j.efsa.2016.4313
- [2]European Environment Agency (EEA) 2013. The European Grassland Butterfly Indicator: 1990–2011. EEA Technical report No 11/2013. pp. 36.
- [3]Tschardtke, T.; Klein, AM.; Kruess, A.; Steffan-Dewenter, I.; Thies, C. 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity – ecosystem service management. Ecology Letters 2005. 8: pp. 857–874. doi: 10.1111/j.1461-0248.2005.00782.x
- [4]Federal Office of Consumer Protection and Food Safety (BVL), 2016. Forschungsprojekt RISKMIN Website:
https://www.bvl.bund.de/DE/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/09_GesundheitNaturhaushalt/02_SchutzNaturhaushalt/psm_SchutzNaturhaushalt_RiskMin_basepage.html.
- [5]Tintrup gen. Suntrup, G.; Jalke, T.; Streib, L.; Keck, N.; Nieland, S.; Moran, N.; Kleinschmit, B.; Trapp, M. (2015). New Methods in acquisition, update and dissemination of nature conservation geodata – implementation of an integrated framework, The 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 11 – 15 May 2015, Berlin, Germany, ISRSE36-605-3
- [6]Trapp, M.; Jalke, T.; Tintrup gen. Suntrup, G. (2015). Automatisierung von Verwaltungsabläufen am Beispiel von Landwirtschaft und Umwelt, LSA VERM 1/2015, ISSN 1435-2338, 25-30

Chapter III/72: A DSS MODEL FOR THE GOVERNANCE OF SUSTAINABLE RURAL LANDSCAPE

Глава III/72: Модель DSS для управления устойчивым сельскохозяйственным ландшафтом

Massimo Rovai^{*1,3}; Maria Andreoli^{1,3}; Simone Gorelli²; Heikki Jussila³

DOI 10.25680/9824.2018.10.44.265

*Email: Massimo.rovai@unipi.it

1.Dept. of Agricultural, Food and Agro-Environmental Sciences, University of Pisa, via del Borghetto, 80, 56124, Pisa, Italy

2.Ema srl, Loc. Boddo 5, 56032 Buti (Pisa), Italy

3.Laboratorio di Studi Rurali Sismondi, Pisa, <https://sismondi.wordpress.com/>

ABSTRACT. This paper presents a model based on the integration of a geographical multi-criteria analysis and advanced GIS-based geo-processing tools aiming at identifying farms' and rural landscape's evolutionary paths. The model integrates information about natural characteristics, cultural aspects of the past and present, and socio-economic aspects of farms, since agriculture is the main driver of change for rural landscape. Farm strategies are influenced by internal factors but also by external factors, such as market conditions and policies; which both are drivers of landscape changes, while policies could have also the role of response to problems of landscape maintenance and improvement. The identification of future landscape scenarios is based on the integration of past evolution, landscape sensitivity and farmers' adaptation capacity to market and policy changes. A first version of the model was tailored and tested in the Municipality of Castiglion d'Orcia (Tuscany, Italy), belonging to one of the most well known UNESCO cultural landscapes of Italy.

Резюме. В данной статье представлена модель, созданная на основе интеграции географического многофакторного анализа и современных инструментов гео-обработки, основанной на ГИС, направленных на выявление эволюционных путей фермерских хозяйств и сельскохозяйственного ландшафта. Модель интегрирует информацию о природных особенностях, культурных аспектах прошлого и настоящего, и социально-экономических аспектах развития хозяйств, поскольку сельское хозяйство является главным фактором изменений сельского ландшафта. На сельскохозяйственные стратегии влияют не только внутренние, но и внешние факторы, такие, как рыночные условия и политика, которые являются движущей силой изменений ландшафта, в то время как политика может также реагировать на проблемы сохранения и улучшения ландшафта. Определение сценариев развития будущего ландшафта основывается на интеграции прошлых изменений, чувствительности ландшафта и способности фермеров адаптироваться к изменениям рынка и политики. Первая версия модели была специально разработана и проверена в муниципалитете Кастильон д'Орча (Тоскана, Италия), принадлежащий к одному из самых известных культурных ландшафтов ЮНЕСКО в Италии.

KEYWORDS: Landscape planning, Rural landscape, Multicriteria analysis, GIS, Tuscany

Ключевые слова: Ландшафтное планирование, сельский ландшафт, многофакторный анализ, ГИС, Тоскана

INTRODUCTION

The European Landscape Convention (ELC) defines landscape as “an area, as perceived by people, whose character is the result of the action and interaction of natural and/or human factors” and underlines that “a landscape forms a whole, whose natural and cultural components are taken together, not separately” [1]. This not only asks for an integration of the methodologies and approaches that concern biophysical and socio-cultural aspects, but asks also for the adoption of proper tools able to highlight the effects of human activities on landscape. Due to its spatial characteristic, landscape is ruled by territorial planning, which states rules and standards about land use and transformation, usually through command and control tools. Territorial planning is usually regulated by laws that are more area-specific than agricultural policies. Also policies dealing with environmental issues can influence agriculture and landscape services. Landscape conservation, management and planning is a very complex task, implying transdisciplinary and interdisciplinary approaches since landscape quality and the ecosystem services that it provides depend on many features belonging to different research fields. According to Agnoletti [2], there is a bias towards nature and environment at policy level, insofar international directives involving landscapes are often overlapping the idea of nature with that of landscape, encouraging renaturalization, particularly in the form of forest cover, and neglecting ancient landscape patterns. The Orcia Valley landscape (case-study area) is considered as an identity resource and a strategic factor for this territory's good reputation [3] and, although the local community would like to maintain or to develop it in a sustainable way [4], it is nevertheless under threat due to the change of Common Agricultural Policy (CAP). In this framework, the aim of this paper is to propose a decision support system (DSS) able, for a specific area, of achieving two goals. Firstly, to improve the knowledge of the possible effects on landscape and its ecosystem services deriving from changes in farmers' choices due to internal and external factors, and then, to suggest possible area-tailored interventions to counteract the significant and negative effects that CAP can produce. The present contribution is based on Rovai et al. [5].

MATERIAL AND METHODS

Landscape evolution and governance of an area is deeply connected with the institutional, cultural and socio-economic framework. Consequently, the most relevant features to be taken into account in a model could vary from area to area. Antrop [6] highlights how, in defining landscape sustainability, there are several important questions to be answered: a) what one aims to maintain; b) what is the type of landscape to sustain and c) what is the scale and time horizon of sustainability one is aiming at. Our general framework for the governance model of sustainable rural landscapes (Figure 1) requires:

- An evolutionary analysis based, from the one hand, on statistical and territorial analyses, and, from the other hand, on participatory tools, able to highlight past evolutionary paths;
- A current situation analysis based on the hypothesis that both territorial and farm characteristics have an impact on landscape and the ecosystem services it provides.
- In this model all evaluations are based on the integration between tools proper of territorial and environmental analysis – as GIS-based Multicriteria Decision Aid Techniques – and participatory

instruments. Geographic Multicriteria Decision Aiding Techniques may be used to rank spatial decisional alternatives according to their specific and often conflicting evaluation criteria [7]. For this analysis, we used the multi-attribute Saaty's Analytical Hierarchical Process (AHP), which includes three different stages: a) analysis, b) pair wise comparison, and c) hierarchical re-composition [8]. Both in farm and territorial analyses, information has been organized in criteria, sub-criteria and attributes. In the model, the participatory method has a fundamental role as it allows to collect information at different levels [5] and to involve the whole population – and not only experts – in the governance of landscape, as required by a transdisciplinary approach.

- Since the management of ecosystem services provided by landscape is very complex, in testing our model we have decided to focus on rural cultural landscapes where the main ecosystem services (ES) provided are cultural ones.
- The historical and evolutionary investigation (Figure 1 - left part), aims to evaluate the effects of agricultural policies and other driving forces on farmers' choices in relation to agro-territorial and landscape evolutions. The acquired historical knowledge permits to point out the characteristics of each landscape in order to direct planning choices in correct ways. Such knowledge can be acquired via social and historical studies and consulting the archives of local communities.

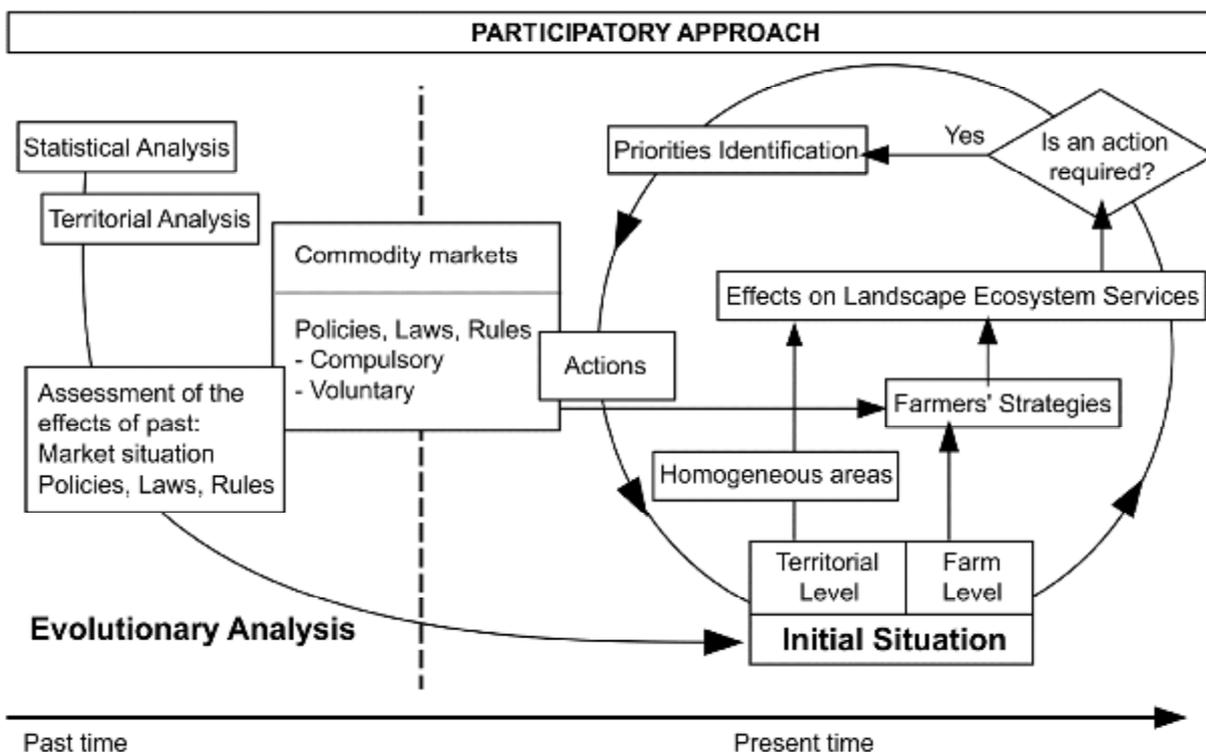


Figure 1 – Flow chart of the model for the governance of sustainable rural landscape [5]

The territorial analysis is necessary to classify a territory into homogeneous ambits as regards the level of ecosystem services that they are able to provide and the risk that anthropic activities might negatively impact on them. The territorial analysis allows to determine landscape sensitivity values for each portion of an area, and consequently, to individuate and locate zones with similar level of adaptability to the modifications induced by anthropic activities.

The analysis at farm level aims to evaluate and map, from a short to a medium period point of view, farmers' likely future strategies based on their adaptation capacity to changes of agricultural policies. We consider farmers' choices as affected by two sets of criteria, the first one relating to plots' suitability to cultivation, and the second one describing farms' characteristics; these latter have been classified into the following three subsets (or criteria): a) structural, b) socio-economic, and c) management characteristics. While the first set (plot analysis) aims to analyse the level of plot resistance to abandonment, the second set (analysis of farm characteristics) aims to analyse the resistance of farms, that is to say their ability to react to external solicitations. Plot and farm characteristics have been used to hypothesize 7 evolutionary paths based on the levels of the overall adaptation capacity.

RESULTS AND DISCUSSION

Evolutionary analysis (past time): Results show that agriculture technological development, the introduction of supplementary payments for durum wheat and of new varieties characterized by higher productivity have caused a progressive specialisation of the farms in winter cereals, as well as in an increased incidence of arable areas at the expense of semi-natural zones and a remarkable land property concentration. All this has determined a simplification of the agro-environmental system and of the rural landscape.

Landscape analysis (present time): Results allow identifying the most sensitive areas that need special attention in territorial planning processes, due to an elevated frequentation, a significant persistence of past landscape elements and a high visibility, together with the presence of relevant areas from an environmental viewpoint.

Farm analysis (present time): Results highlight that about 70% of the assessed farms have a high level of adaptive capacity to external changes, whereas the remaining 30% present a reduced adaptation capacity; this latter might cause the abandonment of some of the cultivated plots and even the cessation of farming if external conditions become exceedingly adverse. The socio-economic analysis indicates that the agricultural productive system of the area is quite resistant; however a deterioration of market conditions might have a high impact on landscape configuration. Figure 2 shows the geographical distribution of the analysed farms, in relation to their more likely evolutionary paths, based on their capacity of reaction to the external changes, and the suitability to cultivation of their plots. In figure 2, VH and LM classes have been omitted, since they are not present in the case-study area.

Only on the basis of the results of territorial and farm analysis, proper response actions can be designed. These can vary, according to farm likely evolutionary paths, from public institution actions for the promotion of the territory, to specific regulations and incentives for the preservation of landscape's current state, up to incentives to improve farm viability in the specific territorial context. Steering intrinsic motivation represents an action that has more lasting effects and could reinforce the effects of other policies or actions.

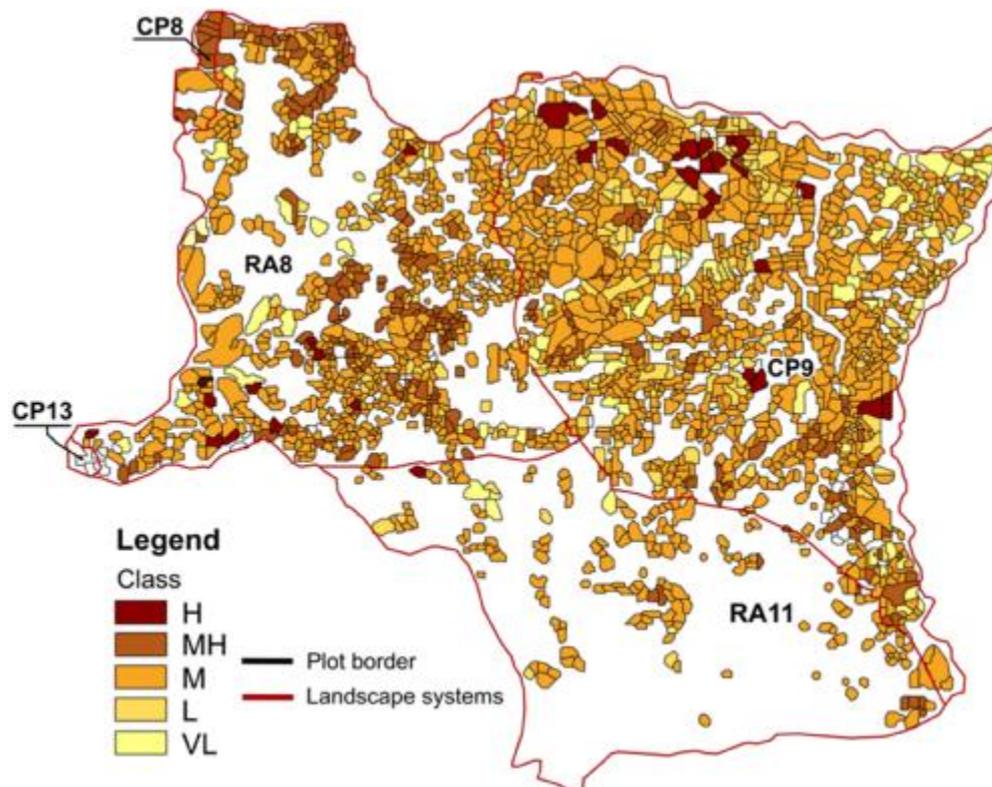


Figure 2 – Spatial distribution of classes related to farm evolutionary path [5]

Legend: H: Maintenance/Multifunctionality; MH: Multifunctionality; M: Uncertain evolution; L: Sell or rent of land to stronger farms/abandonment; VL: Abandonment

CP8, CP9, CP13, RA8 and RA11 refer to landscape systems and subsystems identified by the Tuscan Law on Planning.

CONCLUSIONS

The general governance model that we propose:

1. Integrates methods and techniques belonging to different but complementary fields allowing to cope with different time and spatial scales.
2. Highlights the importance of a direct involvement of social actors to bring about structural and long-term changes.
3. Allows to single out and locate sub-regions where critical evolutions may take place.
4. On the base of our results, we think that in order to promote the governance of a sustainable rural landscape it is necessary:
 - To create proper data-bases about environmental and socio-economic information.
 - To promote participation.
 - To make planning and programming processes continuous and more flexible.
 - To overcome the lack of coordination between different policy tools. Efforts should be directed towards innovative policies and governance instruments.

REFERENCES

- [1] Council of Europe. 2000. European Landscape Convention. Report and Convention Florence, ETS No. 17, 8. doi:<http://conventions.coe.int/Treaty/en/Treaties/Html/176.htm>
- [2] Agnoletti M. 2014. Rural landscape, nature conservation and culture: Some notes on research trends and management approaches from a (southern) European perspective. *Landscape and Urban Planning*, 126, 66–73.
- [3] Antrop M. 2005. Why landscapes of the past are important for the future. In *Landscape and Urban Planning*, 70 (1/2), 21-34.
- [4] Rovai M., Gorelli S., Balducci E. 2007. The role of common agricultural policy in the landscape evolution: the case study of Val d'Orcia (Siena, Italy), in: *The Third International Scientific Conference Rural Development*, Lithuania
- [5] Rovai M., Andreoli M., Gorelli S., Jussila H. 2016. A DSS model for the governance of sustainable rural landscape: A first application to the cultural landscape of Orcia Valley (Tuscany, Italy). *Land Use Policy*, 56, 217-237.
- [6] Antrop M. 2006. Sustainable landscapes: contradiction, fiction or utopia?. In *Landscape and Urban Planning*, 75, 187-197.
- [7] Malczewski, J. 1999. GIS and multicriteria decision analysis. (J. Malczewski, Ed.) *Engineering* (Vol. 31). Wiley
- [8] Saaty T. L., Vargas L. G. 1994. *Decision making in economic, political, social, and technological environments with the analytic hierarchy process*. Pittsburgh: RWS Publications